

57. Internationale PhysikOlympiade Riad, Saudi-Arabien 2027



Wettbewerbsleitung der PhysikOlympiade

Dr. Stefan Petersen Dürken Quaas
Tel.: 0431 880-5120 Tel.: 0431 880-5387
email: ipho@scienceolympiaden.de
Anschrift: PhysikOlympiade am IPN
 Olshausenstraße 62, 24118 Kiel
web: www.scienceolympiaden.de/ipho

Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde im Auswahlwettbewerb zur 57. IPhO 2027

PhysikOlympiade am IPN, CC BY 4.0

Nur für betreuende Lehrkräfte. Nicht vor Oktober 2026 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 **07. September 2026** 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 **25. September 2026** 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 bitte 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 2026 für die PhysikOlympiade 2027 **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 aktuelle Version der 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 **07. September 2026** 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. **Folgefehler** werden in der Regel nicht bestraft. Die Verwendung eines falschen Zwischenergebnisses sollte, sofern sich dadurch keine starke Vereinfachung des Problems ergibt, also bei folgenden Fragen nicht zu Punktabzug führen. Dies bedeutet insbesondere, dass ein numerisches Ergebnis auch dann als korrekt gewertet werden sollte, wenn vorher eine falsche Formel abgeleitet, aber korrekt mit dieser Formel weiter gerechnet wurde. Wenn bei einem Ergebnis jedoch die angegebene Einheit oder die Größenordnung des Ergebnisses erkennbar falsch ist, sollte dies zu Punktabzug führen.

- 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 2026/2027 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. Navigieren Sie dann zu „Wettbewerbe“ → „alle Wettbewerbe“ und klicken Sie bei der IPhO 2027 den Button „Runden“ sowie schließlich den Button „Bewertung ansehen“ bei der 1. Runde. Einen Leitfaden zur Bewertungseingabe finden Sie im „Fragen und Antworten“-Bereich auf unserer Webseite.
- In der Tabelle können Sie die **Ergebnisse** der von Ihnen betreuten Teilnehmenden **eintragen** und auch die korrigierte Bearbeitung inkl. Bewertungsbogen in jeweils einer pdf-Datei pro Schüler*in hochladen. Evtl. müssen Sie in der angezeigten Tabelle nach rechts scrollen. Bitte teilen Sie uns durch Setzen eines Häkchens in der Spalte „Nicht Teilgenommen“ auch mit, wenn Betreute keine Bearbeitung eingereicht haben.
- 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. Sie können auch die Bewertungen einzelner Teilnehmender über den Button „Bewertung abschließen“ in der jeweiligen Zeile finalisieren. So können Sie ebenfalls alle Einzelbewertungen freigeben. Der Button „Alle Bewertungen abschließen“ wird dann automatisch inaktiv.
- In der Tabelle zur Ergebniseingabe können Sie auch danach **jederzeit prüfen, ob alle Ergebnisse korrekt hinterlegt sind**.
- Schließen Sie bitte alle Bewertungen bis spätestens zum **Stichtag am 25. September 2026** ab. Laden Sie bis dahin auch die bewerteten Arbeiten zusammen mit den Bewertungsbögen in jeweils einer pdf-Datei pro Schüler*in online im Onlineportal hoch oder schicken diese per Post an Ihre(n) Landesbeauftragte(n). Kontaktinformationen zu den Landesbeauftragten finden Sie unter www.ipho.info.
- Alle Teilnehmenden der 1. Runde sowie ihre betreuenden Lehrkräfte erhalten im Oktober 2026 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 Abgehoben

(10.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Fabian Bühler)

Alle einsteigen, *Cleared for take-off* und dann geht es auch schon los. Im Diagramm^a sind die mit der App „phyphox“ während eines Flugzeugstarts aufgenommenen und anschließend geglätteten Messwerte der drei Beschleunigungssensoren in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Das Flugzeug ist dabei aus dem Stehen losgerollt und das Smartphone lag auf einem Sitz.

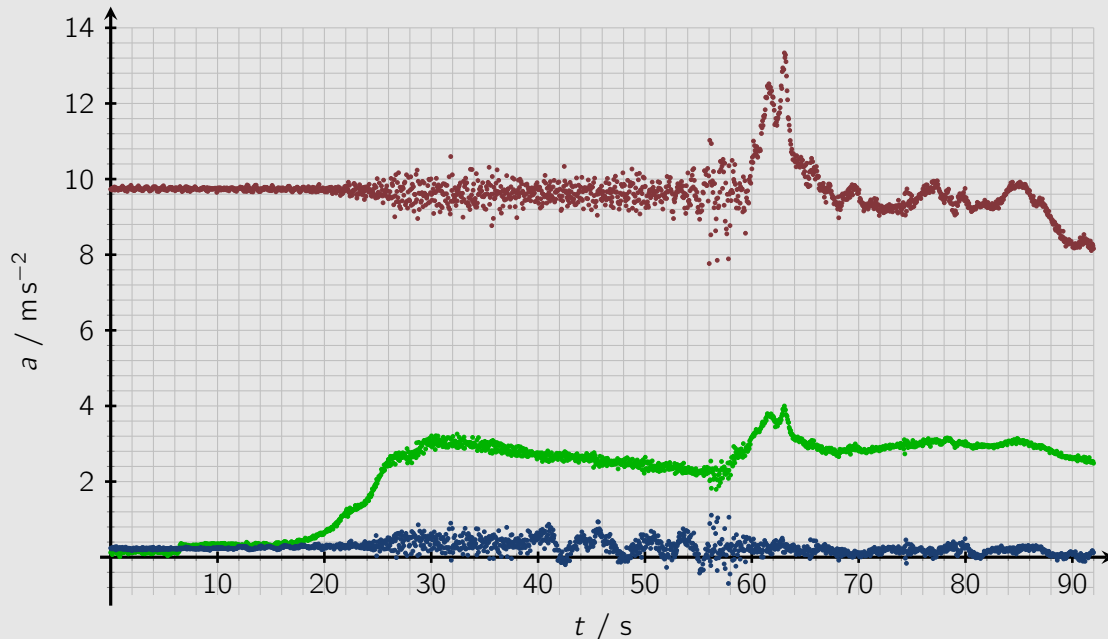


Abb. 1. Graphen der für die drei Achsen der Sensoren gemessenen Beschleunigungen a beim Startvorgang in Abhängigkeit von der Zeit t .

- 1.a) Gib an, welcher der Graphen die Beschleunigung in die Richtung der Startbahn angibt. Bestimme mit Hilfe der Daten in dem Diagramm näherungsweise die Abhebegeschwindigkeit v_r des Flugzeugs bei diesem Startvorgang.

Alles gut gegangen! Für den zum Glück seltenen Fall, dass beim Start eines mehrmotorigen Flugzeugs ein Problem mit einem Triebwerk auftritt, wird aus Sicherheitsgründen eine Abbruchgeschwindigkeit v_1 festgelegt. Fällt ein Triebwerk bei einer Geschwindigkeit $v \leq v_1$ aus, wird der Start abgebrochen, bei $v > v_1$ wird der Start trotz des Triebwerkausfalls fortgesetzt.

Die Abbruchgeschwindigkeit v_1 und die Startbahnlänge müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Länge der Startbahn muss ausreichen, um mit allen Triebwerken v_1 zu erreichen und dann bei maximaler Bremskraft ohne Nutzung von Schubumkehr wieder zum Stehen zu kommen.
- Die Länge der Startbahn muss ausreichen, um mit allen Triebwerken v_1 zu erreichen und dann mit einem ausgefallenen Triebwerk weiter auf die Abhebegeschwindigkeit v_r zu beschleunigen.

Betrachte nun ein Flugzeug der Masse m mit zwei Triebwerken, die jeweils eine Schubkraft F_T erzeugen. Die Bremsanlage erzeugt eine konstante Bremskraft F_B . Abgesehen von der Bremskraft F_B sollen Reibungseffekte vernachlässigt werden.

- 1.b) Bestimme für die Bedingungen i. und ii. jeweils einen Ausdruck für die mindestens notwendige Startbahnlänge s_i bzw. s_{ii} in Abhängigkeit von den gegebenen Parametern.

Für eine bestimmte Wahl von v_1 wird die zum Erfüllen beider Bedingungen mindestens benötigte Startbahnlänge minimal.

- 1.c) Bestimme diesen Wert von v_1 und die minimale Startbahnlänge $s_{\min}$ für einen Start eines Airbus A320 mit den Werten: $m = 75 \text{ t}$, $F_T = 118 \text{ kN}$, $F_B = 100 \text{ kN}$ sowie $v_r = 75 \text{ m s}^{-1}$.

^aDie Daten sind auch als Tabelle auf der IPhO Webseite www.scienceolympiaden.de/ipho abrufbar.

Lösung

- 1.a) In den Beschleunigungsverläufen in den Graphen ist erkennbar, dass die Daten der unten und oben dargestellten Beschleunigungen im zeitlichen Verlauf stärker zu schwanken beginnen, der Mittelwert zumindest für etwa die erste Minute aber etwa konstant bei Null für die untere Komponente bzw. etwas unter 10 m s^{-2} , dem ungefähren Wert der Schwerebeschleunigung auf der Erde, für die obere Komponente bleibt. Die Beschleunigung des Flugzeugs durch die Triebwerke auf der Rollbahn entspricht also ungefähr der mittig dargestellten Komponente der Beschleunigung.

Anfänglich ist diese Beschleunigung ungefähr bei Null¹ und steigt im Zeitraum zwischen etwa 20 s und 30 s auf etwa $3,0 \text{ m s}^{-2}$ an. Anschließend fällt die Beschleunigung bis zum Zeitpunkt $t_r \approx 57 \text{ s}$ etwa linear auf $2,2 \text{ m s}^{-2}$ ab. Direkt danach steigen sowohl die mittlere als auch die obere Beschleunigung durch den Abhebevorgang an.

Die Geschwindigkeit v_r kann näherungsweise durch das Betrachten der mittleren Beschleunigungen in den beiden beschriebenen Beschleunigungsabschnitten bestimmt werden. Daraus ergibt sich

$$v_r \approx \frac{3,0 \text{ m s}^{-2}}{2} 10 \text{ s} + \frac{3,0 \text{ m s}^{-2} + 2,2 \text{ m s}^{-2}}{2} 27 \text{ s} \approx 85 \text{ m s}^{-1} \approx 310 \text{ km h}^{-1}. \quad (1.1)$$

- 1.b) Bis zur Geschwindigkeit v_1 beschleunigt das Flugzeug mit beiden Triebwerken, die Beschleunigung beträgt dabei $a_1 = \frac{2F_T}{m}$. Daraus ergeben sich die Zeit Δt_1 und die Beschleunigungsstrecke s_1 bis zum Erreichen von v_1 zu

$$\Delta t_1 = \frac{v_1}{a_1} \quad \text{sowie} \quad s_1 = \frac{1}{2} a_1 \Delta t_1^2 = \frac{v_1^2}{2 a_1} = \frac{v_1^2 m}{4 F_T}. \quad (1.2)$$

Ein Start wird spätestens bei v_1 abgebrochen. Die Bremsbeschleunigung ist $a_B = \frac{F_B}{m}$, damit ergibt sich analog zu oben die Bremsstrecke zu

$$s_B = \frac{v_1^2}{2 a_B} = \frac{v_1^2 m}{2 F_B}. \quad (1.3)$$

Die benötigte Startbahnlänge bei einem Startabbruch bei v_1 ist somit

$$s_i = s_1 + s_B = \frac{v_1^2 m}{2} \left(\frac{1}{2 F_T} + \frac{1}{F_B} \right). \quad (1.4)$$

¹Die Abweichung von Null ist vermutlich auf eine nicht genau horizontale Ausrichtung des Smartphones zurückzuführen und wird im Weiteren nicht berücksichtigt.

Beim Ausfall eines Triebwerks bei einer Geschwindigkeit von (mindestens) v_1 muss weiter mit $a_2 = \frac{F_T}{m}$ beschleunigt werden, bis die Abhebegeschwindigkeit v_r erreicht ist. Die Zeit dafür ist $\Delta t_2 = \frac{v_r - v_1}{a_2} = \frac{(v_r - v_1) m}{F_T}$. Die dafür benötigte Strecke beträgt

$$s_2 = \frac{1}{2} a_2 \Delta t_2^2 + v_1 \Delta t_2. \quad (1.5)$$

Einsetzen von Δt_2 und a_2 liefert

$$s_2 = \frac{m}{2 F_T} ((v_r - v_1)^2 + 2 v_1 (v_r - v_1)) = \frac{m}{2 F_T} (v_r^2 - v_1^2). \quad (1.6)$$

Wenn das Triebwerk bei v_1 ausfällt und der Start fortgesetzt wird, ist die benötigte Startbahnlänge somit

$$s_{ii} = s_1 + s_2 = \frac{v_1^2 m}{4 F_T} + \frac{m}{2 F_T} (v_r^2 - v_1^2) = \frac{m}{4 F_T} (2 v_r^2 - v_1^2). \quad (1.7)$$

- 1.c) Da beide Bedingungen erfüllt sein müssen, ist die größere der beiden Strecken s_i und s_{ii} maßgeblich. s_i wächst mit größer werdendem v_1 und s_{ii} fällt hingegen mit größer werdendem v_1 im relevanten Wertebereich $0 < v_1 < v_r$. Der optimale Wert von v_1 ist somit dann erreicht, wenn gilt:

$$s_i = s_{ii}. \quad (1.8)$$

Einsetzen von (1.4) und (1.7) führt auf eine quadratische Gleichung. Die einzige positive Lösung ist:

$$v_1 = v_r \sqrt{\frac{\frac{1}{F_T}}{\frac{1}{F_T} + \frac{1}{F_B}}} = v_r \sqrt{\frac{F_B}{F_T + F_B}}. \quad (1.9)$$

Einsetzen der gegebenen Zahlenwerte in (1.9) liefert:

$$v_1 = 51 \text{ m s}^{-1} \approx 180 \text{ km h}^{-1}. \quad (1.10)$$

Die minimal benötigte Startbahnlänge ergibt sich durch Einsetzen von (1.10) in (1.4) oder in (1.7) zu

$$s_i = s_{ii} \approx 1,4 \text{ km}. \quad (1.11)$$

Bewertung - Abgehoben		Punkte
1.a)	Erläuterung eines sinnvollen Ansatzes zur Bestimmung der Geschwindigkeit aus dem Beschleunigungsdiagramm	1.0
	Nutzen der gegebenen Daten (z. B. stückweises Betrachten und Bestimmen der relevanten Werte)	1.0
	Berechnen eines Wertes für die Geschwindigkeit (1.1)	1.0
1.b)	Angaben der wirkenden Beschleunigungen a_1 , a_2 und a_B	1.0
	Bestimmen der Gesamtstrecke bei Startabbruch (1.4)	1.0
	Bestimmen der Gesamtstrecke bei Fortsetzung mit nur einem Triebwerk (1.7)	1.0
1.c)	Erkennen der Bedingung für minimale Startbahnlänge (1.8)	1.0
	Lösen der Gleichung und Angeben eines Ausdrucks für v_1 (1.9)	1.0
	Berechnen des Ergebnisses für die Abbruchgeschwindigkeit v_1 (1.10)	1.0
	Berechnen des Ergebnisses für die minimale Startbahnlänge (1.11)	1.0
		10.0

Hinweis: Die im ersten Aufgabenteil ermittelte Geschwindigkeit kann, je nach verwendeter Methode und Abschätzung der Fläche unter der Beschleunigungskurve, von dem angegebenen Wert abweichen. Alternative Methoden sollten, sofern ein physikalisch sinnvolles Vorgehen gewählt und eine passende Auswertung durchgeführt wurde, nicht zu Punktabzug führen.

Aufgabe 2 Angezogen

(10.0 Pkt.)

Durch Reiben an einem Wollpulli oder einem (synthetischen) Fell lässt sich die dünne Gummimembran eines Luftballons elektrostatisch aufladen. Der geladene Ballon kann dann, wie in dem Bild gezeigt, an einer Zimmerdecke haften.

Betrachte im Folgenden einen kugelförmigen, mit Luft gefüllten Luftballon, dessen Hülle eine Masse von $m = 2,7 \text{ g}$ besitzt und homogen mit einer Ladung $q = -4,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ aufgeladen ist. Der Luftballon wird an die Decke gehalten und bleibt an dieser haften, ohne herunterzufallen.



Abb. 2. Bild eines an der Decke haftenden Luftballons.

- 2.a) Erkläre qualitativ, wieso der Luftballon an der Decke haftet.

Nimm vereinfachend an, dass die Decke bis auf eine dünne isolierende Oberflächenschicht leitend und geerdet ist.

- 2.b) Informiere dich über die Methode der Spiegelladungen. Skizziere und begründe mit dieser Methode den Verlauf der elektrischen Feldlinien im Bereich zwischen Luftballon und Decke.
- 2.c) Bestimme den maximalen Radius r_{max} , auf den der Luftballon aufgeblasen werden darf, bevor er von der Decke herunterfällt.

Wenn die elektrische Feldstärke in Luft einen kritischen Wert von etwa $3,0 \cdot 10^6 \text{ V m}^{-1}$ überschreitet, kommt es zu einem Lichtbogen oder Funkenschlag und die Luft verliert ihre isolierende Wirkung. Wenn das passiert, geht auch der Luftballon kaputt.

- 2.d) Bestimme, welchen Radius r_{min} der nun frei im Raum befindliche Luftballon mindestens haben muss, damit es nicht zu einem Funkenschlag kommt.

Lösung

- 2.a) Der geladene Luftballon erzeugt ein elektrisches Feld, das in den Atomen der nichtleitenden Zimmerdecke eine Ladungsverschiebung hervorruft. Dabei verschieben sich aufgrund der negativen Ladung des Luftballons die negativen Ladungen von dem Ballon weg, so dass näher am Ballon ein positiver Ladungsüberschuss entsteht. Durch diese so genannte Verschiebungspolarisation entsteht an der Oberfläche der Decke eine Gegenladung, die den Ballon über die Coulombkraft anzieht.
- 2.b) Das durch den Luftballon außerhalb des Ballons hervorgerufene elektrische Feld entspricht dem einer Punktladung q im Zentrum des Ballons, also im Abstand r von der Decke. Auf der leitenden Deckenunterseite muss das elektrische Feld senkrecht stehen, da es ansonsten eine Feldkomponente parallel zur Oberfläche gibt, die die Ladungen in der Decke umverteilen würde.

Um eine solche Feldkonfiguration zu erzeugen, kann man sich oberhalb der Decke eine zweite

Ladung, die so genannte Spiegelladung, vorstellen, die genau diese Feldkonfiguration hervorruft². Dazu muss die Spiegelladung im Abstand r oberhalb der Deckenunterseite positioniert werden und die Ladung $-q$ tragen. Das elektrische Feld in dem relevanten Raumbereich sieht dann folgendermaßen aus:

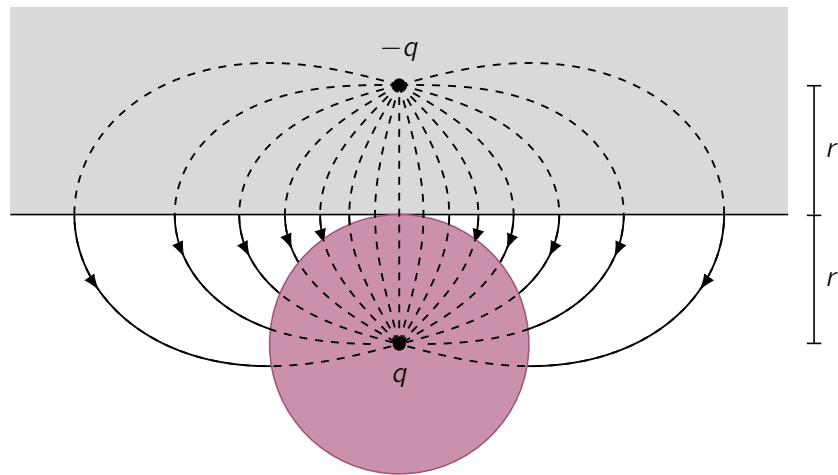


Abb. 3. Skizze zum Verlauf der elektrischen Feldlinien.

2.c) Die Coulombkraft zwischen zwei Ladungen q und $-q$ im Abstand $2r$ beträgt

$$|F_c| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{4r^2}. \quad (2.1)$$

Damit der Luftballon nicht von der Decke fällt, muss diese anziehende Kraft mindestens so groß sein, wie die Gewichtskraft mg des Luftballons. Der maximale Radius wird erreicht, wenn die beiden Kräfte gleich sind. Durch Umstellen ergibt sich daraus

$$r_{\max} = \frac{|q|}{4\sqrt{\pi\epsilon_0 mg}} \approx 0,12 \text{ m}. \quad (2.2)$$

2.d) Das elektrische Feld an der Oberfläche des Luftballons besitzt eine Feldstärke

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (2.3)$$

Die Feldstärke ist bei fester Ladung q umso größer, je kleiner der Ballon ist. Der Radius $r_{\min}$, bei dem die kritische Feldstärke E_{krit} erreicht wird, ergibt sich daraus zu

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 |E_{\text{krit}}|}} \approx 0,035 \text{ m}. \quad (2.4)$$

²Es lässt sich tatsächlich zeigen, dass die Feldkonfiguration durch die Ladungsverteilung unterhalb der Decke und die Bedingung, dass das elektrische Feld senkrecht auf der leitenden Decke steht, eindeutig festgelegt ist (s. z. B. das Vorlesungsskript zur Elektrodynamik von Andreas Wipf unter www.tpi.uni-jena.de/~wipf/lectures/ed/edhead.pdf).

Bewertung - Angezogen		Punkte
2.a)	Erklären des Phänomens mit Hilfe einer durch das elektrische Feld des Ballons verursachten Ladungsverschiebung und Coulombkräften	1.0
2.b)	Erkennen, dass das Feld des Luftballons dem einer Punktladung entspricht	1.0
	Verwenden einer passenden Spiegelladung (Position und Ladung)	1.0
	Anfertigen einer passenden Feldlinienskizze	1.0
	Erläutern, dass das elektrische Feld senkrecht auf die Decke treffen muss	1.0
2.c)	Angaben der Coulombkraft zwischen zwei Ladungen (2.1)	1.0
	Verwenden eines Kräftegleichgewichts	1.0
	Bestimmen des maximalen Radius (2.2)	1.0
2.d)	Angaben des elektrischen Feldes an der Ballonoberfläche (2.3)	1.0
	Bestimmen des minimalen Radius (2.4)	1.0
		10.0

Aufgabe 3 Festgehalten

(10.0 Pkt.)

Laserstrahlen können genutzt werden, um Kräfte auf mikroskopische Teilchen auszuüben. Auf diesem Phänomen basiert die Funktionsweise einer *optischen Pinzette*, die z. B. bei der Untersuchung biologischer Systeme genutzt wird. Im Jahr 2018 wurde Arthur Ashkin unter anderem für seine Arbeiten zu dieser Technik der Nobelpreis für Physik verliehen.

Für Teilchen, die deutlich größer sind als die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts, lässt sich die Kraftwirkung durch die Brechung von Lichtstrahlen verstehen.

Betrachte eine transparente und fixierte Polymerkugel mit Radius $r = 12,0 \mu\text{m}$ und Brechungsindex $n = 1,40$. Ein Laserstrahl trifft, wie in der Abbildung skizziert, in einem Abstand $d = 6,0 \mu\text{m}$ von der eingezeichneten Mittelpunktachse auf die Kugel. Nimm an, dass kein Licht reflektiert wird.

- 3.a) Zeichne den Verlauf des Laserstrahls beim Durchgang durch die Polymerkugel und bestimme den Winkel θ , um den der Laserstrahl aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird.

Betrachte ein Photon des Laserstrahls mit Impulsbetrag p , das durch die Polymerkugel abgelenkt wird. Durch die Brechung ändert der Impuls seine Richtung, der Impulsbetrag bleibt aber in sehr guter Näherung erhalten.

- 3.b) Bestimme die sich ergebenden Änderungen der Impulskomponenten entlang der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung und senkrecht dazu.

Die Polymerkugel wird nun an der eingezeichneten Stelle mit einem Laser einer Wellenlänge von $\lambda = 530 \text{ nm}$ und einer Leistung von $P = 1,0 \text{ W}$ bestrahlt.

- 3.c) Bestimme die durch die Brechung des Laserlichts auf die Polymerkugel wirkenden Kräfte entlang der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung und senkrecht dazu.

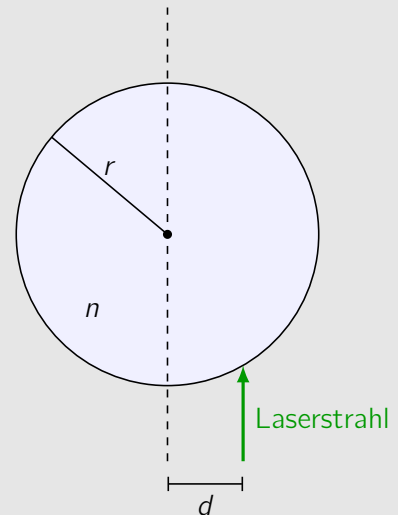


Abb. 4. Skizze der Polymerkugel mit Laserstrahl.

Lösung

- 3.a) Abbildung 4 zeigt den Verlauf des Laserstrahls bei der Brechung. An den Grenzflächen zwischen Luft und dem Polymermaterial wird der Strahl gebrochen. Für Einfallswinkel und Ausfallswinkel gilt das Snelliussche Brechungsgesetz, das mit den Winkelbezeichnungen in der Abbildung formuliert werden kann als

$$\sin \alpha_1 = n \sin \alpha_2. \quad (3.1)$$

Mit $\sin \alpha_1 = \frac{d}{r} = 0,5$ ist $\alpha_1 = 30^\circ$ und

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{\sin \alpha_1}{n} \approx 21^\circ. \quad (3.2)$$

Nach der Brechung beim Eintritt in die Polymerkugel ist der Lichtstrahl um den Winkel $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ gegenüber der Einfallrichtung abgelenkt. Beim Austritt aus der Polymerkugel beträgt der Lotwinkel in der Kugel aufgrund des gleichschenkligen Dreiecks erneut α_2 , so dass der Lichtstrahl um den gleichen Winkel $\Delta\alpha$ abgelenkt wird. Insgesamt wird der Lichtstrahl so um den Winkel

$$\theta = 2\Delta\alpha = 2(\alpha_1 - \alpha_2) \approx 18^\circ \quad (3.3)$$

aus der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt.

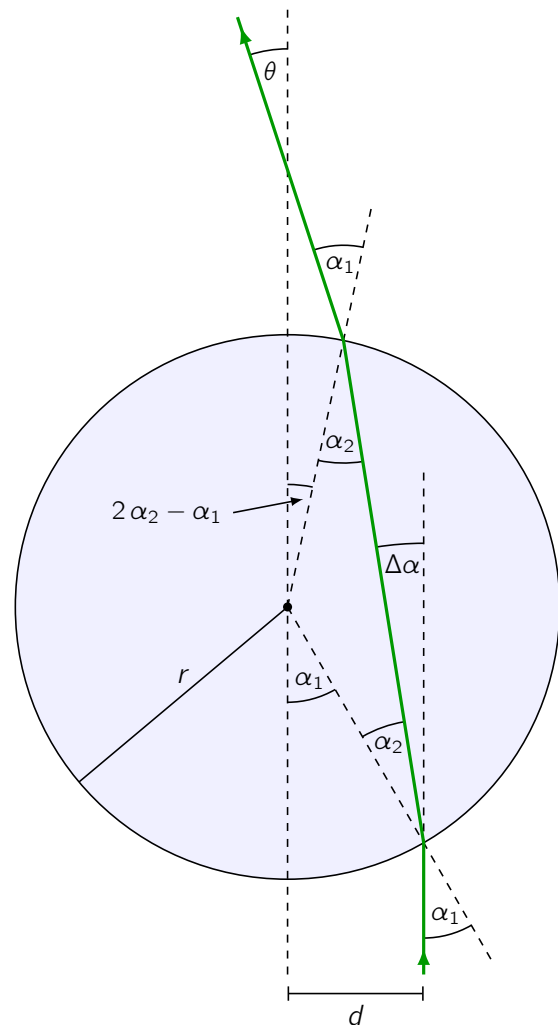


Abb. 5. Skizze des Strahlenverlaufs.

- 3.b) Anfänglich ist der Impuls p in Ausbreitungsrichtung ausgerichtet. Durch die Ablenkung um den Winkel θ ergeben sich die Impulskomponenten

$$p_{\parallel} = p \cos \theta \quad \text{und} \quad p_{\perp} = p \sin \theta \quad (3.4)$$

entlang bzw. senkrecht zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls. Die Änderungen der Impulskomponenten betragen damit betragsmäßig

$$\Delta p_{\parallel} = |p(\cos \theta - 1)| = p(1 - \cos \theta) \quad \text{und} \quad \Delta p_{\perp} = p \sin \theta. \quad (3.5)$$

- 3.c) Der Impuls eines Photons der Wellenlänge $\lambda = 530 \text{ nm}$ beträgt

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \approx \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{530 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 1,25 \cdot 10^{-27} \text{ kg m s}^{-1}, \quad (3.6)$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und f die Frequenz des Photons bezeichnen. Die Energie eines Photons beträgt hingegen

$$E = pc = \frac{hc}{\lambda} \approx \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{530 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 3,75 \cdot 10^{-19} \text{ J}. \quad (3.7)$$

Mit dem Laserstrahl der Leistung $P = 1,0 \text{ W}$ treffen daher die Photonen mit einer Rate von $\frac{\Delta N}{\Delta t} = P/E \approx 2,7 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$ auf die Polymerkugel. Durch die Impulsänderung der Photonen bei der Brechung wird eine Kraft auf die Kugel sowohl in die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls als auch nach rechts verursacht. Diese Kräfte betragen

$$F_{\parallel} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \Delta p_{\parallel} = \frac{\Delta N}{\Delta t} p (1 - \cos \theta) = \frac{P}{c} (1 - \cos \theta) \approx 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ N}, \quad (3.8)$$

sowie

$$F_{\perp} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \Delta p_{\perp} = \frac{\Delta N}{\Delta t} p \sin \theta = \frac{P}{c} \sin \theta \approx 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ N} \quad (3.9)$$

und sind unabhängig von der Wellenlänge, sofern sich der Brechungsindex nicht wellenlängenabhängig ändert.

Durch diese Kräfte ist es bei geeigneter Konfiguration des einfallenden Laserlichts möglich, eine optische Pinzette zu designen.

Bewertung - Festgehalten		Punkte
3.a)	Anfertigen einer Skizze mit relevanten Hilfslinien (Lote) und Winkeln	1.0
	Zeichnen des Verlaufs des Lichtstrahls	1.0
	Korrekt Nutzen des Brechungsgesetzes	1.0
	Bestimmen des Ablenkungswinkels θ (3.3)	1.0
3.b)	Zerlegen des Impulses in Komponenten	1.0
	Angaben der (Beträge der) Impulsänderungen in beide Richtungen (3.5)	1.0
3.c)	Angaben der Zusammenhänge von Energie und Impuls eines Photons mit der Wellenlänge (auch implizit)	1.0
	Bestimmen der Auftreffrate der Photonen (auch implizit)	1.0
	Erkennen, dass die Kraft das Produkt aus Auftreffrate und Impulsänderung ist	1.0
	Berechnen der Kraftkomponenten (3.8) und (3.9)	1.0
		10.0

Aufgabe 4 Ausgeleert

(10.0 Pkt.)

Stich in eine mit Wasser gefüllte und nicht zugeschraubte Plastikflasche ein kleines Loch in den unteren Teil der Seitenwand. Das Wasser läuft dann, wie in dem nebenstehenden Foto, in einem Strahl aus der Flasche aus. Die Form des Wasserstrahls ändert sich dabei mit der Füllhöhe des Wassers in der Flasche.



- 4.a) Bestimme experimentell die Geschwindigkeit v , mit der der Wasserstrahl aus der Flasche austritt. Gib an, wie du bei der Bestimmung von v vorgehst und nimm Messwerte für mindestens 10 unterschiedliche Werte der Höhe h des Wasserspiegels in der Flasche über dem Loch auf.
- 4.b) Zeige, dass $v_{\text{th}} = \sqrt{2gh}$ eine theoretische Obergrenze für die Ausströmgeschwindigkeit darstellt.
- 4.c) Erstelle einen geeigneten Graphen, um deine Messergebnisse mit der theoretischen Obergrenze zu vergleichen. Beurteile, wie gut die experimentell ermittelten Geschwindigkeiten zu den theoretisch maximal erwarteten passen.
- 4.d) Nenne mindestens zwei physikalische Gründe, die für mögliche Abweichungen zwischen theoretischer Vorhersage und experimentellen Ergebnissen verantwortlich sein können. Begründe qualitativ, wie diese die Ergebnisse beeinflussen.

Lösung

- 4.a) Für das Experiment wird eine 1,5 L PET-Flasche verwendet, in die nahe am Boden mit einer dickeren Nadel ein Loch mit einem Durchmesser von 2,0 mm in die Seitenwand gestochen wurde.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit v wird die Flasche, wie in Abb. 6 skizziert, erhöht aufgestellt, so dass sich das Austrittsloch in einer Höhe $H = 21,5 \text{ cm}$ über dem Boden befindet. Gemessen wird für verschiedene Füllhöhen h die Weite d , also die horizontale Entfernung vom Austrittsloch, in der der Wasserstrahl auf den Boden trifft.

Da sich das Wasser nach dem Austritt aus der Flasche, zumindest näherungsweise, im freien Fall befindet, gelten für ein kleines Wasservolumen für die in der Zeit t nach dem Austritt in horizontaler und vertikaler Richtung zurückgelegten Distanzen

$$x(t) = vt \quad \text{bzw.} \quad y(t) = \frac{1}{2}gt^2, \quad (4.1)$$

wobei $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ die Schwerebeschleunigung auf der Erde angibt.

Beim Auftreffen auf den Boden ist $y(t) = H$ und damit $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$. Mit $x(t) = d$ beim Auftreffen

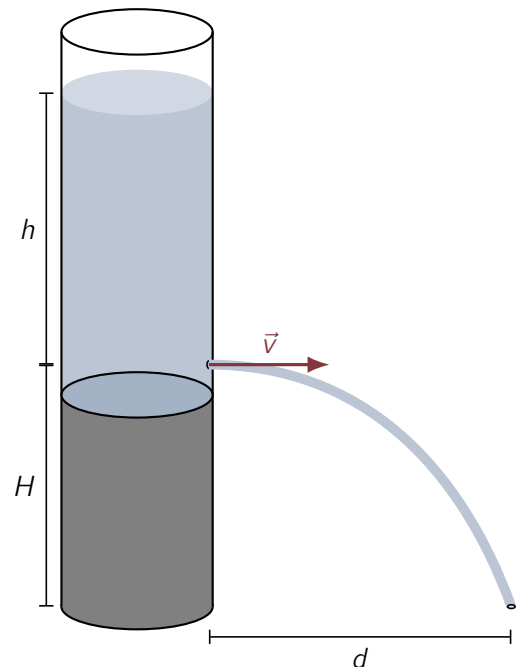


Abb. 6. Skizze zum Wasserstrahl.

auf den Boden ergibt sich daraus für die Austrittsgeschwindigkeit

$$v = d \sqrt{\frac{g}{2H}}. \quad (4.2)$$

Zum einfacheren Ablesen der Füllhöhe h werden auf die Flasche oberhalb des Austrittsloches mit einem wasserfesten Stift Markierungen im Abstand von jeweils einem Zentimeter gezeichnet. Die Flasche wird dann fast vollständig mit Wasser gefüllt und die Weite d während des Auslaufens in Abhängigkeit von der Höhe h mit einem Lineal gemessen. Die Füllhöhe h ist auf etwa ± 1 mm genau messbar. Aufgrund der Aufweitung des Wasserstrahls ist die Weite d nur auf etwa $\pm 0,5$ cm bestimmbar. Die folgende Tabelle stellt die gemessenen Werte dar.

Tabelle 1. Messwerte der Weite d des auf den Boden treffenden Wasserstrahls in Abhängigkeit von der Füllhöhe h . Angegeben sind die daraus mittels (4.2) bestimmte Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls sowie die theoretisch bei der Füllhöhe erwartete Austrittsgeschwindigkeit v_{th} nach Gleichung (4.3). Für die spätere graphische Darstellung sind außerdem die Quadrate der Geschwindigkeiten mit aufgeführt.

Nr	h/cm	d/cm	$v/\text{m s}^{-1}$	$v_{th}/\text{m s}^{-1}$	$v^2/\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	$v_{th}^2/\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
1	20,0	33,0	1,58	1,98	2,48	3,92
2	19,0	32,0	1,53	1,93	2,34	3,73
3	18,0	31,5	1,5	1,88	2,26	3,53
4	17,0	30,5	1,46	1,83	2,12	3,34
5	16,0	29,0	1,39	1,77	1,92	3,14
6	15,0	28,0	1,34	1,72	1,79	2,94
7	14,0	26,5	1,27	1,66	1,6	2,75
8	13,0	25,0	1,19	1,6	1,43	2,55
9	12,0	24,5	1,17	1,53	1,37	2,35
10	11,0	23,5	1,12	1,47	1,26	2,16
11	10,0	22,0	1,05	1,4	1,1	1,96
12	9,0	20,5	0,98	1,33	0,96	1,77
13	8,0	18,5	0,88	1,25	0,78	1,57
14	7,0	16,5	0,79	1,17	0,62	1,37
15	6,0	14,5	0,69	1,08	0,48	1,18
16	5,0	11,5	0,55	0,99	0,3	0,98
17	4,0	9,0	0,43	0,89	0,18	0,78
18	3,0	5,0	0,24	0,77	0,06	0,59

Neben der vorgestellten Methode sind natürlich auch weitere Wege denkbar, die Austrittsgeschwindigkeit zu bestimmen. So kann man zum Beispiel das ausgetretene Wasservolumen über einen kleinen Zeitraum sammeln, in dem sich der Wasserstand in der Flasche kaum ändert, und aus dem Volumen mit Hilfe des Lochdurchmessers auf die Geschwindigkeit schließen.

- 4.b) Mit der Annahme, dass keine Reibung das Ausfließen des Wassers behindert, kann die Summe aus potentieller und kinetischer Energie des Wassers bis zum Auftreffen auf den Boden als konstant betrachtet werden. Wenn außerdem angenommen wird, dass sich der Wasserspiegel in der Flasche nur langsam ändert, kann darüber hinaus die kinetische Energie des in der Flasche durch das Auslaufen absinkenden Wasservolumens vernachlässigt werden.

Tritt nun ein kleines Volumen ΔV an Wasser mit der Geschwindigkeit v_{th} aus der Flasche aus, sinkt der Wasserspiegel ein klein wenig. Dadurch verringert sich die potentielle Energie des Wasservolumens in der Flasche näherungsweise um $\Delta V \rho g h$, wobei ρ die Dichte von Wasser angibt. Diese Änderung der potentiellen Energie entspricht der kinetischen Energie $\frac{1}{2} \Delta V \rho v_{th}^2$ des austretenden Wassers. Die Tatsache, dass die kinetische Energie des austretenden Wassers genau so

groß ist, wie bei einem Fall des Wassers aus der Höhe h ist als Torricelli Theorem bekannt. Aus dieser theoretischen Betrachtung ergibt sich für die Austrittsgeschwindigkeit der Zusammenhang

$$v_{\text{th}} = \sqrt{2gh}. \quad (4.3)$$

Dieser Zusammenhang kann z. B. auch über eine Druckbetrachtung abgeleitet werden. Der Schweredruck $p = \rho gh$ an der Austrittsöffnung beschleunigt ein kleines Wasservolumen $A\Delta x$, wobei A die Querschnittsfläche der Austrittsöffnung ist, mit einer Kraft pA . Die dadurch über die Strecke Δx an dem Wasservolumen verrichtete Arbeit beträgt $pA\Delta x$. Diese entspricht der kinetischen Energie $\frac{1}{2}A\Delta x\rho v_{\text{th}}^2$ des Wasservolumens beim Austritt aus der Flasche. Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeit ebenfalls das Ergebnis (4.3).

Die Form der Flasche spielt für die Herleitung der Austrittsgeschwindigkeit keine Rolle und das Ergebnis (4.3) ist entsprechend von der Flaschenform unabhängig.

- 4.c) Theoretisch ergibt sich als Obergrenze für die Geschwindigkeit, mit der das Wasser aus der Flasche austritt, eine Proportionalität zur Wurzel der Füllhöhe h . Um zu beurteilen, wie gut die Messergebnisse zu den theoretisch möglichen Werten passen, kann die Austrittsgeschwindigkeit v direkt über der Füllhöhe h aufgetragen werden, wie in Abb. 7 dargestellt.

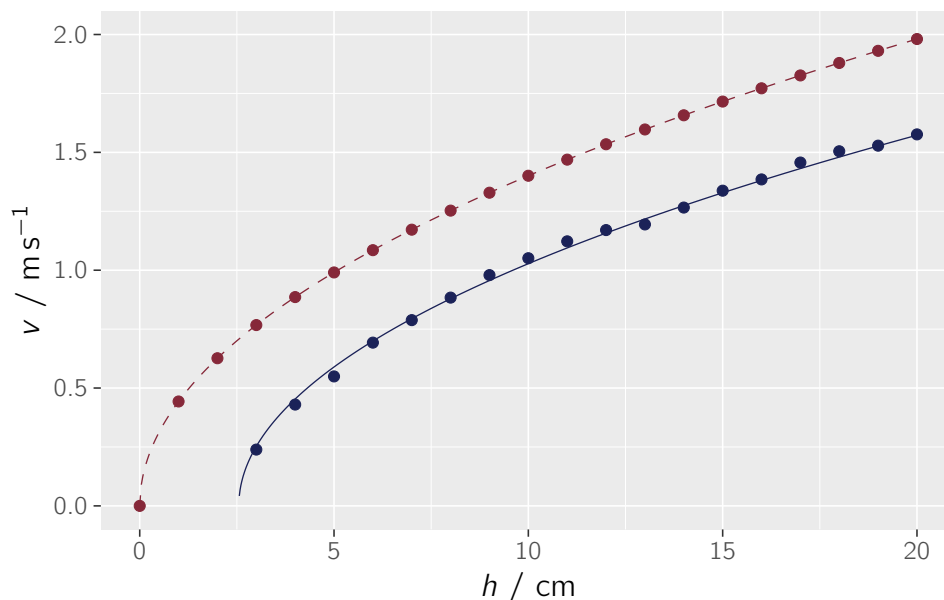


Abb. 7. Austrittsgeschwindigkeit v des Wasserstrahls in Abhängigkeit von der Wasserhöhe h mit Ausgleichskurve in Form einer (verschobenen) Wurzelfunktion. Die gestrichelte Kurve zeigt die theoretisch erwarteten Daten.

Alternativ kann z. B. auch das Quadrat der Geschwindigkeit über der Füllhöhe h aufgetragen werden, wie in Abb. 8 dargestellt. In diesem Fall wird theoretisch eine lineare Abhängigkeit der quadrierten Geschwindigkeit von h erwartet.

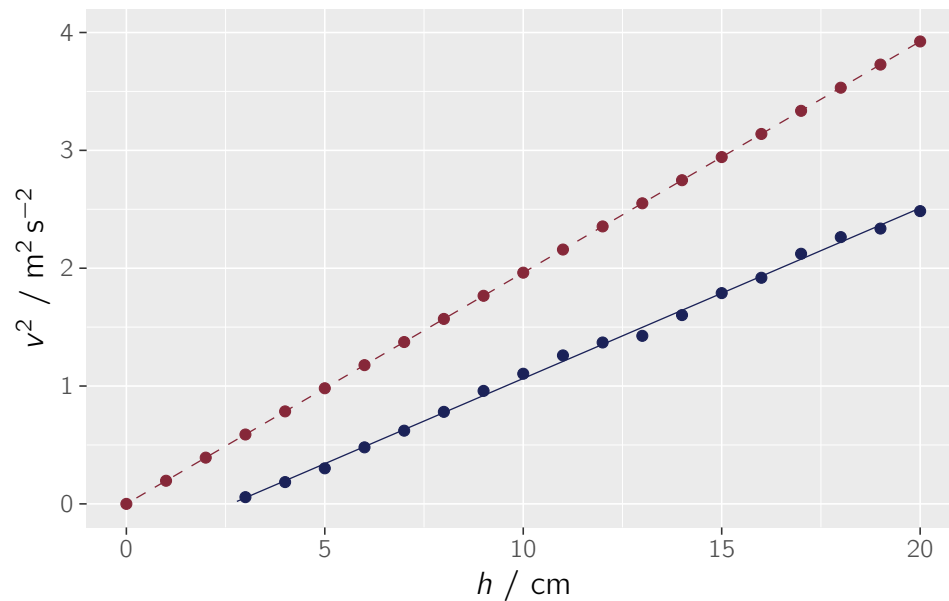


Abb. 8. Quadrierte Austrittsgeschwindigkeit v^2 des Wasserstrahls in Abhängigkeit von der Wasserhöhe h mit Ausgleichsgerade. Die gestrichelte Kurve zeigt die theoretisch erwarteten Daten.

In beiden Graphen ist erkennbar, dass die experimentellen Werte etwa der erwarteten Abhängigkeit von h folgen. Allerdings ergibt sich keine besonders gute Übereinstimmung der experimentell ermittelten Werte mit der theoretischen Erwartung. Die Werte liegen systematisch unter den theoretisch erwarteten und die Messungen ergeben schon für Füllhöhen von etwa 2 cm eine verschwindende Austrittsgeschwindigkeit.

- 4.d) In der theoretischen Herleitung wurde vernachlässigt, dass Reibung, sowohl innerhalb der Flüssigkeit (Viskosität) als auch des Wassers mit der Flaschenwand zu Verlusten der kinetischen Energie führen. Außerdem besitzt auch das noch in der Flasche befindliche Wasservolumen aufgrund der Abwärtsbewegung eine kinetische Energie, die zu einer Verringerung der kinetischen Energie des austretenden Wassers führt. Bei einer genaueren Betrachtung muss schließlich auch noch das Verhalten des Wassers beim Austritt aus der Öffnung genauer betrachtet werden. Dort kann es zu turbulenten Strömungen kommen, die den Volumenstrom verringern.

Diese in der theoretischen Betrachtung nicht berücksichtigten zusätzlichen Effekte führen zu einer Verringerung der kinetischen Energie und damit der Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers, was, zumindest qualitativ, zu den experimentell ermittelten Geschwindigkeiten passt.

Bewertung - Ausgeleert		Punkte
4.a)	Beschreiben eines geeigneten Vorgehens (inkl. Formeln) und der Durchführung	1.0
	Angeben von Messwerten zu mind. zehn Füllhöhen	1.0
	Bestimmen der entsprechenden Geschwindigkeiten	1.0
4.b)	Formulieren eines passenden Ansatzes zur Bestimmung der theoretischen Geschwindigkeitsobergrenze (z. B. Energiesatz)	1.0
	Ableiten der Formel für die theoretische Obergrenze (4.3)	1.0
4.c)	Erstellen eines geeigneten Graphen mit experimentellen und theoretischen Daten	2.0
	Beurteilen der Passung zwischen Theorie und Experiment	1.0
4.d)	Nennen von zwei physikalisch relevanten Gründen für Abweichungen zwischen Theorie und Experiment	1.0
	Begründen, dass diese zu einer Verringerung der Geschwindigkeit führen	1.0
		10.0

Hinweis: Die hier dargestellten Messergebnisse können von den Ergebnissen der Teilnehmenden abweichen und sollten daher als Beispielwerte betrachtet werden. Es wird in dieser Aufgabe außerdem keine Betrachtung von Unsicherheiten erwartet.

Aufgabe 5 Juniaraufgabe - Lange Leitung

(10.0 Pkt.)

Hochspannungsleitungen werden dazu verwendet, elektrische Energie über lange Strecken zu transportieren. Die Skizze zeigt den Querschnitt einer einfachen Hochspannungsleitung. Der innere Leiter ist ein Stahlseil und die sechs außen liegenden Leiter bestehen aus Aluminium. Der Durchmesser jedes der einzelnen Seile beträgt $d = 1,5 \text{ cm}$ und die Länge der Hochspannungsleitung wird mit L bezeichnet.

Das Stahlseil ist wichtig für die mechanische Stabilität, für die elektrische Leitung aber weniger gut geeignet, da der spezifische Widerstand von Stahl mit $\rho_{\text{St}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \Omega \text{ m}$ deutlich höher ist als der von Aluminium mit $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Bezeichne mit R den Widerstand der Hochspannungsleitung. Wenn das zentrale Stahlseil entfernt wird, erhöht sich dieser Widerstand um $\Delta R = 6,1 \cdot 10^{-4} \Omega$.

Bestimme die Länge L der Hochspannungsleitung.

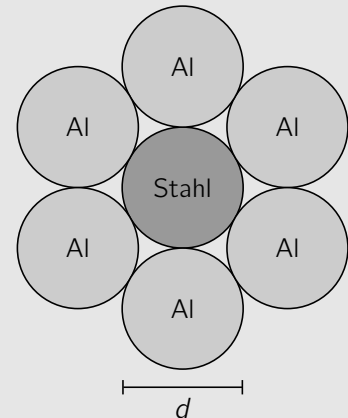


Abb. 9. Querschnittsskizze einer Hochspannungsleitung.

Lösung

Der Widerstand eines Leiters der Länge L mit Querschnittsfläche A ergibt sich mit dem spezifischen Widerstand ρ zu $\frac{\rho L}{A}$. Daraus lassen sich die Widerstände R_{St} für das Stahlseil und R_{Al} für die Parallelschaltung der sechs Aluminiumleiter bestimmen zu

$$R_{\text{St}} = \frac{\rho_{\text{St}} L}{A} \quad \text{sowie} \quad R_{\text{Al}} = \frac{\rho_{\text{Al}} L}{6 A}, \quad (5.1)$$

wobei $A = \pi \frac{d^2}{4}$ die Querschnittsfläche eines Seils angibt. R_{Al} entspricht dabei dem Widerstand der Leitung ohne das zentrale Stahlseil. Der Gesamtwiderstand der Hochspannungsleitung ergibt sich aus der Parallelschaltung dieser Leiter und beträgt

$$R = \left(\frac{1}{R_{\text{St}}} + \frac{1}{R_{\text{Al}}} \right)^{-1} = \frac{R_{\text{St}} R_{\text{Al}}}{R_{\text{St}} + R_{\text{Al}}}. \quad (5.2)$$

Wenn das Stahlseil entfernt wird, erhöht sich der Widerstand der Leitung um ΔR und es gilt

$$\Delta R = R_{\text{Al}} - R = R_{\text{Al}} - \frac{R_{\text{St}} R_{\text{Al}}}{R_{\text{St}} + R_{\text{Al}}} = \frac{R_{\text{Al}}^2}{R_{\text{St}} + R_{\text{Al}}}. \quad (5.3)$$

Dieser Ausdruck lässt sich durch Einsetzen von (5.1) umformen zu

$$\Delta R = \frac{L}{A} \frac{\frac{\rho_{\text{Al}}^2}{6^2}}{\rho_{\text{St}} + \frac{\rho_{\text{Al}}}{6}} = \frac{L}{6 A} \frac{\rho_{\text{Al}}}{1 + \frac{6 \rho_{\text{St}}}{\rho_{\text{Al}}}}. \quad (5.4)$$

Auflösen nach L ergibt schließlich für die gesuchte Länge der Hochspannungsleitung

$$L = 6 A \Delta R \frac{1 + \frac{6 \rho_{\text{St}}}{\rho_{\text{Al}}}}{\rho_{\text{Al}}} \approx 6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 6,1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \frac{1 + 6 \cdot 5,6}{2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}} \approx 820 \text{ m}. \quad (5.5)$$

Bewertung - Junioraufgabe - Lange Leitung		Punkte
	Angeben des Zusammenhanges zwischen spezifischem Widerstand und Widerstand	1.0
	Erkennen der Parallelschaltung der Leiter	1.0
	Herleiten eines Ausdrucks für den Gesamtwiderstand (5.2)	2.0
	Betrachten der korrekten Widerstandsdifferenz (5.3)	1.0
	Ausdrücken der Differenz durch spezifische Widerstände (5.4)	2.0
	Umformen zu einem Ausdruck für die Leitungslänge L (5.5)	1.0
	Berechnen des Wertes für L (5.5)	2.0
		10.0

Hinweis: Je nachdem, wie die Zahlenwerte gerundet werden, können die Teilnehmenden auch auf ein anderes Ergebnis kommen. Dies sollte, sofern richtig gerechnet wurde, nicht zu Punktabzug führen.

Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 57. IPhO 2027

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

Bitte tragen sie als korrigierende Lehrkraft die **Ergebnisse bis spätestens zum 25. September 2026 im Onlineportal** ein und laden Sie dort für alle von Ihnen Betreuten die korrigierten **Arbeiten zusammen mit Bewertungsbögen** in jeweils einer pdf-Datei hoch. Alternativ können Sie die Bearbeitungen und Bewertungsbögen auch per Post an die/den zuständige(n) Landesbeauftragte(n) schicken.

Schüler*in (Code): _____ (_____)

Schule, Ort: _____

Lehrkraft (Code): _____ (_____)

Aufgabe	Maximalpunktzahl	Erreichte Punktzahl
1 Abgehoben	10	
2 Angezogen	10	
3 Festgehalten	10	
4 Ausgeleert	10	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

5 Junioraufgabe - Lange Leitung	10	
	40 (+10)	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: _____