

56. Internationale PhysikOlympiade Kolumbien 2026



Wettbewerbsleitung

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

Dürken Quaas
Tel.: 0431 / 880 - 5387
email: quaas@ipho.info

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

web: www.ipho.info

Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde im Auswahlwettbewerb zur 56. IPhO 2026

PhysikOlympiade am IPN, CC BY 4.0

Nur für betreuende Lehrkräfte. Nicht vor Oktober 2025 an Schüler:innen 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 Bearbeitungen Ihrer Kandidatinnen bzw. Kandidaten anhand dieser Musterlösung zu bewerten. Die Teilnehmenden sollten ihre Bearbeitung regulär bis zum **08. September 2025** bei Ihnen abgeben. Sie können gerne, z. B. aufgrund später Sommerferien, individuell einen anderen Abgabetermin verabreden. Wichtig ist dabei, dass der Stichtag für die Online-Übermittlung der Ergebnisse und die Einsendung der bewerteten Bearbeitungen der 1. Runde an Ihre(n) zuständige(n) Landesbeauftragte(n) bis zum **26. September 2025** eingehalten wird. 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. Melden Sie uns daher gerne auch diese Teilnehmenden.

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!



Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik

Hinweise zur 1. Wettbewerbsrunde für betreuende Lehrkräfte

Im Auswahlwettbewerb zur Internationalen PhysikOlympiade kommt ein Online-Anmelde- und -Bewertungssystem zum Einsatz, welches Sie unter www.scienceolympiaden.de/portal erreichen.

Registrierung und Anmeldung zur PhysikOlympiade als betreuende Lehrkraft

- Zur Registrierung bzw. Anmeldung sind **2 Schritte** erforderlich – eine Registrierung im Onlineportal der ScienceOlympiaden zur Erstellung eines Nutzerkontos sowie die Anmeldung zur PhysikOlympiade.
- Bitte **registrieren** Sie sich, sofern Sie noch kein Nutzerkonto im Onlineportal besitzen, frühzeitig unter www.scienceolympiaden.de/portal/register als Betreuerin bzw. Betreuer in den ScienceOlympiaden.
- Nach der Registrierung können Sie sich unter www.scienceolympiaden.de/portal in dem Onlineportal einloggen und von Ihrer Startseite ab dem 01. April 2025 für die PhysikOlympiade 2026 **anmelden**.
- Bei der Anmeldung ist zur **Freischaltung** einmalig das Hochladen eines ausgefüllten und von der Schule abgestempelten **Verifikationsformulars** erforderlich, das benötigt wird, um Ihre Zugehörigkeit zu der von Ihnen angegebenen Körperschaft zu verifizieren.
- Nach Abschluss der Anmeldung prüfen wir diese und schalten Sie für die PhysikOlympiade als Betreuerin bzw. Betreuer frei. Wenn Sie bereits für eine der ScienceOlympiaden im Onlineportal freigeschaltet sind, entfällt dieser Schritt.
- Erst nach erfolgreicher Freischaltung sehen Sie auf der Startseite des Onlineportals oben links Ihren **Personencode**. Geben Sie diesen bitte an alle von Ihnen betreuten Teilnehmenden weiter. Diese benötigen ihn für ihre Anmeldung zur PhysikOlympiade.
- Im Bereich „Meine Dokumente“ finden Sie dann auch die Musterlösung zur 1. Runde und ggf. weitere Dokumente zum Wettbewerb als Download.

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 i.d.R. bis zum **08. September 2025** bei Ihnen abgegeben werden, damit Sie die Korrektur durchführen und die Ergebnisse rechtzeitig weitergeben können. Sie können mit Ihren Schülerinnen und Schülern individuell auch andere Termine verabreden, sofern der Rückmeldetermin an die Landesbeauftragten eingehalten wird (s. auch unten).
- Vor der Abgabe der Arbeit müssen sich teilnehmende Schülerinnen und Schüler ebenfalls im Onlineportal registrieren und für die PhysikOlympiade anmelden. Dafür benötigen sie Ihren Personencode.
- Nach der Anmeldung eines Schülers bzw. einer Schülerin erhalten Sie per E-Mail eine **Betreuungsanfrage**. Bitte bestätigen Sie diese, um Ihnen die Teilnehmenden zuzuordnen und deren Ergebnisse eingeben zu können. Die Bestätigung erfolgt im Admin-Dashboard des Onlineportals, welches sich oben rechts unter dem Menüpunkt „Profil“ befindet.

Bewertung der Arbeiten und Übermittlung der Ergebnisse

- **Bewerten** Sie die Ausarbeitungen Ihrer Kandidatinnen und 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 2025/2026 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 bei 30 Punkten.
- Teilen Sie uns bitte die **Bewertungsergebnisse** Ihrer Schülerinnen und Schüler **online** über das Onlineportal mit. Nur so können wir sicherstellen, dass die Bearbeitung korrekt erfasst wird. Auf die Bewertungsmasken können Sie über das Admin-Dashboard im Onlineportal zugreifen, welches sich oben rechts unter dem Menüpunkt „Profil“ befindet. Einen Leitfaden zur Bewertungseingabe finden Sie im „Fragen und Antworten“-Bereich auf unserer Webseite.
- Bitte schließen Sie Ihre Bewertungseingabe erst nach Eingabe aller Bewertungen über den Button „Alle Bewertungen abschließen“ ab. Damit sind Ihre Bewertungen final im System hinterlegt.
- Schicken Sie die bewerteten Arbeiten zusammen mit den Bewertungsbögen bis spätestens zum **Stichtag der Einsendung am 26. September 2025** an Ihre(n) Landesbeauftragte(n). Kontaktinformationen zu den Landesbeauftragten finden Sie unter www.ipho.info.
- Alternativ zum Postversand können Sie die bewerteten Arbeiten mit den Bewertungsbögen auch einscannen und als jeweils eine pdf-Datei pro Schüler:in in der Bewertungsmaske der 1. Runde **elektronisch einreichen**. Auch hierfür gilt der 26. September 2025 als Stichtag der Einreichung.
- Alle Teilnehmenden der 1. Runde sowie ihre betreuenden Lehrkräfte erhalten im Oktober 2025 per E-Mail eine Rückmeldung zu ihrem Abschneiden und ggf. eine Einladung zur 2. Runde, die im November als Klausur i.d.R. an den Schulen geschrieben wird. Die Urkunden und Teilnahmebestätigungen für die 1. Runde werden an die Schulen zur Weitergabe an die Schülerinnen und Schüler gesendet.

Bei Fragen oder Problemen helfen die Landesbeauftragten und das Team der PhysikOlympiade am IPN gerne weiter.

Wir danken Ihnen sehr für Ihre Unterstützung der PhysikOlympiade.

Aufgabe 1 Eiskalt geforscht

(10 Pkt.)

Proben aus den Tiefen der arktischen und antarktischen Eisschilde können Aufschluss über das Klima in weit zurückliegenden Zeiten geben. Bei den Bohrungen im Projekt NEEM (**N**orth **G**reenland **E**emian **I**ce **D**rilling) wurden in Grönland Eisbohrkernproben vom zentralen Eisschild aus einer Tiefe von bis über 2500 m gewonnen. Die obersten Schichten des grönländischen Eisschildes bestehen aus so genanntem Firnschnee, der mit zunehmender Tiefe zu Eis zusammengepresst wird. Abbildung 2 zeigt die Dichte im obersten Teil des grönländischen Eisschildes als Funktion der Tiefe unterhalb der Oberfläche.

Betrachte eine Probe aus dem Eisbohrkern, die ungefähr die Form eines Zylinders mit dem Durchmesser $d = 9,8\text{ cm}$ und der Höhe $h = 2,0\text{ cm}$ besitzt. Die Masse der Probe beträgt $m_{\text{Eis}} = 119,5\text{ g}$.

- 1.a) Berechne die ungefähre Dichte der Probe und bestimme, aus welcher Tiefe des Eisschildes sie stammt.

Tatsächlich ist die Probe nicht perfekt zylinderförmig, wodurch Fehler bei der Dichtebestimmung entstehen. Eine alternative Methode zur Bestimmung der Dichte umgeht dieses Problem.

Dazu wird ein Becher mit Wasser gefüllt und auf eine Waage gestellt. Anschließend wird die Probe in den Becher gegeben, so dass sie im Wasser schwimmt. Schließlich wird die Probe mit einem spitzen Gegenstand unter Wasser gedrückt. Die von der Waage in diesen drei Situationen angezeigten Massen sind $m_1 = 726,3\text{ g}$ (Becher mit Wasser), $m_2 = 845,8\text{ g}$ (mit zusätzlicher Probe) sowie $m_3 = 873,0\text{ g}$ (mit heruntergedrückter Probe).

- 1.b) Bestimme damit einen genaueren Wert für die Dichte der Probe und die Tiefe der Probenentnahme. Mache dabei keine Annahme über die Form der Probe und verwende für die Dichte von Wasser den Wert $\rho_{\text{Wasser}} = 1000\text{ kg m}^{-3}$.

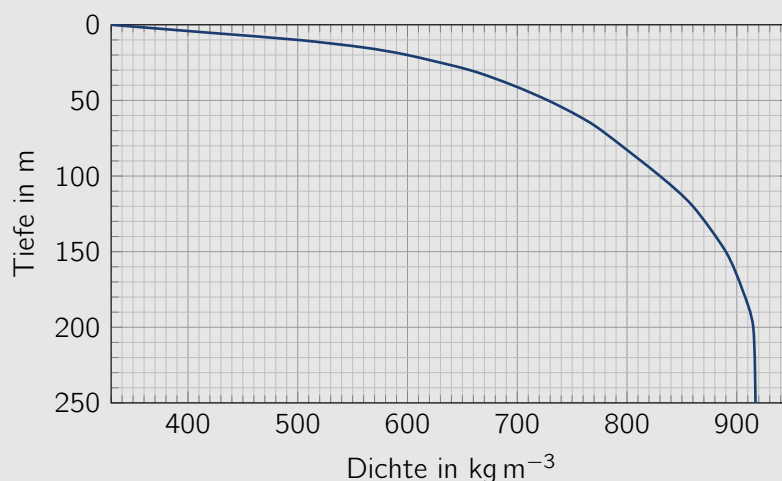


Abb. 2. Zusammenhang zwischen der Dichte des Eises an der NEEM-Bohrstelle und der Tiefe.



Abb. 1. Karte Grönlands mit Position des NEEM-Camps (Karte von Uwe Dederling, CC BY-SA 3.0).

Durch eine Untersuchung chemischer Verunreinigungen und von Isotopenverhältnissen lässt sich die Dicke der jährlich deponierten Eisschichten in dem Eisbohrkern bestimmen. Unter Druck zeigt Eis Eigenschaften einer Flüssigkeit. Daher wird das Eis in der grönländischen Eisdecke nicht nur zusammengepresst, sondern bewegt sich von dem Eisschelf auch zu den Küsten hin. Dies führt dazu, dass die jährlich deponierten Eisschichten mit zunehmender Tiefe dünner werden. Die folgende Tabelle gibt die Dicke der Eisschichten in Meter pro Jahr für den NEEM-Bohrkern an:

Tiefe	z in m	0	500	1000	1200	1400	1500	1600
Dicke pro Jahr	λ in m a^{-1}	0,25	0,20	0,13	0,10	0,037	0,018	0,010

1.c) Erstelle mit Hilfe der Daten aus der Tabelle einen Graphen, der näherungsweise das Alter t einer Eisprobe in Abhängigkeit von der Tiefe z der Probenentnahme zeigt.

1.d) Bestimme damit das Alter t_1 bzw. t_2 von zwei Eisbohrkernproben, die in Tiefen von $z_1 = 300$ m und $z_2 = 1600$ m entnommen worden sind.

Untersuchungen der Proben erlauben Rückschlüsse auf Klimaveränderungen. Ein wichtiger Indikator dafür ist die Größe $\delta^{18}\text{O}$, die das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotope ^{18}O zu ^{16}O im Eis mit einem Referenzwert vergleicht. Untersuchungen der grönländischen Eisschicht zeigen, dass es einen etwa linearen Zusammenhang zwischen dieser Größe und der Temperatur über der Eisschicht gibt, wie in Abbildung 3 zu sehen. Für die beiden untersuchten Proben betragen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte $\delta_1 = -34,5\text{‰}$ sowie $\delta_2 = -43,2\text{‰}$.

1.e) Bestimme näherungsweise die Temperaturen T_1 und T_2 , die zum Zeitpunkt der Entstehung der beiden Eisproben jeweils über der Eisschicht vorlagen und berechne den Unterschied der Temperaturen.

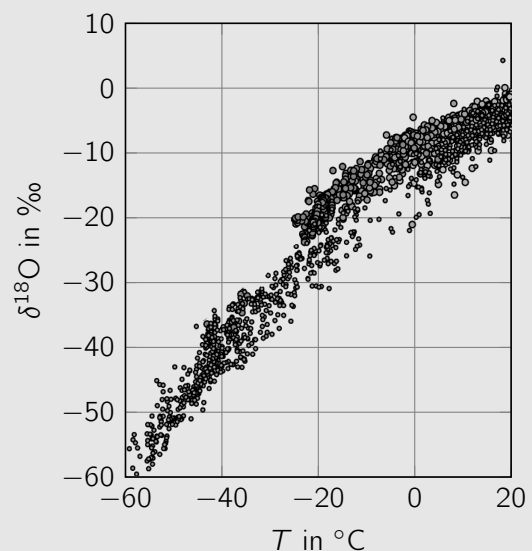


Abb. 3. Beobachteter Zusammenhang zwischen $\delta^{18}\text{O}$ in Schnee und der durchschnittlichen jährlichen Oberflächentemperatur T .

Lösung

- 1.a) Die Dichte ρ der als zylinderförmig angenommenen Probe lässt sich mit den gegebenen Werten direkt berechnen und ergibt sich zu

$$\rho = \frac{m_{\text{Eis}}}{\frac{\pi}{4} d^2 h} = \frac{4 \cdot 0,1195 \text{ kg}}{\pi \cdot (9,8 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \approx 792 \text{ kg m}^{-3}. \quad (1.1)$$

Für diese Dichte erhält man aus Abbildung 2 eine Probenentnahmetiefe

$$z \approx (78 \pm 1) \text{ m}. \quad (1.2)$$

- 1.b) Wenn nur der mit Wasser gefüllte Becher auf der Waage steht, wirkt auf die Waage dessen Gewichtskraft. Die angezeigte Masse entspricht also, bis auf einen möglichen Offset der Waage, der Masse des gefüllten Bechers.

Wird die Probe hinzugegeben, zeigt die Waage nun zusätzlich die Masse der Eisprobe mit an, so dass $m_2 = m_1 + m_{\text{Eis}} = m_1 + \tilde{\rho} V$ gilt, wobei V das Volumen der Eisprobe und $\tilde{\rho}$ dessen Dichte bezeichnen. Wir verwenden in diesem Aufgabenteil ein anderes Symbol für die Dichte als im vorigen, damit die beiden unterschieden werden können.

Um die Eisprobe schließlich unter Wasser zu drücken, muss dafür eine zusätzliche Kraft aufgebracht werden, die dafür sorgt, dass die Eisprobe im Wasser kräftefrei ist. Auf die Waage wirken in dieser Situation die Gewichtskraft des gefüllten Bechers sowie die Reaktionskraft der Auftriebskraft auf die vollständig untergetauchte Eisprobe. Daher ist $m_3 = m_1 + \rho_{\text{Wasser}} V = m_1 + m_{\text{Eis}} \frac{\rho_{\text{Wasser}}}{\tilde{\rho}}$.

Für die Differenz von m_3 und m_2 ergibt sich daraus

$$m_3 - m_2 = m_{\text{Eis}} \left(\frac{\rho_{\text{Wasser}}}{\tilde{\rho}} - 1 \right). \quad (1.3)$$

Durch Umformen folgt für die auf diesem Wege bestimmte Dichte $\tilde{\rho}$ der Eisprobe

$$\tilde{\rho} = \frac{m_{\text{Eis}} \rho_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Eis}} + m_3 - m_2} = \frac{0,1195 \text{ kg} \cdot 1000 \text{ kg m}^{-3}}{(0,1195 + 0,8730 - 0,8458) \text{ kg}} \approx 815 \text{ kg m}^{-3}. \quad (1.4)$$

Da in die Bestimmung nur Differenzen von Messungen mit der Waage eingehen, spielt ein möglicher Offset, z.B. durch nicht erfolgte Tarierung, für das Ergebnis keine Rolle.

Für die bestimmte Dichte erhält man ebenfalls aus Abbildung 2 eine Probenentnahmetiefe

$$\tilde{z} \approx (92 \pm 1) \text{ m}. \quad (1.5)$$

- 1.c) Betrachte eine Eisschicht der Dicke Δz , die so dünn ist, dass λ in der Eisschicht näherungsweise konstant ist. Dann enthält die Eisschicht Eis aus der Zeitspanne Δt mit:

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{\lambda}. \quad (1.6)$$

Der Graph für das Alter t einer Eisprobe in Abhängigkeit von der Tiefe z der Probenentnahme kann damit abschnittsweise konstruiert werden, wenn man z.B. für die einzelnen Abschnitte zwischen den gegebenen Datenpunkten einen linearen Verlauf von $1/\lambda$ annimmt. Dann ergibt

sich der Alterszuwachs in einem Abschnitt aus der Dicke des Abschnittes mal dem Mittelwert von $1/\lambda$ in dem Abschnitt. Für den ersten Abschnitt ist also

$$t(500 \text{ m}) = \frac{500 \text{ m}}{2} \left(\frac{1}{\lambda(0 \text{ m})} + \frac{1}{\lambda(500 \text{ m})} \right). \quad (1.7)$$

Für den zweiten Abschnitt ist

$$t(1000 \text{ m}) = t(500 \text{ m}) + \frac{1000 \text{ m} - 500 \text{ m}}{2} \left(\frac{1}{\lambda(500 \text{ m})} + \frac{1}{\lambda(1000 \text{ m})} \right) \quad (1.8)$$

und so weiter. In der folgende Tabelle sind neben der Tiefe z und dem Wert von λ die Werte von $1/\lambda$ sowie die entsprechend der obigen Gleichungen bestimmten Werte für das Alter $t(z)$ angegeben.

z in m	0	500	1000	1200	1400	1500	1600
λ in m a^{-1}	0,25	0,20	0,13	0,10	0,037	0,018	0,010
$1/\lambda$ in a m^{-1}	4,0	5,0	7,7	10	27	56	100
t in 10^3 a	0	2,3	5,4	7,2	10,9	15,0	22,8

Dies ergibt den folgenden Graphen:

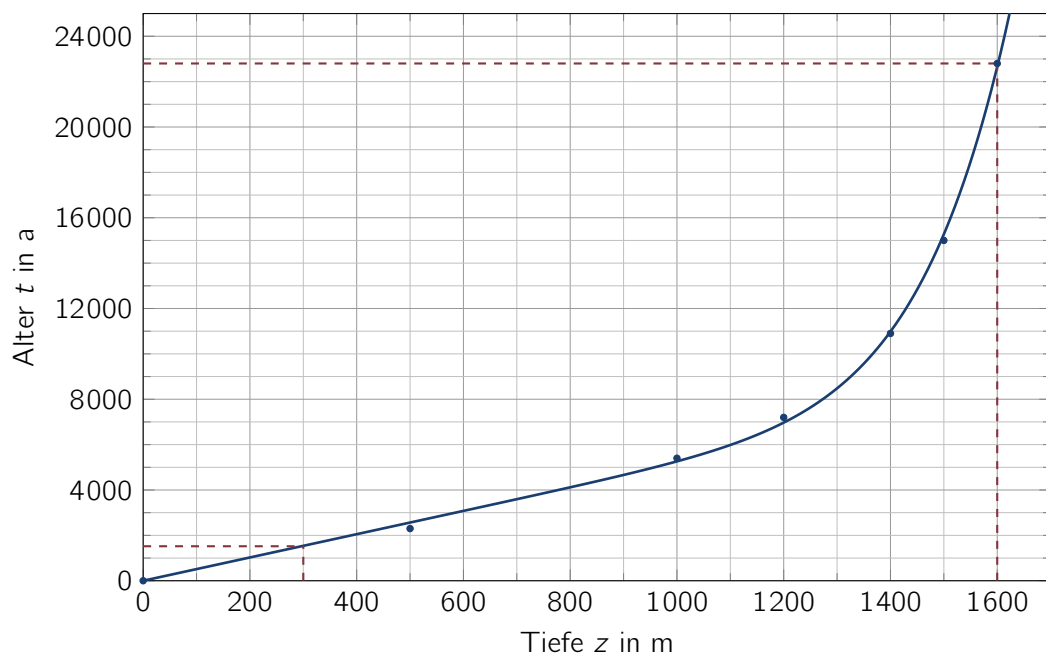


Abb. 4. Graph für das Alter t einer Eisprobe in Abhängigkeit von der Tiefe z der Probenentnahme.

1.d) Aus dem Graphen lässt sich für die beiden Tiefen das jeweilig gesuchte Alter ablesen zu

$$t_1 \approx 1500 \text{ a} \quad \text{sowie} \quad t_2 \approx 22800 \text{ a}. \quad (1.9)$$

Damit stammt die tiefer entnommene Probe aus der letzten Kaltzeit.

- 1.e) Zur Bestimmung der gesuchten Temperaturen, kann, wie nebenstehend gezeigt, eine Ausgleichsgerade durch den relevanten Teil der Daten¹ in dem $\delta^{18}\text{O}$ -Graphen gelegt werden. Damit lässt sich zu einem gegebenen Wert für $\delta^{18}\text{O}$ die durchschnittliche jährliche Oberflächentemperatur bestimmen². Für die Werte $\delta_1 = -34,5\text{‰}$ sowie $\delta_2 = -43,2\text{‰}$ ergeben sich

$$T_1 \approx -32^\circ\text{C} \quad \text{sowie} \quad T_2 \approx -43^\circ\text{C}. \quad (1.10)$$

Die Differenz der Temperaturen, die zum Zeitpunkt der Eisschichtbildung vor etwa 1500 a und 22 800 a an der Oberfläche des grönländischen Eisschildes geherrscht haben, beträgt damit etwa 11°C .

Hinweis: Die Aufgabe greift Aspekte einer Aufgabe der IPhO 2013 in Kopenhagen auf. Die Aufgabe ist unter <https://ipho2013.dk> abrufbar.

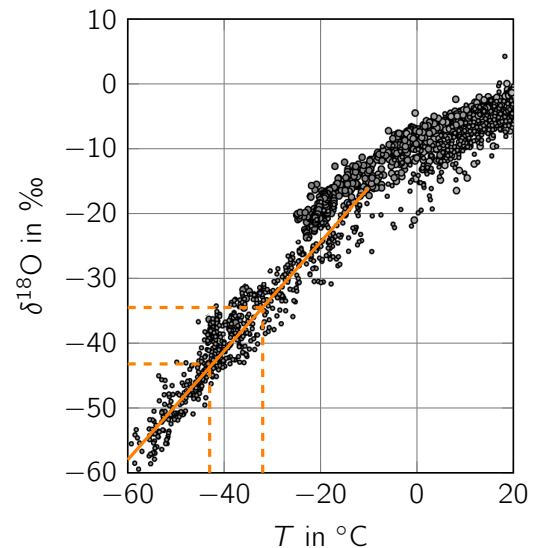


Abb. 5. Beobachteter Zusammenhang zwischen $\delta^{18}\text{O}$ in Schnee und der durchschnittlichen jährlichen Oberflächentemperatur T mit Linearisierung.

Bewertung - Eiskalt geforscht		Punkte
1.a)	Angeben eines Ausdrucks für die Dichte (1.1)	0.5
	Berechnen des Wertes der Dichte (1.1)	0.5
	Konsistentes Ablesen der Probenentnahmetiefe (1.2)	0.5
1.b)	Ausdrücken der Waagenanzeigen durch die Massen des gefüllten Bechers und der Eisprobe sowie die Dichte der Eisprobe und von Wasser	1.0
	Angeben eines Ausdrucks für die Dichte (1.4)	0.5
	Berechnen des Wertes der Dichte (1.4)	0.5
	Konsistentes Ablesen der Probenentnahmetiefe (1.5)	0.5
1.c)	Herstellen eines Zusammenhanges zwischen der Dicke und der Zeitspanne für eine Eisschicht (1.6)	0.5
	Formulieren einer Idee zur Konstruktion des Graphen	1.0
	Berechnen notwendiger Werte (z.B. als Tabelle)	1.0
	Erstellen des Graphen	1.0
1.d)	Ablesen und Angeben des jeweiligen Alters	1.0
1.e)	Ablesen und Angeben der Temperaturen (z.B. mit Ausgleichsgerade)	1.0
	Bestimmen der Temperaturdifferenz	0.5
		10.0

Hinweis: Die von den Teilnehmenden in den letzten drei Aufgabenteilen ermittelten Werte können von den Werten in dieser Musterlösung abweichen. Dies sollte, sofern ein physikalisch sinnvolles Vorgehen gewählt und eine passende Auswertung durchgeführt wurde, nicht zu Punktabzug führen.

²Die Daten wurden der Arbeit Roche, D. M. & Caley, T. (2013). $\delta^{18}\text{O}$ water isotope in the iLOVECLIM model (version 1.0) – Part 2: Evaluation of model results against observed $\delta^{18}\text{O}$ in water samples. *Geosci. Model Dev.*, **50** entnommen. Allgemeine Informationen zur Methode finden sich z.B. auf Wikipedia und dem dort verlinkten Artikel.

Aufgabe 2 Stark beschleunigt

(10 Pkt.)

Bestimme die Beträge der Beschleunigungen a_1 bis a_4 und gib sie als Vielfaches der Schwerebeschleunigung $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ auf der Erdoberfläche an.

- a_1 Die Beschleunigung eines Tennisballs einer Masse von 57,0 g, der beim Aufschlag über eine Strecke von 40 cm gleichmäßig auf eine Geschwindigkeit von 150 km h^{-1} beschleunigt wird.
- a_2 Die Beschleunigung einer nassen Socke in einer Waschmaschinentrommel mit einem Durchmesser von 50 cm im Schleudergang bei 1400 Umdrehungen pro Minute.
- a_3 Die Beschleunigung, die ein Elektron zwischen den 10 cm voneinander entfernten Platten eines Kondensators erfährt, zwischen dessen Platten eine Spannung von 1,0 V anliegt.
- a_4 Die durch die Sonne verursachte Schwerebeschleunigung $1,0 \cdot 10^5 \text{ km}$ oberhalb der Photosphäre.

Lösung

Beschleunigung a_1

In der Zeit t legt der gleichförmig beschleunigte Tennisball die Strecke $s = \frac{1}{2} a_1 t^2 = 40 \text{ cm}$ zurück und erreicht dabei die Geschwindigkeit $v = a_1 t = 150 \text{ km h}^{-1}$. Eliminieren der Zeit aus den beiden Gleichungen und Umformen ergibt für die Beschleunigung:

$$a_1 = \frac{v^2}{2s} = \frac{\left(\frac{150}{3,6} \text{ m s}^{-1}\right)^2}{0,80 \text{ m}} \approx 2,2 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-2} \approx 220 \cdot g. \quad (2.1)$$

Alternativ lässt sich die Beschleunigung auch über einen Energieansatz berechnen: Der Tennisball besitzt direkt nach der Beschleunigung eine kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$, wobei m die Masse des Balls und v die Aufschlaggeschwindigkeit angeben. Diese kinetische Energie folgt aus der Wirkung einer Kraft F , die den Ball über eine Strecke von $s = 40 \text{ cm}$ gleichmäßig beschleunigt. Es gilt also $E_{\text{kin}} = F s$. Mit $F = m a_1$ ergibt sich daraus die gleiche Beschleunigung.

Beschleunigung a_2

Die auf die Socke in der Wäschetrommel wirkende Zentripetalbeschleunigung ist mit den gegebenen Zahlenwerten gleich

$$a_2 = \omega^2 r = 4 \pi^2 \left(\frac{1400}{60 \text{ s}}\right)^2 \frac{0,50 \text{ m}}{2} \approx 5,4 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-2} \approx 550 \cdot g. \quad (2.2)$$

Beschleunigung a_3

Das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten beträgt $E = U/d$, wobei U die Spannung zwischen den Platten und d den Abstand der Kondensatorplatten bezeichnen. Die Kraft auf das Elektron der Ladung e in dem elektrischen Feld beträgt dann $F = e E$. Bezeichne außerdem mit m_e die Masse des Elektrons. Dann gilt für dessen Beschleunigung

$$a_3 = \frac{F}{m_e} = \frac{U e}{d m_e} \approx \frac{1,0 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{0,10 \text{ m} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \approx 1,8 \cdot 10^{12} \text{ m s}^{-2} \approx 1,8 \cdot 10^{11} \cdot g. \quad (2.3)$$

Beschleunigung a_4

Die Photosphäre der Sonne ist die gut abgegrenzte, als Oberfläche sichtbare Schicht der Sonne, die eine Kugel mit einem Radius von etwa $6,9 \cdot 10^5$ km bildet (s. z.B. LEIFIPhysik). Die durch die Sonne mit Masse $M = 2,0 \cdot 10^{30}$ kg hervorgerufene Schwerebeschleunigung beträgt in einem Abstand $r = (6,9 + 1,0) \cdot 10^5$ km nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz

$$a_4 = G \frac{M}{r^2} \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \frac{2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{(7,9 \cdot 10^8 \text{ m})^2} \approx 2,1 \cdot 10^2 \text{ m s}^{-2} \approx 22 \cdot g . \quad (2.4)$$

Bewertung - Stark beschleunigt		Punkte
2	Verwenden eines passenden Ansatzes (kinematisch oder über die Energie)	1.0
	Angeben eines Ausdrucks für die Beschleunigung a_1 (2.1)	0.5
	Bestimmen des Wertes von a_1 und Ausdrücken als Vielfaches von g (2.1)	1.0
	Verwenden der Zentripetalbeschleunigung	1.0
	Angeben eines Ausdrucks für die Beschleunigung a_2 (2.2)	0.5
	Bestimmen des Wertes von a_2 und Ausdrücken als Vielfaches von g (2.2)	1.0
	Verwenden der Kraft auf eine Ladung im elektrischen Feld	1.0
	Angeben eines Ausdrucks für die Beschleunigung a_3 (2.3)	0.5
	Bestimmen des Wertes von a_3 und Ausdrücken als Vielfaches von g (2.3)	1.0
	Verwenden der Gravitationskraft	1.0
	Angeben eines Ausdrucks für die Beschleunigung a_4 (2.4)	0.5
	Bestimmen des Wertes von a_4 und Ausdrücken als Vielfaches von g (2.4)	1.0
		10.0

Aufgabe 3 Gut geladen

(10 Pkt.)

In einem Kasten in der Physiksammlung findest du eine Batterie mit der Spannung U , Kabel sowie zwei gleiche Kondensatoren der Kapazität C .

Finde eine Möglichkeit, mit diesen Bauteilen eine möglichst hohe Spannung zu erreichen. Beschreibe, wie du dafür vorgehen musst und bestimme den Wert der so erreichbaren Spannung.

Hinweis: Es ist möglich, Spannungswerte größer als $3U$ zu erreichen.

Lösung

Mit der Batterie können zunächst beide Kondensatoren einzeln auf die Spannung U aufgeladen werden. Die Ladung einer Kondensatorplatte ist dann vom Betrag her $Q = CU$.

Anschließend können die Kondensatoren, wie nebenstehend abgebildet, mit der Batterie in Reihe geschaltet werden. Dabei wirkt der linke Kondensator wie eine zusätzliche Ladungsquelle, die zum weiteren Aufladen des rechten Kondensators mit entgegengesetzter Polung führt. Bei diesem Vorgang findet eine Ladungsumverteilung zwischen den Kondensatoren statt.

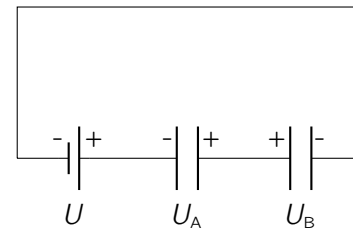


Abb. 6. Schaltung der Batterie und der Kondensatoren.

Bezeichne mit U_A und U_B die Beträge der über den Kondensatoren abfallenden Spannungen nach der Ladungsumverteilung. Die Summe der Spannungen in dem Stromkreis müssen sich nach der Maschenregel zu Null addieren. Daher gilt

$$U + U_A - U_B = 0. \quad (3.1)$$

Für die Ladungen Q_A und Q_B der Kondensatoren nach dem Umladen gilt aufgrund der Ladungserhaltung auf den beiden verbundenen Kondensatorplatten außerdem

$$Q_A + Q_B = C(U_A + U_B) = 2Q = 2CU, \quad \text{so dass} \quad 2U - U_A - U_B = 0. \quad (3.2)$$

Addieren bzw. Subtrahieren der Spannungsgleichungen in (3.1) und (3.2) ergibt für die Kondensatorspannungen

$$U_B = \frac{3}{2}U \quad \text{und} \quad U_A = \frac{1}{2}U. \quad (3.3)$$

Nun kann der Kondensator mit der niedrigeren Spannung erneut über die Batterie auf die Spannung U aufgeladen und das Vorgehen wiederholt werden. Dabei ist es unerheblich, welcher der beiden Kondensatoren an welcher Position in obiger Schaltung verbaut wird. Nach dem ersten Durchgang ändert sich in der Gleichung (3.2) der Wert der ursprünglichen Gesamtspannung der Kondensatoren von $2U$ auf $\frac{5}{2}U$. Es ergibt sich nach erneutem Umverteilen eine Kondensatorspannung im rechten Kondensator von $U_B = \frac{7}{4}U$. Die Spannung über dem anderen Kondensator ist nicht relevant, da dieser im nächsten Schritt wieder über die Batterie aufgeladen wird.

Dieses Vorgehen kann man wiederholen, so lange die Spannung des rechten Kondensators kleiner als $2U$ ist, da dann durch das Zusammenschalten eine Ladungsumverteilung stattfindet. Wenn $U_B = 2U$ ist, ist ein weiteres Aufladen durch Ladungsumverteilung nicht mehr möglich, da die Summe der Spannungen der Batterie und des direkt mit der Batterie aufgeladenen Kondensators ebenfalls $2U$ beträgt.

Schaltet man nun die Batterie und die beiden Kondensatoren mit gleicher Polung in Reihe, ergibt sich die maximal zu erreichende Spannung zu

$$U_{\max} = 4U. \quad (3.4)$$

Eine höhere Spannung zu erreichen, ist (zumindest ohne Zerstörung der Bauelemente) nicht möglich.

Bemerkung: Es lässt sich auch formal beweisen, dass durch wiederholtes Umladen eine Spannung beliebig nahe an $U_B = 2U$ zu erreichen ist. Bezeichne mit $U_B(n)$ die Spannung des aufgeladenen Kondensators nach dem n -ten Umladevorgang mit $n \in \mathbb{N}_0$. Es gilt $U(0) = U$ und mit Hilfe von (3.1) sowie (3.2) ergibt sich $U_B(n) = U + \frac{1}{2} U_B(n-1)$. Mit Hilfe einer vollständigen Induktion kann man zeigen, dass die Spannung des rechten Kondensators nach der n -ten Durchführung des beschriebenen Prozesses $U_B(n) = (2 - 1/2^n) U$ beträgt. Daraus ergibt sich die Behauptung für große Werte von n .

Hinweis: Diese Aufgabe wurde in ähnlicher Form vor vielen Jahren, genauer im Auswahlwettbewerb zur IPhO 1987, schon einmal in der 2. Runde gestellt.

Bewertung - Gut geladen		Punkte
3	Verwenden der Idee, Kondensatoren aufzuladen und gegenpolig mit der Batterie zu verschalten, um Spannungen durch Ladungsumverteilung zu erhöhen	2.0
	Nutzen der Maschenregel (3.1)	1.0
	Verwenden der Ladungserhaltung (3.2)	1.0
	Angaben der Kondensatorspannung U_B nach Ladungsumverteilung (3.3)	1.0
	Betrachten des iterierten Vorgehens	1.0
	Erkennen, dass ein Kondensator auf maximal $2U$ aufgeladen werden kann	2.0
	Angaben der finalen Schaltung der Kondensatoren mit der Batterie	1.0
	Bestimmen der maximal erreichbaren Spannung zu $4U$ (3.4)	1.0
		10.0

Hinweise zur Bewertung:

- Der Punkt für den letzten Bewertungsaspekt sollte nur gegeben werden, wenn tatsächlich $4U$ als maximal erreichbare Spannung bestimmt wurde.
- Für Vorgehen, die zu einer niedrigeren Spannung führen, sollten für das Verwenden einer physikalisch sinnvollen Idee (1. Bewertungsaspekt) sowie für das Erkennen, dass ein Kondensator auf maximal $2U$ aufgeladen werden kann (6. Bewertungsaspekt) jeweils maximal 1 Punkt gegeben werden. Insgesamt können so maximal 7 Punkte auf die gesamte Aufgabe erreicht werden.
- In dem speziellen Fall, dass als Ergebnis $3U$ aus der Reihenschaltung der geladenen Kondensatoren mit der Batterie angegeben wird, sollten nur die Punkte für die Bewertungsaspekte 1 (1 Pkt.), 2 (1 Pkt.) sowie 7 (1 Pkt.), insgesamt also nur 3 Punkte vergeben werden, da dieses Vorgehen trivial ist.

Aufgabe 4 Hoch geflogen

(10 Pkt.)

Nicht bis zum Mond aber immerhin ein gutes Stück bis zur Zimmerdecke kann eine Kugelschreibermine fliegen.

Schraube dazu einen Kugelschreiber mit einer Großraummine auf und drücke die Mine so weit wie möglich gegen die Feder in den Kugelschreiber. Wenn du die Mine dann loslässt, schießt sie aus dem aufgeschraubten Kugelschreiber heraus.

Je nach Bauart des Kugelschreibers kann es dazu sinnvoll sein, die Feder in den oberen Teil des Kugelschreibers zu platzieren und ggf. mit etwas Klebeband zu fixieren, damit sie nicht mit wegfliegt.

- 4.a) Miss mit einem Lineal, um welche Strecke die Feder vor dem Start zusammengedrückt wird.
- 4.b) Bestimme mit Hilfe einer geeigneten Messmethode die maximale Steighöhe der Mine im Flug.
- 4.c) Bestimme mit Hilfe deiner Messwerte die Geschwindigkeit der Mine beim Start.
- 4.d) Miss die Masse des Lineals mit einer Waage. Bestimme nur mit Hilfe des Lineals und des Kugelschreibers die Masse der Mine.
- 4.e) Berechne die Federkonstante der Feder in dem Kugelschreiber und die maximale „Schubkraft“ auf die Mine.



Abb. 7. Kugelschreiberrakete vor dem Start.

Lösung

Für die Versuche sollte ein Kugelschreiber gewählt werden, bei dem die Mine einigermaßen gut geführt in den Kugelschreiberteil mit der Feder passt. Ein zu weiter oder zu kurzer Teil führt schnell zu stark variierenden Flugbahnen. Der Teil, in dem die Feder steckt, sollte auch nicht zu lang sein, um ein vollständiges Zusammendrücken der Feder zu ermöglichen.

Die hier dargestellten Messergebnisse können außerdem deutlich von den Ergebnissen mit anderen Kugelschreibern abweichen und sollten daher als Beispielwerte betrachtet werden.

- 4.a) Die Feder wird in den unteren Teil des aufgeschraubten Kugelschreibers geschoben, so dass die Feder maximal zusammengedrückt wird. Mit einem Lineal wird die Strecke, um die die Feder gestaucht wird, gemessen zu

$$\Delta y = (14,0 \pm 0,5) \text{ mm} . \quad (4.1)$$

- 4.b) Zur Messung der Steighöhe wird an einer Wand eine senkrechte Längenskala angebracht. Der aufgeschraubte Kugelschreiber wird nah an der Wand so positioniert, dass sich die Oberkante der Mine im nicht zusammengedrückten Zustand auf Höhe des Nullpunktes der Skala befindet. Nun wird die Kugelschreibermine heruntergedrückt und mehrfach, möglichst senkrecht nach oben geschossen. Die erreichte Höhe der Oberkante der Mine wird während des Fluges an der Skala abgelesen. Die Steighöhe H der Mine entspricht dann direkt dem abgelesenen Messwert³. In mehreren Versuchen wurden die folgenden Steighöhen gemessen:

³Der Nullpunkt der Skala kann natürlich auch anders gewählt werden. Wichtig ist, dass die Steighöhe relativ zur Höhe der entspannten Mine bestimmt wird.

Tabelle 1. Messwerte der Steighöhen H der Mine.

Versuch Nr.	1	2	3	4	5
H in cm	120	110	115	105	110

Als Mittelwert ergibt sich daraus für die Steighöhe

$$H = (112 \pm 4) \text{ cm} . \quad (4.2)$$

Die Unsicherheit des Mittelwertes wurde dabei als maximale Abweichung der Einzelmessung vom Mittelwert geteilt durch die Wurzel der Anzahl der Messwerte zu $\Delta H = 4 \text{ cm}$ abgeschätzt.

Die Bestimmung der Steighöhe kann auch auf alternativen Wegen, z.B. durch die Analyse von Videoaufzeichnungen, erfolgen.

- 4.c) Die Kugelschreibermine besitzt direkt nach der vollständigen Entspannung der Feder ihre maximale Geschwindigkeit v . Wenn Luftreibung vernachlässigt wird, wird die damit verbundene kinetische Energie bis zum Erreichen der Steighöhe H vollständig in potentielle Energie umgewandelt, so dass sich mit der Masse m der Mine der folgende Energieerhaltungssatz formulieren lässt:

$$\frac{1}{2} m v^2 = m g H \quad \text{und damit} \quad v = \sqrt{2 g H} = (4,69 \pm 0,08) \text{ m s}^{-1} . \quad (4.3)$$

Dabei wurde $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ für die Schwerebeschleunigung auf der Erde verwendet und die Unsicherheit anhand der Unsicherheit der Steighöhe abgeschätzt.

- 4.d) Die Masse m_{Lineal} des Lineals lässt sich mit Hilfe einer (Brief-)Waage bestimmen zu

$$m_{\text{Lineal}} = (28,0 \pm 1,0) \text{ g} . \quad (4.4)$$

Um die Masse der Kugelschreibermine zu bestimmen, kann man das auf der Kugelschreiberhülse balancierte Lineal, wie in Abbildung 8 zu sehen, als Balkenwaage verwenden.



Abb. 8. Nutzung des auf der Kugelschreiberhülse balancierten Lineals als Balkenwaage.

Das Lineal ist an jeder Seite 0,50 cm länger als die aufgedruckte 30 cm-Skala und besitzt damit eine Länge von $L = 31,00 \text{ cm}$. Ohne Belastung ist das Lineal im horizontalen Gleichgewicht, wenn es mittig, also bei der Markierung $(15,00 \pm 0,05) \text{ cm}$ auf der Skala, balanciert wird. Die Massenverteilung im Lineal kann daher und aufgrund der Form als homogen entlang der Länge angesehen werden.

Wird nun die Mine in das Loch des Lineals gesteckt, so wandert der Gleichgewichtsauflagepunkt in Richtung der Mine zu dem Skalenwert $(14,20 \pm 0,05) \text{ cm}$. Im Gleichgewicht gleichen sich die

wirkenden Drehmomente bezüglich des Auflagepunktes gerade aus. Die Summe der Produkte aus Gewichtskräften und Hebelarmen muss also auf beiden Seiten des Auflagepunktes gleich sein. Dabei greifen die auf die Linealteile links und rechts des Auflagepunktes wirkenden Gewichtskräfte jeweils im Schwerpunkt des jeweiligen Linealteils an. Dieser befindet sich jeweils in deren Mitte. Abbildung 9 zeigt die wirkenden Gewichtskräfte und die Positionen ihrer Angriffspunkte.

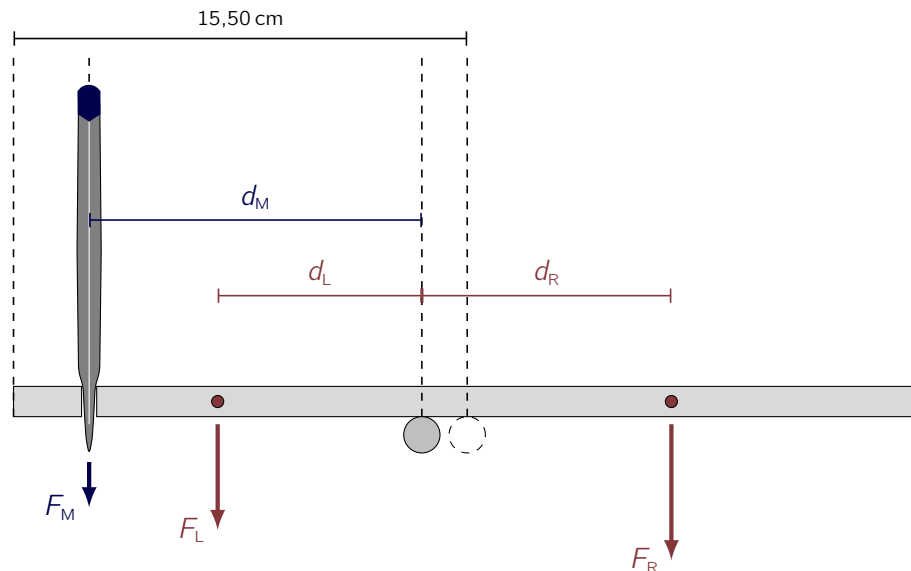


Abb. 9. Drehmomentengleichgewicht am balancierten Lineal mit Mine. Der gestrichelte Kreis markiert den Gleichgewichtsauflagepunkt für das unbelastete Lineal in der Linealmitte.

Das als sehr klein angenommene Loch im Lineal ist bei dem Skalenwert 3,50 cm positioniert. Damit ergeben sich aus dem verschobenen Auflagepunkt die einzelnen Hebelarme zu

$$\begin{aligned} d_M &= 14,20 \text{ cm} - 3,50 \text{ cm} = (10,70 \pm 0,10) \text{ cm} , \\ d_L &= \frac{15,50 \text{ cm} - 0,80 \text{ cm}}{2} = (7,35 \pm 0,05) \text{ cm} , \\ d_R &= \frac{15,50 \text{ cm} + 0,80 \text{ cm}}{2} = (8,15 \pm 0,05) \text{ cm} . \end{aligned} \quad (4.5)$$

Die links- und rechtsseitigen Massenanteile des Lineals sind proportional zu den Längen der jeweiligen Linealseite und betragen damit

$$m_L = m_{\text{Lineal}} \frac{2 d_L}{L} = (13,3 \pm 0,6) \text{ g} , \quad m_R = m_{\text{Lineal}} \frac{2 d_R}{L} = (14,7 \pm 0,6) \text{ g} . \quad (4.6)$$

Die Drehmomentengleichung für das Gleichgewicht lautet:

$$F_M d_M + F_L d_L = F_R d_R . \quad (4.7)$$

Mit $F_M = m g$ und analogen Ausdrücken für die Gewichtskraft der Linealteile ergibt sich daraus die gesuchte Masse m der Mine zu

$$m = \frac{1}{d_M} (m_R d_R - m_L d_L) = \frac{2 m_{\text{Lineal}}}{L d_M} (d_R^2 - d_L^2) = (2,1 \pm 0,4) \text{ g} . \quad (4.8)$$

- 4.e) Mit Hilfe der Masse m der Mine lässt sich die Federkonstante k der Feder in dem Kugelschreiber erneut mit Hilfe eines Energiesatzes bestimmen. Wenn davon ausgegangen wird, dass keine

Energie verloren geht und die Feder nach dem Entspannen in Ruhe ist, muss die anfängliche Spannenergie der Feder vollständig in kinetische und potentielle Energie der Mine umgesetzt werden. Die kinetische Energie wiederum wird im Flug in potentielle Energie bis zum Erreichen der maximalen Steighöhe umgesetzt. Insgesamt ergibt sich so die Energiebilanz

$$\frac{1}{2} k \Delta y^2 + m g \Delta y = \frac{1}{2} m v^2 = m g H \quad (4.9)$$

und daraus für die Federkonstante

$$k = \frac{2 g m (H + \Delta y)}{\Delta y^2} = (2,4 \pm 0,8) \text{ N cm}^{-1} . \quad (4.10)$$

Der Beitrag der Höhendifferenz Δy zur potentiellen Energie kann dabei auch vernachlässigt werden.

Die maximale Schubkraft $F_{\max}$ auf die Kugelschreiberrakete ergibt sich schließlich aus der Federkonstanten nach dem Hookeschen Gesetz zu

$$F_{\max} = k \Delta y = (3,4 \pm 1,2) \text{ N} . \quad (4.11)$$

Bewertung - Hoch geflogen		Punkte
4.a)	Angeben eines plausiblen Messwertes für die Stauchung (4.1)	0.5
4.b)	Beschreiben eines geeigneten Aufbaus und der Durchführung des Versuches	1.0
	Angeben von Messwerten inkl. Messwiederholung (mind. 3 Messungen)	1.0
	Angeben eines plausiblen Mittelwertes für die Steighöhe (4.2)	0.5
4.c)	Verwenden eines Energiesatzes mit korrekten Ausdrücken für die Energien (4.3) oder eines alternativen zielführenden Ansatzes	1.0
	Berechnen der anfänglichen Geschwindigkeit (4.3)	0.5
4.d)	Angeben eines plausiblen Messwertes für die Linealmasse (4.4)	0.5
	Beschreiben eines geeigneten Aufbaus und der Durchführung des Versuches	1.0
	Herleiten eines Ausdrucks zur Bestimmung der Minenmasse (4.8)	1.0
	Angeben von geeigneten Messwerten	0.5
	Berechnen eines plausiblen Wertes für die Minenmasse (4.8)	0.5
4.e)	Verwenden eines Energiesatzes mit korrekten Ausdrücken für die Energien (4.9)	1.0
	Berechnen der Federkonstante (4.10)	0.5
	Berechnen der maximalen Schubkraft (4.11)	0.5
		10.0

Hinweis: Es wird von den Teilnehmenden keine Betrachtung der Unsicherheiten erwartet. Diese sollen hier der Veranschaulichung von deren Größenordnungen dienen.

Aufgabe 5 Junioraufgabe - Sicher fahren

(10 Pkt.)

Eine Faustformel für den Sicherheitsabstand im Straßenverkehr lautet

„Abstand in Metern gleich halber Tachowert“.

Dabei wird angenommen, dass der Tachowert in Kilometern pro Stunde angezeigt wird. Betrachte eine von Autos viel befahrene einspurige Landstraße, in der sich alle Fahrerinnen und Fahrer an diese Regel halten.

5.a) Schätze ab, wie viele Autos einen bestimmten Punkt der Straße in einer Stunde maximal passieren können. Berücksichtige dabei, dass ein Auto eine Länge besitzt.

Wenn nun eines der Autos plötzlich abbremst, müssen auch die nachfolgenden ihre Geschwindigkeit verringern. Dabei bremsen Fahrerinnen und Fahrer ihr Auto oftmals stärker ab, als das direkt vorausfahrende Fahrzeug. Nimm an, dass ein Auto seine Geschwindigkeit plötzlich von $v = 100 \text{ km h}^{-1}$ um $\Delta v = 30 \text{ km h}^{-1}$ verringert und dass die nachfolgenden Autos jeweils so abbremsten, dass ihre Geschwindigkeitsänderung 20 % größer ist als die Geschwindigkeitsänderung des direkt vorausfahrenden Autos.

5.b) Zeige, dass auf diese Weise der Verkehr gänzlich zum Erliegen kommen kann und gib an, welches Auto hinter dem zuerst bremsenden als erstes zum Stehen kommt.

Lösung

5.a) Bezeichne mit ℓ die für alle Autos gleich angenommene Länge eines Fahrzeugs und mit v deren Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit muss für alle Autos ebenfalls die gleiche sein, da sich ansonsten die Abstände zwischen den Fahrzeugen ständig verändern würden.

Nach der Faustregel gilt dann für den Abstand d zwischen zwei Autos:

$$d = \frac{v}{2} \frac{\text{m}}{\text{km h}^{-1}} =: \frac{v}{2k}, \quad (5.1)$$

mit $k = \frac{\text{km h}^{-1}}{\text{m}} = 1000 \text{ h}^{-1} = \frac{1}{3,6\text{s}}$. Jedes Auto nimmt damit eine Länge $d + \ell$ der Straße ein.

In der Zeit $T = 1 \text{ h}$ passieren alle Fahrzeuge einen bestimmten Punkt der Landstraße, die sich auf einem Abschnitt der Länge vT der Landstraße befinden. Damit ergibt sich für die in dieser Zeit an der Stelle vorbeifahrende Zahl an Autos

$$N = \frac{vT}{d + \ell} = \frac{vT}{\frac{v}{2k} + \ell} = \frac{2kT}{1 + \frac{2k\ell}{v}} = \frac{2000}{1 + \frac{2k\ell}{v}} \leq 2000. \quad (5.2)$$

Je größer die Geschwindigkeit v gegenüber der Fahrzeuglänge ℓ ist, desto größer ist die Zahl an vorbeifahrenden Autos. Für $v \gg k\ell$ können maximal 2000 Fahrzeuge pro Stunde die Stelle an der Straße passieren. Bei einer für Landstraßen typischen Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km h^{-1} und damit einem Abstand d von 50 m sowie einer Fahrzeuglänge von $\ell = 5,0 \text{ m}$ ergibt sich die Zahl N eher zu 1800.

Hinweis: Das Ergebnis (5.2) lässt sich mittels (5.1) auch in Abhängigkeit von dem Abstand d an Stelle der Geschwindigkeit v angeben. Dies ergibt den äquivalenten Ausdruck

$$N = \frac{2kdT}{d + \ell} = 2000 \cdot \frac{d}{d + \ell} \leq 2000. \quad (5.3)$$

- 5.b) Die Geschwindigkeit v_n , auf die das n -te Auto hinter dem zuerst abbremsenden abbremst, beträgt mit $p := 1,2$

$$v_n = v - p^n \Delta v \quad (5.4)$$

Daraus ergeben sich die folgenden Geschwindigkeiten, auf die die nachfolgenden Autos abbrem-
sen:

$$\begin{aligned} v_1 &= 64 \text{ km h}^{-1}, & v_2 &= 57 \text{ km h}^{-1}, & v_3 &= 48 \text{ km h}^{-1}, & v_4 &= 38 \text{ km h}^{-1}, \\ v_5 &= 25 \text{ km h}^{-1}, & v_6 &= 10 \text{ km h}^{-1}, & v_7 &< 0. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Das siebte Auto hinter dem zuerst abbremsenden würde nach diesem einfachen Modell also vollständig zum Stehen kommen.

Hinweis: Die Idee zu der Aufgabe stammt von Bastian Hacker, einem ehemaligen Teilnehmer der PhysikOlympiade in Deutschland.

Bewertung - Junioraufgabe - Sicher fahren		Punkte
5.a)	Umsetzen der Abstandsregel in einen zielführenden Ansatz (z.B. mathematische Formulierung, Skizze)	2.0
	Verwenden eines passenden Wertes für die Geschwindigkeit	1.0
	Verwenden eines passenden Wertes für die Autolänge	1.0
	Abschätzen eines realistischen numerischen Wertes	2.0
5.b)	Angaben der Geschwindigkeit des n -ten Autos	2.0
	Bestimmen des Autos, das als erstes zum Stehen kommt	2.0
		10.0

Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 56. IPhO 2026

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

**Von der korrigierenden Lehrkraft auszufüllen und bis spätestens zum
26. September 2025 zusammen mit der korrigierten Bearbeitung der Aufgaben
an die/den zuständige(n) Landesbeauftragte(n) zu schicken.**

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

Schüler*in (Code): _____ (_____)

Schule, Ort: _____

Lehrkraft (Code): _____ (_____)

Aufgabe	Maximalpunktzahl	Erreichte Punktzahl
1 Eiskalt geforscht	10	
2 Stark beschleunigt	10	
3 Gut geladen	10	
4 Hoch geflogen	10	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

5 Junioraufgabe - Sicher fahren	10	
	40 (+10)	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: _____