57. Internationale PhysikOlympiade

Riad, Saudi-Arabien 2027

PhysikOlympiade in Deutschland

email: ipho@scienceolympiaden.de
Telefon: 0431 880-5387 oder 0431 880-5120
Anschrift: PhysikOlympiade am IPN
Olshausenstraße 62, 24118 Kiel
web: www.scienceolympiaden.de/ipho

Lösungen zu den Aufgaben der 2. Runde im Auswahlwettbewerb zur 57. IPhO 2027

Hinweise zur Wettbewerbsrunde und zur Bewertung

Die 2. Runde des Auswahlwettbewerbs zur Internationalen PhysikOlympiade 2027 wurde im November 2026 als bundesweite Klausurrunde durchgeführt. Die Klausur wurde in der Regel an den Schulen der Teilnehmenden unter Aufsicht einer Fachlehrkraft absolviert. Den teilnehmenden Schüler*innen standen für die Bearbeitung der Aufgaben 150 Minuten Zeit zur Verfügung. Als Hilfsmittel waren Schreib- und Zeichenmaterialien, die auf der folgenden Seite abgedruckte Liste von Naturkonstanten sowie ein nicht graphikfähiger Taschenrechner zugelassen. Zusätzlich durfte ein DIN-A4-Blatt mit Formeln (ein- oder doppelseitig per Hand oder mit Drucker beschrieben) in der Klausur verwendet werden.

Die Korrektur der Klausur der 2. Runde erfolgt in einem zweistufigen Prozess auf Grundlage dieser Musterlösung und den angegebenen Bewertungsmaßstäben, an denen sich im Korrekturprozess noch Anpassungen ergeben können. Die jeweils aktuelle Version der Musterlösung ist auf der Webseite der PhysikOlympiade[1] abrufbar.

Bei der Korrektur wird primär die Richtigkeit und Nachvollziehbarkeit der Lösung bewertet und weniger die Sauberkeit der Ausarbeitung oder der sprachliche Ausdruck. Bei den Multiple-Choice Aufgaben wird für den richtigen Antwortbuchstaben jeweils 1 Punkt vergeben. Die in den Bewertungstabellen darüber hinaus angegebenen Punktzahlen beziehen sich jeweils auf den von uns ausgearbeiteten Lösungsweg. Bei anderen Lösungswegen wird die Bewertung sinngemäß abgeändert, wobei die Gesamtpunktzahl pro Aufgabenteil beibehalten wird. 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 wird, wenn vorher eine falsche Formel abgeleitet, aber korrekt mit dieser Formel weiter gerechnet wurde. Wenn bei einem Ergebnis jedoch die resultierende Einheit falsch ist, führt dies in jedem Fall zu Punktabzug.

Bei Fragen oder Anmerkungen freuen wir uns über eine Nachricht an ipho@scienceolympiaden.de.

[1] Die URL ist: Webseite der PhysikOlympiade

Naturkonstanten und gebräuchliche Größen

In den Aufgaben können die folgenden physikalischen Größen verwendet werden. Die Angaben können jeweils bis zur angegebenen Stelle als exakt angenommen werden.

Konstante	**gebräuchliche Formelzeichen**	**Wert**
Absoluter Nullpunkt	T_0	$0\,\mathrm{K} = -273{,}15\,^\circ\mathrm{C}$
Atomare Masseneinheit	u	$1{,}660\,539 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Avogadro-Konstante	N_A	$6{,}022\,141 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	k_B	$1{,}380\,649 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J\,K}^{-1}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$8{,}854\,187\,817 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{A\,s\,V}^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$
Elektronenvolt	eV	$1\,\mathrm{eV} = 1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$
Elementarladung	e	$1{,}602\,177 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{A\,s}$
Fallbeschleunigung auf der Erde	g	$9{,}806\,65\,\mathrm{m\,s}^{-2}$
Gravitationskonstante	γ, G	$6{,}674 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m}^3\,\mathrm{kg}^{-1}\,\mathrm{s}^{-2}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	$2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m\,s}^{-1}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$1{,}256\,637\,061 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{V\,s\,A}^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$
Normdruck, Atmosphärendruck	p_n	$101\,325\,\mathrm{N\,m}^{-2}$
Plancksches Wirkungsquantum	h	$6{,}626\,070 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$
Ruhemasse des Elektrons	m_e	$9{,}109\,384 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$
Ruhemasse des Neutrons	m_n	$1{,}674\,927 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Ruhemasse des Protons	m_p	$1{,}672\,622 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Rydberg-Konstante	R_∞	$1{,}097\,373\,157 \cdot 10^{7}\,\mathrm{m}^{-1}$
Schallgeschwindigkeit in Luft	c_Luft	$343\,\mathrm{m\,s}^{-1}$ (bei 20 °C und Normdruck)
Stefan-Boltzmann-Konstante	α, σ	$5{,}6704 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W\,m}^{-2}\,\mathrm{K}^{-4}$
Universelle Gaskonstante	R	$8{,}314\,46\,\mathrm{J\,K}^{-1}\,\mathrm{mol}^{-1}$

Multiple-Choice Aufgaben

Finde zu jeder der folgenden sieben Fragen den richtigen Lösungsbuchstaben und begründe physikalisch, warum dies die korrekte Lösung ist. Es ist jeweils nur eine Antwortmöglichkeit richtig. Nutze den Platz in der Box für Rechnungen sowie Begründungen und notiere deinen Antwortbuchstaben an der vorgesehenen Stelle am Ende jeder Box.

Aufgabe 1 Kreatives Experimentieren (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Für eine Experimentierchallenge werden dir an deinem Tisch ein Besenstiel, ein Bleistift, eine Stoppuhr sowie die Werte der auf dem Infoblatt enthaltenen Konstanten zur Verfügung gestellt.

Welche der folgenden Größen kannst du mit diesen Dingen experimentell bestimmen?

I - Länge des Besenstiels II - Masse des Bleistifts III - Schwerpunkte von Besenstiel und Bleistift

A nur I und II B nur I und III C nur II und III D alle drei Größen

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Länge des Besenstiels kann einigermaßen gut durch ein Fallexperiment bestimmt werden. Wenn die Zeit t gestoppt wird, die der Bleistift benötigt, um vom oberen Ende des Stiels bis zum unteren zu fallen, lässt sich aus dem Zusammenhang zwischen Fallstrecke und Fallzeit für den freien Fall die Länge ℓ des Besenstiels bestimmen. Mit der Schwerebeschleunigung $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ auf der Erde gilt

$$\ell = \frac{1}{2}\, g\, t^2 \,. \tag{1.1}$$

Ebenso lassen sich die Schwerpunkte von Besenstiel und Bleistift experimentell bestimmen, indem man einen der beiden auf dem anderen so platziert, dass er horizontal ausbalanciert ist. Der Auflagepunkt ist dann der Schwerpunkt.

Die Masse m des Bleistifts lässt sich mit den gegebenen Mitteln allerdings nicht experimentell bestimmen, da es keine Möglichkeit gibt, irgendeine Masse festzulegen.

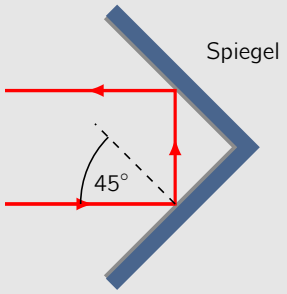
Das lässt sich auch formal zeigen: Gemessen werden können mit der Stoppuhr ausschließlich Zeiten. Daraus können über die Fallbeschleunigung g Längen ℓ bestimmt werden. Andere physikalische Größen sind nicht zugänglich. Eine beliebige Kombination von Länge und Zeit kann aber niemals eine Masseneinheit tragen. Daher lässt sich die Masse nicht experimentell bestimmen.

Korrekte Antwort: *B*

Bewertung - Kreatives Experimentieren (MC-Aufgabe)		**Punkte**
1	Erkennen und Begründen, dass die Länge des Besenstiels bestimmt werden kann	1.0
	Erkennen und Begründen, dass die Schwerpunkte bestimmt werden können	1.0
	Erkennen, dass die Masse nicht bestimmt werden kann	1.0
	Begründen, warum die Masse nicht bestimmt werden kann (z. B. über Dimensionsanalyse)	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

Aufgabe 2 Rechtwinklige Spiegel (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

Ein Lichtstrahl trifft, wie nebenstehend skizziert, unter einem Einfallswinkel von 45° auf einen Spiegel, der Teil einer rechtwinkligen Spiegelanordnung ist. Durch diese wird der Lichtstrahl parallel zum einfallenden Strahl zurückgeworfen.



Nun wird die Spiegelanordnung so im Uhrzeigersinn gedreht, dass der Einfallswinkel des Lichtstrahls 60° beträgt.

Wie verändert sich dadurch der ausfallende Lichtstrahl?

A Der ausfallende Strahl wird um 15° gedreht.

B Der ausfallende Strahl wird um 30° gedreht.

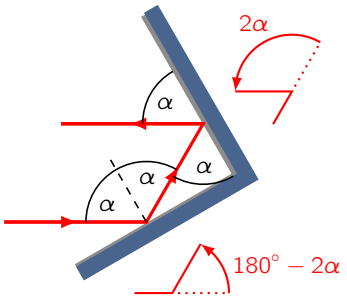
C Der ausfallende Strahl wird um 60° gedreht.

D Der ausfallende Strahl ist immer noch parallel zum einfallenden Strahl.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn ein Lichtstrahl, wie nebenstehend skizziert, unter einem Einfallswinkel α zum Lot auf einen der Spiegel einfällt, wird er um einen Winkel $180°-2\alpha$ aus seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Die Ablenkung erfolgt hier gegen den Uhrzeigersinn. Der abgelenkte Strahl trifft dann unter einem Einfallswinkel von $90°-\alpha$ auf den zweiten Spiegel und wird von diesem analog um einen Winkel $180° - 2\,(90° - \alpha) = 2\alpha$ gegen den Uhrzeigersinn abgelenkt.



Damit beträgt die Ablenkung der Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls nach Reflektion an den Spiegeln insgesamt $180° - 2\alpha + 2\alpha = 180°$. Im betrachteten Fall ist $\alpha = 60°$ Die Betrachtung ist aber, so lange der Lichtstrahl auf beide Spiegel trifft, vom Wert des Winkels unabhängig, so dass der ausfallende Lichtstrahl immer parallel zum einfallenden Strahl ist.

Korrekte Antwort: *D*

Bemerkung: Dieses Prinzip wird z. B. bei Reflektoren im Straßenverkehr ausgenutzt, die möglichst viel ankommendes Licht wieder in Richtung des Senders reflektieren sollen. Sogar auf dem Mond befinden sich Retroreflektoren, die das gleiche Prinzip nutzen und zur Entfernungsmessung verwendet wurden/werden.

Bewertung - Rechtwinklige Spiegel (MC-Aufgabe)		Punkte
2	Nachvollziehbares Veranschaulichen z. B. anhand einer Skizze	1.0
	Nutzen der Gleichheit von Einfalls- und Ausfallswinkel	1.0
	Bestimmen der Ablenkung am ersten Spiegel	1.0
	Bestimmen der Ablenkung am zweiten Spiegel	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

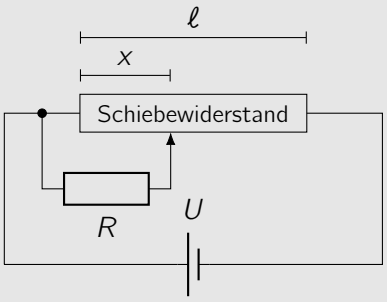
Bemerkung: Eine rein konstruktive Lösung ist in dieser Aufgabe natürlich auch möglich.

Aufgabe 3 Spannungsteiler (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Richard Reindl & Bernd Schade)

Ein Widerstand mit Widerstandswert $R = 20\,\Omega$ wird, wie nebenstehend skizziert, mit Hilfe eines Schiebewiderstandes in Spannungsteilerschaltung an eine Batterie mit Spannung $U = 10{,}0\,\mathrm{V}$ angeschlossen.

Der Schiebewiderstand besitzt eine Länge $\ell = 40\,\mathrm{cm}$ und einen Gesamtwiderstand $R_\mathrm{S} = 100\,\Omega$. Bei Abgriff in einer Entfernung x mit $0 \le x \le \ell$ vom linken Ende des Schiebewiderstandes besitzt der linke Teil des Schiebewiderstandes einen Widerstandswert von $\frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}$.



Wie groß ist die über dem Widerstand R abfallende Spannung für $x = 30\,\mathrm{cm}$?

A etwa 3,9 V B etwa 4,4 V C etwa 6,1 V D etwa 7,5 V

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn der Schiebewiderstand in der Entfernung x vom linken Ende abgegriffen wird, ergibt sich der Gesamtwiderstand $R_\mathrm{ges}(x)$ der Schaltung aus der Reihenschaltung des rechten Teilwiderstandes $\frac{\ell-x}{\ell} R_\mathrm{S}$ des Schiebewiderstandes mit der Parallelschaltung von R und dem linken Teilwiderstand $\frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}$, wie nebenstehend skizziert. Für $x = 30\,\mathrm{cm}$ ist $\frac{x}{\ell} R_\mathrm{S} = 75\,\Omega$ und $\frac{\ell-x}{\ell} R_\mathrm{S} = 25\,\Omega$.

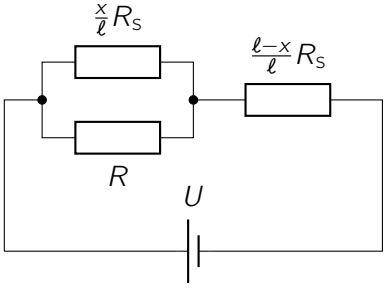


Abb. 1. *Ersatzschaltskizze des Spannungsteilers.*

Der Widerstand des Parallelteils beträgt

$$R_\mathrm{parallel}(x) = \left(\frac{1}{\frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}} + \frac{1}{R}\right)^{-1} = \frac{\frac{x}{\ell} R\, R_\mathrm{S}}{R + \frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}} \overset{x=30\,\mathrm{cm}}{\approx} 15{,}8\,\Omega\,. \tag{3.1}$$

Daraus folgt für den Gesamtwiderstand

$$R_\mathrm{ges}(x) = R_\mathrm{parallel}(x) + \tfrac{\ell-x}{\ell} R_\mathrm{S} = \frac{\frac{x}{\ell} R\, R_\mathrm{S}}{R + \frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}} + \tfrac{\ell-x}{\ell} R_\mathrm{S} = \frac{R_\mathrm{S}\left(R + \frac{x}{\ell} R_\mathrm{S} - \frac{x^2}{\ell^2} R_\mathrm{S}\right)}{R + \frac{x}{\ell} R_\mathrm{S}} \overset{x=30\,\mathrm{cm}}{\approx} 40{,}8\,\Omega\,. \tag{3.2}$$

Das Verhältnis der über dem Widerstand R in dieser Schaltung abfallenden Spannung $U_R(x)$ zur Gesamtspannung U ist nach der Spannungsteilerregel gleich dem Verhältnis des Parallelwiderstandes zum Gesamtwiderstand der Schaltung.

Damit ergibt sich

$$\boxed{U_R(x) = U\,\frac{R_\mathrm{parallel}(x)}{R_\mathrm{ges}(x)} = U\,\frac{\frac{x}{\ell} R}{R + \frac{x}{\ell} R_\mathrm{S} - \frac{x^2}{\ell^2} R_\mathrm{S}} = U\,\frac{\frac{x}{\ell} R}{R + \frac{x}{\ell}\left(1 - \frac{x}{\ell}\right) R_\mathrm{S}}}\,. \tag{3.3}$$

Mit den gegebenen Werten $R = 20\,\Omega$, $R_\mathrm{S} = 100\,\Omega$, $U = 10{,}0\,\mathrm{V}$ sowie $x/\ell = 30/40 = \frac{3}{4}$ folgt schließlich

$$\boxed{U_R(30\,\mathrm{cm}) = 10{,}0\,\mathrm{V}\,\frac{15}{20 + \frac{3}{16}\,100} \approx 3{,}9\,\mathrm{V}}\,. \tag{3.4}$$

Korrekte Antwort: *A*

Bemerkung: Antwortmöglichkeit B ergibt sich, wenn nur der Widerstand R in Reihe mit dem rechten Teil des Schiebewiderstandes betrachtet wird. Antwortmöglichkeit C ist die in der richtigen Schaltung über dem rechten Teil des Schiebewiderstandes abfallende Spannung von $10{,}0\,\mathrm{V} - 3{,}9\,\mathrm{V}$ und Antwortmöglichkeit D würde sich aus einer linearen Veränderung der Spannung mit dem Abgriff ergeben.

Bewertung - Spannungsteiler (MC-Aufgabe)		**Punkte**
3	Korrektes Verwenden der Regeln für Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen	0.5
	Nutzen des korrekten Widerstandes für den rechten Teils des Schiebewiderstandes	0.5
	Bestimmen eines Ausdrucks/Wertes für den Widerstand der Parallelschaltung (3.1)	1.0
	Bestimmen eines Ausdrucks/Wertes für den Widerstand der Gesamtschaltung (3.2)	1.0
	Nutzen der Spannungsteilerregel, um die Spannung über dem Widerstand zu erhalten (3.3)	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

Bemerkung: Anders als in dem vorgeschlagenen Lösungsweg können die konkreten Zahlenwerte natürlich auch schon früher eingesetzt werden, was die Rechnung verkürzt.

Aufgabe 4 Iglutemperatur (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

In einem Iglu kann es auch bei sehr kalten Außentemperaturen relativ „warm“ sein. Grund dafür sind die Wände aus Schnee, die viel Luft enthalten und so eine gute Isolation bilden.

Betrachte in dieser Aufgabe ein stark vereinfachtes Modell eines Iglus, bei dem dieser als halbkugelförmig mit einem Außendurchmesser von $D = 5{,}0\,\mathrm{m}$ und einer Wanddicke von $b = 50\,\mathrm{cm}$ betrachtet wird. Der Eingang wird dabei nicht mit berücksichtigt und es soll näherungsweise angenommen werden, dass die Innenfläche der Wände genau so groß ist wie die Außenfläche. Gehe außerdem davon aus, dass der Iglu Wärme nur über die Wände und nicht über den Boden abgibt. Für die Wärmeleitfähigkeit des Schnees kannst du den Wert $\lambda = 0{,}30\,\mathrm{W\,K^{-1}\,m^{-1}}$ verwenden und annehmen, dass der Übergang zwischen Schnee und Luft ohne nennenswerten Wärmewiderstand erfolgt.



Abb. 2. *Bild eines Iglu (PhysikOlympiade, KI-generiert mit ChatGPT (OpenAI), 2026).*

Im Inneren des Iglus erzeugen die darin befindlichen Personen und andere Wärmequellen eine Wärmeleistung von 700 W.

Welche Innentemperatur ist im Iglu in einer arktischen Winternacht mit einer konstanten Außentemperatur von $-40\,^\circ\mathrm{C}$ nach diesem Modell zu erwarten?

A etwa $-10\,^\circ\mathrm{C}$ B etwa $-5\,^\circ\mathrm{C}$ C etwa $0\,^\circ\mathrm{C}$ D etwa $5\,^\circ\mathrm{C}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Bei der sich einstellenden Temperatur T im Iglu ist die erzeugte Wärmeleistung gleich der vom Iglu an die Umgebung der Temperatur $T_0 = -40\,^\circ\mathrm{C}$ abgegebenen Wärmeleistung. Die im Inneren erzeugte Wärme wird dabei durch die Wand nach außen transportiert.

Für die durch die Wand transportierte Wärmeleistung $\dot{Q}$ gilt bei einer stationären Temperaturverteilung die Wärmeleitungsgleichung[a]

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{b} \Delta T \,. \tag{4.1}$$

Dabei gibt $\Delta T = T - T_0$ die Differenz zwischen der Temperatur im Iglu und der Außentemperatur an und A ist die Fläche, über die der Iglu mit der Umgebung im Kontakt steht, in diesem Fall also die Oberfläche einer Halbkugel mit Durchmesser D, so dass $A = 1/2\,\pi\,D^2$.

Umstellen von (4.1) zur Temperaturdifferenz ergibt

$$\boxed{\Delta T = \dot{Q}\,\frac{b}{\lambda\,A} = \dot{Q}\,\frac{2\,b}{\pi\,\lambda\,D^2} \approx 700\,\mathrm{W}\,\frac{2\cdot 0{,}50\,\mathrm{m}}{\pi\,0{,}30\,\mathrm{W\,K^{-1}\,m^{-1}}\cdot 25{,}0\,\mathrm{m^2}} \approx 30\,\mathrm{K}} \,. \tag{4.2}$$

Im Iglu stellt sich demnach eine Temperatur von etwa $-10\,^\circ\mathrm{C}$ ein - immer noch ziemlich kalt.

Korrekte Antwort: *A*

[a] Wenn die aufgrund der Wanddicke unterschiedlichen Oberflächen innen und außen berücksichtigt werden, gilt diese einfache Form der Gleichung nicht mehr. In der Aufgabe werden die Flächen aber als näherungsweise gleich angenommen.

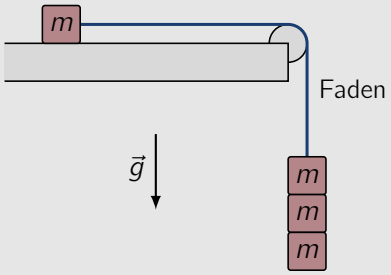
Bewertung - Iglutemperatur (MC-Aufgabe)		**Punkte**
4	Erkennen der Gleichheit zwischen produzierter und abgegebener Wärmeleistung	1.0
	Angeben der Wärmeleitungsgleichung (4.1)	1.0
	Angeben eines korrekten Ausdrucks für die (Halbkugel-)oberfläche	1.0
	Umformen zu einem Ausdruck für die Temperaturdifferenz (4.2)	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

Bemerkung: Sollten Teilnehmende aufgrund der Wanddicke einen anderen Durchmesser, wie z. B. einen mittleren Durchmesser von 4,5 m, angenommen haben und damit folgerichtig gerechnet haben, wird das Ergebnis auch bei anderer Antwort als korrekt bewertet.

Aufgabe 5 Fallende Klötze (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Ein Metallklotz der Masse m liegt, wie rechts gezeigt, auf einem Tisch. Über einen Faden, der reibungsfrei an der Tischkante umgelenkt wird, ist er mit drei weiteren identischen Klötzen verbunden, die an dem Faden hängen. Du kannst die Masse des Fadens vernachlässigen und annehmen, dass sich der Faden nicht dehnt. Verwende für die Fallbeschleunigung auf der Erde den Wert $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$.



Werden die hängenden Klötze losgelassen, beginnen sie nach unten zu fallen. Der Graph zeigt die Fallstrecke s in Abhängigkeit von der Zeit t nach dem Loslassen.

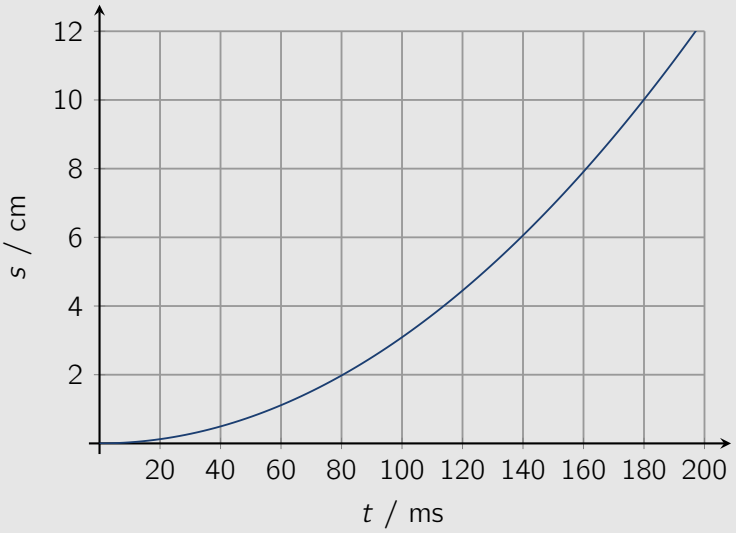
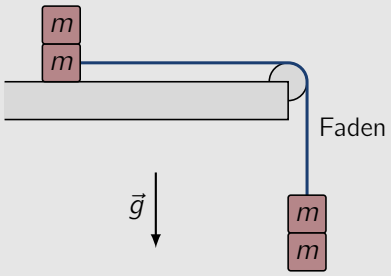
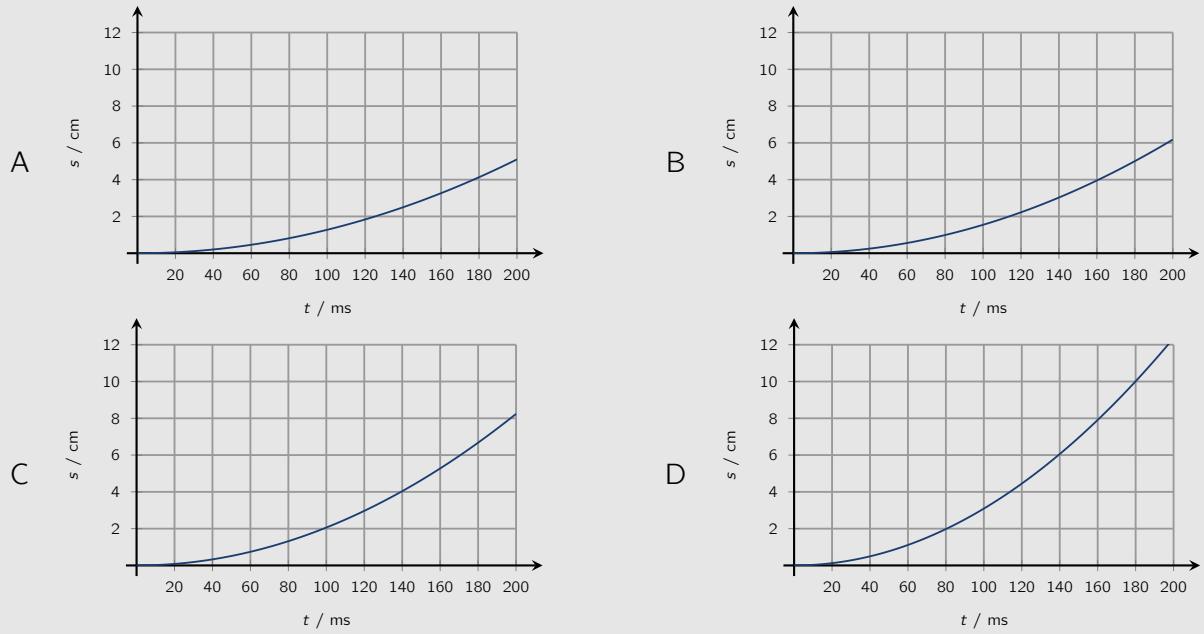


Abb. 3. *Fallstrecke s der Klötze in Abhängigkeit von der Fallzeit t.*

Nun wird einer der hängenden Klötze abgenommen und auf den Klotz auf den Tisch gestellt, wie nebenstehend gezeigt. Der Versuch wird mit dieser Anordnung der Klötze wiederholt.



Welcher der folgenden Graphen stellt für diesen Fall die Fallstrecke als Funktion der Fallzeit korrekt dar?



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Klötze sind aus Metall und die Fallbewegung wird nur für einen kurzen Zeitraum nach dem Loslassen untersucht, so dass die Luftreibung vernachlässigt werden kann. Auf die Klötze wirken daher im Wesentlichen drei äußere Kräfte: die Gewichtskraft, die Reaktionskraft des Tisches, die die Gewichtskraft der Klötze auf dem Tisch kompensiert sowie die (Gleit-)Reibungskraft, die gleich dem Produkt der Gewichtskraft der auf dem Tisch rutschenden Klötze und dem Gleitreibungskoeffizienten μ zwischen Klotz- und Tischoberfläche ist.

Diese Kräfte sind konstant, so dass die Bewegung der Klötze gleichmäßig beschleunigt ist, wie man auch aus den Graphen vermuten kann.

Konfiguration 1 - In der ersten Konfiguration ergibt sich die Beschleunigung a_1 des Falls aus der Bewegungsgleichung

$$3\,m\,g - \mu\,m\,g = 4\,m\,a_1\,. \tag{5.1}$$

Auf der linken Seite stehen die beschleunigenden Kräfte: Die Gewichtskraft der drei hängenden Klötze abzüglich der durch den Faden vermittelten Gleitreibungskraft des auf dem Tisch rutschenden Klotzes. Auf der rechten Seite ist die durch die Kräfte hervorgerufene Beschleunigung angegeben. Dabei muss beachtet werden, dass alle vier Klötze gleichermaßen beschleunigt werden, so dass die insgesamt beschleunigte Masse $4\,m$ beträgt.

Daraus ergibt sich für die Beschleunigung

$$\boxed{a_1 = \frac{1}{4}\,(3-\mu)\,g}\,. \tag{5.2}$$

Mit dem gegebenen Graphen lässt sich erkennen, dass die Gleitreibung nicht vernachlässigt werden darf, denn für $\mu = 0$ würde sich zum Zeitpunkt $t = 180\,\text{ms}$ mit (5.2) eine Fallstrecke von $s_1(t) = \frac{1}{2}\,\frac{3}{4}\,g\,t^2 \approx 11{,}9\,\text{cm}$ ergeben, was nicht zu dem aus dem Graphen abzulesenden Wert von $s_1(180\,\text{ms}) = 10{,}0\,\text{cm}$ passt.

Tatsächlich lässt sich aus diesem Wert mit Hilfe von (5.2) der Wert des Reibungskoeffizienten μ bestimmen. Aus

$$s_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} (3 - \mu)\, g\, t^2 \qquad \text{folgt} \qquad \boxed{\mu = 3 - \frac{8\, s_1(t)}{g\, t^2} = 3 - \frac{8 \cdot 0{,}100\,\mathrm{m}}{9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}} \cdot (0{,}180\,\mathrm{s})^2} \approx 0{,}48} \,. \quad (5.3)$$

Konfiguration 2 - Analog zu (5.1) ergibt sich die Beschleunigung a_2 des Falls aus der Bewegungsgleichung

$$2\, m\, g - 2\, \mu\, m\, g = 4\, m\, a_2\,, \qquad \text{so dass} \qquad \boxed{a_2 = \frac{1}{2} (1 - \mu)\, g \approx 0{,}26\, g} \,. \quad (5.4)$$

Für die Fallstrecke nach der Zeit $t = 180\,\mathrm{ms}$ ergibt sich damit

$$s_2(t) = \frac{1}{2}\, a_2\, t^2 \approx \frac{1}{2} \cdot 0{,}26 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}\, (0{,}180\,\mathrm{s})^2 \approx 4{,}1\,\mathrm{cm}\,. \quad (5.5)$$

Damit kann nur der Graph A die Fallstrecke der Klötze als Funktion der Fallzeit korrekt darstellen.

Korrekte Antwort: *A*

Bemerkung 1: Die Aufgabe lässt sich auch ohne Bestimmen des Reibungskoeffizienten lösen. Aus (5.2) und (5.4) ergibt sich $2\, a_1 - a_2 = \frac{g}{2}(3 - \mu - (1 - \mu)) = g$ und damit $a_2 = 2\, a_1 - g$. Da die Fallstrecke proportional zur Beschleunigung ist, ergibt sich nach $t = 180\,\mathrm{ms}$ für die Fallstrecke $s_2(t) = 2\, s_1(t) - \frac{1}{2}\, g\, t^2 \approx 4{,}1\,\mathrm{cm}$, was ebenfalls auf Antwort A führt.

Bemerkung 2: Antwortmöglichkeit B ergibt sich, wenn nur die Bremskraft verdoppelt, nicht aber berücksichtigt wird, dass sich auch die beschleunigende Gewichtskraft ändert. Antwortmöglichkeit C folgt, wenn keine Reibung und nur die beschleunigende Gewichtskraft von 2/3 des vorherigen Wertes berücksichtigt wird. Antwortmöglichkeit D würde sich mit der Annahme ergeben, dass sich die Beschleunigung durch die Umordnung der Klötze gar nicht ändert.

Bewertung - Fallende Klötze (MC-Aufgabe)		**Punkte**
5	Erkennen von Gewichtskraft und Gleitreibungskraft als relevante Kräfte	0.5
	Verwenden des korrekten Ausdrucks für die Reibungskraft	0.5
	Unterscheiden zwischen beschleunigender (hängender) und beschleunigter Masse	1.0
	Bestimmen der Beschleunigung in Konfiguration 1 (5.2)	0.5
	Bestimmen der Beschleunigung in Konfiguration 2 (5.4)	0.5
	Nutzen von Werten aus den Graphen zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten (5.3) und der Fallstrecke (5.5) oder zur Beurteilung der Antworten analog zu Bemerkung 1	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

Aufgabe 6 Pixeldichte (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Thomas Hellerl)

Die Pixelanordnung auf dem Display eines Smartphones kann als quadratisches, optisches Kreuzgitter verstanden werden. Ein Smartphone mit Bildschirmdiagonale 5,90 Zoll = 15,0 cm im Format 21:9, das um 45° gegen die Horizontale gekippt wurde, wird senkrecht von oben mit einem grünen Laser der Wellenlänge $\lambda = 532\,\text{nm}$ beleuchtet. Der reflektierte Strahl fällt senkrecht auf eine Wand. An der Wand sieht man neben dem intensiven Reflex der Laserstrahls auch ein regelmäßiges, rechteckiges Punktmuster, wie in der Abbildung gezeigt. Das Smartphone wirkt dabei als Reflexionsgitter. Der horizontale Abstand des Reflexionspunktes auf dem Display von der Wand beträgt $a = 88{,}5\,\text{cm}$.

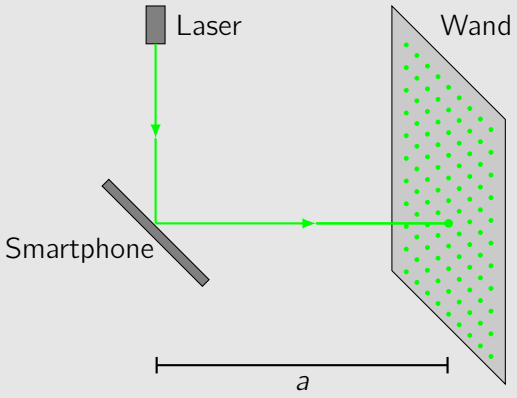


Abb. 4. *Skizze des Versuchs.*

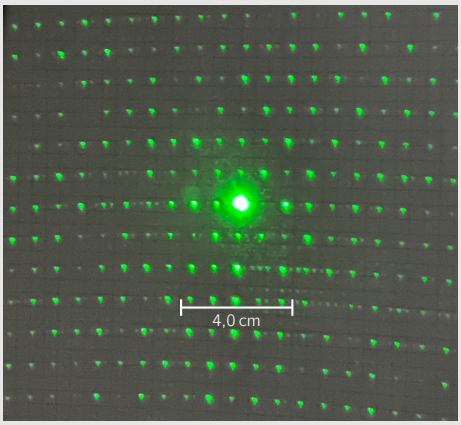


Abb. 5. *Foto des Punktmusters an der Wand mit Maßstab (Länge* 4,0 cm*).*

Wie groß ist die Gesamtanzahl N der Pixel auf dem Smartphonedisplay?

A etwa $1{,}1 \cdot 10^6$ B etwa $2{,}5 \cdot 10^6$ C etwa $5{,}2 \cdot 10^6$ D etwa $6{,}9 \cdot 10^6$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

In dem Foto lässt sich für 19 Punktabstände an der Wand eine horizontale Strecke von $(15{,}7 \pm 0{,}1)\,\text{cm}$ bestimmen. Der horizontale Abstand zweier Punkte ab der Wand ist also

$$d = \frac{15{,}7\,\text{cm}}{19} \approx 8{,}26\,\text{mm}\,. \tag{6.1}$$

Der horizontale Abstand zwischen zwei Punkten steht bei kleinen Ablenkwinkeln für das Maximum erster Ordnung der Interferenz des Laserlichts am horizontalen Teil des Gitters, das der Laserstrahl unverzerrt sieht. Für ein Interferenzmaximum muss die folgende Bedingung gelten:

$$\lambda = g \sin\alpha = g \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{a}\right)\right) \approx \frac{g\,d}{a}\,. \tag{6.2}$$

Dabei bezeichnen g den Pixelabstand am Display α den Winkel zwischen dem reflektierten Strahl und dem Strahl zum Maximum erster Ordnung, a den Abstand des Smartphones zum Schirm und λ die Lichtwellenlänge. Die letzte Umformung ist für kleine Winkel möglich, für die $\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx \alpha$ gilt.

Aus (6.2) ergibt sich für die Gitterkonstante g

$$g = \frac{\lambda}{\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{a}\right)\right)} \approx \frac{\lambda\, a}{d} \approx \frac{5{,}32 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m} \cdot 0{,}885\,\mathrm{m}}{8{,}26 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}} \approx 5{,}70 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m}\,. \tag{6.3}$$

Um die Pixelanzahl zu erhalten, müssen Höhe h und Breite b des Displays bestimmt werden. Bezeichne die Bildschirmdiagonale mit D. Dann gilt

$$D^2 = h^2 + b^2 = \frac{21^2}{9^2} b^2 + b^2 = \frac{522}{81} b^2\,, \tag{6.4}$$

und damit

$$b = \sqrt{\frac{81}{522}}\, D \approx 0{,}394 \cdot D \approx 5{,}91\,\mathrm{cm}\,. \tag{6.5}$$

Daraus ergibt sich die Pixelzahl N durch

$$\boxed{N = \frac{b \cdot \frac{21}{9} b}{g^2} = \frac{\frac{21}{9} b^2}{g^2} \approx 2{,}51 \cdot 10^6}\,. \tag{6.6}$$

Korrekte Antwort: *B*

Bewertung - Pixeldichte (MC-Aufgabe)		**Punkte**
6	Bestimmen des Punktabstandes (6.1) aus dem Abstand von mind. 5 Pkt. auf dem Foto	1.0
	Verwenden der Interferenzbedingung (6.2)	1.0
	Korrektes Bestimmen des Wertes der Gitterkonstanten (6.3)	1.0
	Berechnen der Seitenlänge(n) des Displays (6.5)	1.0
	Angeben des korrekten Ergebnisses	1.0
		5.0

Aufgabe 7 Punktladungen (MC-Aufgabe) (5.0 Pkt.)

(Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Die linke Abbildung unten zeigt das elektrische Feld einer positiven Punktladung Q an Positionen, die auf einem konzentrischen Kreis um die Ladung liegen.

Die rechte Abbildung zeigt das elektrische Feld an den gleichen Positionen für den Fall, dass zusätzlich eine zweite positive Punktladung an einer unbekannten Position in der Papierebene vorhanden ist. Die beiden Abbildungen besitzen den gleichen Maßstab und die Pfeillängen sind proportional zur elektrischen Feldstärke an den jeweiligen Punkten.

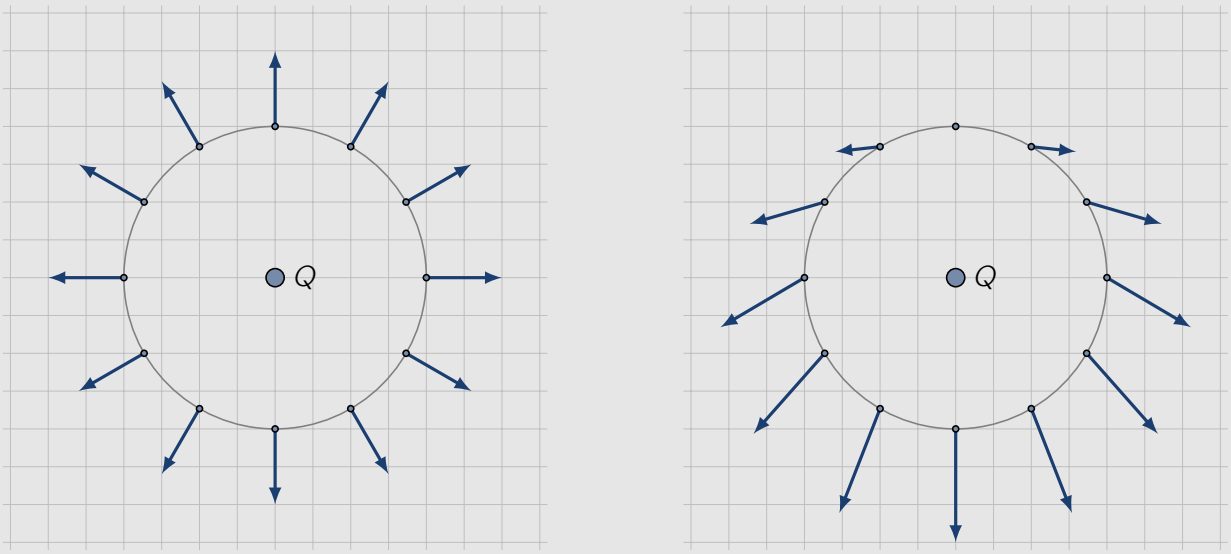


Abb. 6. *Skizze des elektrischen Feldes auf einem Kreis für eine positive Punktladung im Zentrum (links) und mit einer zusätzlichen positiven Ladung an unbekannter Position (rechts).*

Wie groß ist die Ladung der zweiten Punktladung?

A etwa Q B etwa $4\,Q$ C etwa $17\,Q$ D etwa $23\,Q$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

In der linken Abbildung ist das radialsymmetrische elektrische Feld einer Punktladung zu erkennen. Für die durch die Ladung Q auf dem Kreis erzeugte elektrische Feldstärke E gilt betragsmäßig

$$E = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{Q}{r^2}\,, \tag{7.1}$$

wobei r den Radius des Kreises bezeichnet.

In der rechten Abbildung ist ersichtlich, dass sich die beiden Beiträge zum elektrischen Feld von den beiden positiven Punktladungen im obersten Punkt des Kreises aufheben. Dies ist nur möglich, wenn die zweite positive Ladung in der Blattebene oberhalb der ersten liegt. Bezeichne mit Q' die Ladung der zweiten Punktladung und mit r' ihren Abstand von der ersten. Dann muss $r' > r$ gelten, damit sich die Beiträge für das elektrische Feld aufheben können. Genauer muss am oberen Punkt des Kreises gelten

$$E = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{Q'}{(r'-r)^2}\,. \tag{7.2}$$

Allerdings ist der Abstand r' nicht frei wählbar, sondern muss auch zu dem korrekten elektrischen Feld für andere Punkte auf dem Kreis führen.

Am unteren Punkt des Kreises addieren sich die Beiträge der beiden Ladungen zu einem elektrischen Feld, das, abgelesen an der Länge der Pfeile in den Abbildungen, einen Faktor $k = 1{,}5$ mal so groß ist, wie das durch die einzelne Ladung hervorgerufene Feld. Daher ist

$$k\,E = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{Q}{r^2} + \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{Q'}{(r'+r)^2}\,. \tag{7.3}$$

Aus (7.2) und (7.3) ergeben sich die Bedingungen

$$\frac{Q}{r^2} = \frac{Q'}{(r'-r)^2} \qquad \text{sowie} \qquad \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{k-1}\,\frac{Q'}{(r'+r)^2}\,. \tag{7.4}$$

Gleichsetzen und Umformen führt auf die quadratische Gleichung

$$0 = r'^2 + 2\,\frac{k}{k-2}\,r\,r' + r^2\,. \tag{7.5}$$

Damit lässt sich der Abstand r' bestimmen zu

$$r' = r\left\{-\frac{k}{k-2} \pm \sqrt{\left(\frac{k}{k-2}\right)^2 - 1}\right\} = r\left(3+\sqrt{8}\right) \approx 5{,}8\,r\,, \tag{7.6}$$

wobei sich der Wert mit $k = 1{,}5$ ergibt. Die Lösung mit dem „$-$“ ist nicht möglich, da dann $r' < r$ wäre.

Einsetzen von (7.6) in die linke Gleichung in (7.4) ergibt schließlich für die Ladung

$$\boxed{Q' = Q\left(\frac{r'-r}{r}\right)^2 = Q\left(2+\sqrt{8}\right)^2 = 4\,Q\left(1+\sqrt{2}\right)^2 \approx 23\,Q}\,. \tag{7.7}$$

Korrekte Antwort: *D*

Bewertung - Punktladungen (MC-Aufgabe)		**Punkte**
7	Korrektes Verwenden des elektrischen Feldes einer Punktladung (7.1)	0.5
	Erkennen, dass sich die Felder am oberen Punkt des Kreises aufheben	0.5
	Aufstellen einer resultierenden Bedingung für die Felder (7.2)	0.5
	Betrachten des Feldes am unteren Punkt des Kreises und Ablesen der (relativen) Feldstärke aus der Abbildung	0.5
	Aufstellen einer resultierenden Bedingung für die Felder (7.3)	0.5
	Zusammenführen der Bedingungen und Aufstellen einer quadratischen Gleichung (7.5)	0.5
	Bestimmen eines Ausdruckes für den Abstand der Ladungen (7.6)	1.0
	Angeben der korrekten Lösung	1.0
		5.0

Bemerkung: Es ist gut möglich, dass Teilnehmende andere Wege gehen, um die zweite Ladung zu bestimmen. Das sollte bei korrekter Durchführung ebenfalls zur Maximalpunktzahl führen können.

Langaufgaben

Bearbeite die folgenden zwei Aufgaben ebenfalls in den dafür vorgesehenen Boxen. Anders als bei den Multiple-Choice Aufgaben sind keine Lösungsmöglichkeiten gegeben. Beschreibe deinen Lösungsweg so, dass er gut nachvollziehbar aber nicht unnötig lang ist. Wenn du also zum Beispiel den Energieerhaltungssatz verwendest, schreibe dies kurz hin.

Aufgabe 8 Heiße Schienen im Wilden Westen (17.0 Pkt.)

Arizona, Ende des 19. Jahrhunderts - Eine trockene Wüstenregion soll durch eine neue Eisenbahnlinie erschlossen werden.

Schienenausdehnung

Am frühen Morgen werden dazu Eisenbahnschienen aus Stahl bei einer Temperatur von $T_0 = 15\,°\mathrm{C}$ verlegt. Jede Schiene besitzt eine Länge von $L_0 = 12{,}0\,\mathrm{m}$. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schienen lassen die Arbeiter einen Dehnungsspalt der Breite $s = 4{,}0\,\mathrm{mm}$. Bis zum Nachmittag heizt die intensive Sonneneinstrahlung die Schienen auf $T_1 = 55\,°\mathrm{C}$ auf. Durch die Erhitzung dehnen sich die Schienen aus. Die auftretende relative Längenänderung ε lässt sich näherungsweise mit Hilfe des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α in Abhängigkeit von der Temperaturänderung ΔT bestimmen durch

$$\varepsilon = \alpha\,\Delta T\,.$$

Verwende für den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl den Wert $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1}$.

8.a) Bestimme die Temperatur T, bei der sich die Schiene gerade so weit ausgedehnt hat, dass der Dehnungsspalt vollständig geschlossen ist. *(2.0 Pkt.)*

Nachdem der Dehnungsspalt geschlossen ist, wird die weitere Ausdehnung zunächst verhindert und es entsteht eine mechanische Spannung in den Schienen. Für nicht zu große Spannungen verhält sich die Schiene dabei wie eine gestauchte Feder und die Spannung kann durch das Hookesche Gesetz mit einer Längenänderung in der folgenden Form

$$\sigma = E\,\varepsilon$$

verknüpft werden. Dabei bezeichnet σ die Spannung, also die auf die Schiene pro Querschnittsfläche wirkende Kraft, und E den Elastizitätsmodul von Stahl, für den der Wert $E = 210\,\mathrm{GPa}$ angenommen werden kann.

8.b) Berechne die Spannung σ, die in der Schiene durch das weitere Aufheizen der Schiene entsteht. *(2.0 Pkt.)*

Bei hinreichend hohen Temperaturen wird die Spannung so groß, dass die Schiene beginnt, sich zu verformen. Betrachte ein stark vereinfachtes Modell des Verhaltens zweier Schienen, wie nebenstehend skizziert. Nimm an, dass der Kontaktpunkt der Schienen nach dem Schließen des Spaltes sofort seitlich ausweicht, während die Schienen selbst gerade bleiben. Die beiden anderen Enden der Schienen können als ortsfest angenommen werden.

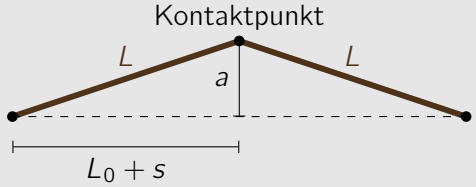


Abb. 7. *Stark vereinfachtes Modell der Schienenverformung.*

8.c) Bestimme die maximale seitliche Auslenkung a des Kontaktpunktes der beiden Schienen bei der gegebenen Temperaturänderung. *(2.0 Pkt.)*

Fata Morgana

An manchen Tagen beobachten die Arbeiter in der Mittagspause in einiger Entfernung Spiegelungen am Wüstenboden, die wie ein nasser Fleck aussehen, in dem sich Objekte spiegeln.

Dieses als Fata Morgana bekannte Phänomen kann auftreten, wenn die Luft am Boden heißer ist als die darüberliegende. Nimm an, dass die Luft aus isothermen Schichten aufgebaut ist, die immer parallel zum Boden verlaufen. Für den Brechungsindex n der Luft gilt, dass $n-1$ proportional zur Dichte der Luft ist.

8.d) Skizziere in der folgenden Abbildung den Weg zweier Lichtstrahlen vom Schornstein der Lokomotive zum Auge des Arbeiters: einmal den direkten Lichtweg, und einmal einen Lichtweg, der zur Fata Morgana gehört. *(2.0 Pkt.)*

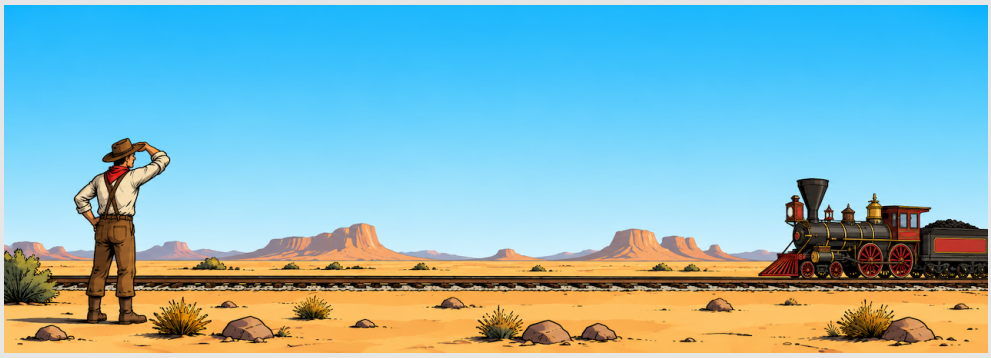


Abb. 8. *Skizze für Lichtwege (PhysikOlympiade, KI-generiert mit ChatGPT (OpenAI), 2026).*

Bei einem Luftdruck von $p = 1\,\mathrm{atm} \approx 1 \cdot 10^5\,\mathrm{N\,m^{-2}}$ und einer Temperatur von 20 °C betragen die Dichte von Luft $\rho(20\,^\circ\mathrm{C}) = 1{,}204\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ und der Brechungsindex $n(20\,^\circ\mathrm{C}) = 1 + 2{,}92 \cdot 10^{-4}$.

8.e) Behandle Luft wie ein ideales Gas und bestimme die Dichte sowie den Brechungsindex von Luft für die Temperaturen 30 °C sowie 55 °C bei Atmosphärendruck. *(4.0 Pkt.)*

Nimm an, dass sich die Augen eines Arbeiters etwa 1,5 m über dem Boden befinden und dass die Lufttemperatur in dieser Höhe 30 °C beträgt. Die Bodentemperatur kann weiter zu 55 °C angenommen werden.

8.f) Bestimme die minimale horizontale Entfernung d vom Arbeiter, in der für ihn der nasse Fleck auf dem Boden erscheint. *(5.0 Pkt.)*

Lösung

8.a)

Rechnungen und Erläuterungen

Die lineare Wärmeausdehnung ΔL einer Schiene bei der Temperaturänderung $\Delta T = T - T_0$ ist gegeben durch

$$\Delta L = \alpha\, L_0\, \Delta T\,. \tag{8.1}$$

Es kann angenommen werden, dass sich jede Schiene gleichmäßig in beide Längsrichtungen ausdehnt, so dass die Verlängerung an einem Ende nur der Hälfte dieses Wertes entspricht. Gleichzeitig dehnt sich aber auch die benachbarte Schiene in den Dehnungsspalt aus. Daher muss sich jedes Schienenende nur bis zur Hälfte des Dehnungsspaltes ausdehnen, bevor dieser vollständig

geschlossen ist. Für die gesuchte Temperatur ergibt sich damit durch Umstellen von (8.1)

$$\boxed{T = T_0 + \frac{s/2}{\alpha\, L_0/2} = 15\,^\circ\mathrm{C} + \frac{4{,}0 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}}{12 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1} \cdot 12{,}0\,\mathrm{m}} \approx 15\,^\circ\mathrm{C} + 28\,^\circ\mathrm{C} = 43\,^\circ\mathrm{C}}\,. \tag{8.2}$$

8.b)

Rechnungen und Erläuterungen

Nach dem Schließen des Spaltes steigt die Temperatur noch um

$$\Delta T_{\mathrm{rest}} = 55\,^\circ\mathrm{C} - 43\,^\circ\mathrm{C} \approx 12\,\mathrm{K}. \tag{8.3}$$

Die bei freier Ausdehnung zugehörige relative thermische Dehnung wäre

$$\varepsilon_{\mathrm{rest}} = \alpha\, \Delta T_{\mathrm{rest}}\,. \tag{8.4}$$

Wird diese Dehnung verhindert, entsteht nach dem Hookeschen Gesetz eine Spannung mit dem Betrag

$$\boxed{\sigma = E\, \varepsilon_{\mathrm{rest}} = 210 \cdot 10^9\,\mathrm{Pa} \cdot 12 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1} \cdot 12\,\mathrm{K} \approx 3{,}0 \cdot 10^7\,\mathrm{Pa} = 30\,\mathrm{MPa}}\,. \tag{8.5}$$

8.c)

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn der Spalt gerade geschlossen ist, beträgt der Abstand der Endpunkte einer Schiene $L_0 + s = L_0\,(1 + s/L_0) = 12{,}004\,\mathrm{m} \approx (1 + 3{,}33 \cdot 10^{-4})\,L_0$. Die Länge L der vollständig erwärmten Schiene beträgt hingegen

$$L = L_0\,(1 + \alpha\,(T_1 - T_0)) \approx (1 + 4{,}8 \cdot 10^{-4})\,L_0 \approx 12{,}005\,76\,\mathrm{m}\,. \tag{8.6}$$

Für die seitliche Auslenkung a gilt nun mit dem Satz des Pythagoras

$$\boxed{a = \sqrt{L^2 - (L_0 + s)^2} = L_0 \sqrt{(1 + \alpha\,(T_1 - T_0))^2 - (1 + s/L_0)^2} \approx 21\,\mathrm{cm}}\,. \tag{8.7}$$

8.d)

Skizze aus der Aufgabe

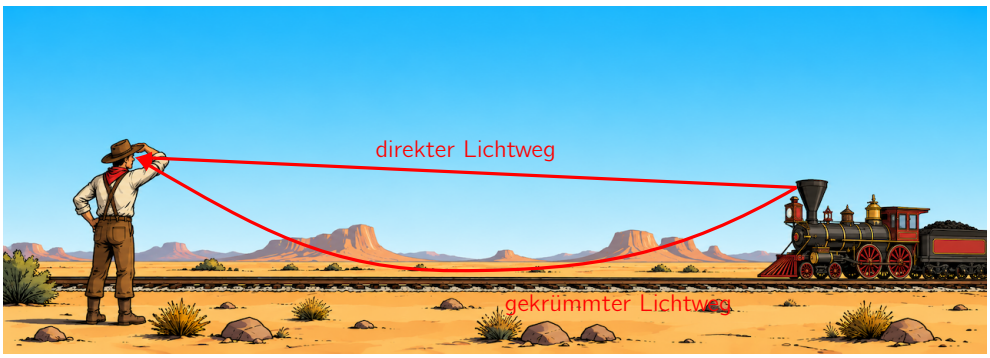


Abb. 9. *Skizze mit Lichtwegen.*

8.e)

Rechnungen und Erläuterungen

Die Luftdichte $\rho(T)$ ist bei konstantem Druck nach der idealen Gasgleichung invers proportional zur Temperatur, d.h. sie lässt sich ausdrücken durch $\rho(T) = \kappa/T$, wobei sich die Konstante κ aus dem gegebenen Wert für $\rho(20\,^\circ\mathrm{C})$ bestimmen lässt. Es ist

$$\rho(20\,^\circ\mathrm{C}) = 1{,}204\,\mathrm{kg\,m^{-3}} = \frac{\kappa}{293{,}15\,\mathrm{K}}\,. \tag{8.8}$$

Daraus folgt für die Konstante

$$\kappa = 1{,}204\,\mathrm{kg\,m^{-3}} \cdot 293{,}15\,\mathrm{K} \approx 353\,\mathrm{kg\,K\,m^{-3}}\,. \tag{8.9}$$

Nach den Angaben in der Aufgabenstellung ist außerdem $n - 1$ proportional zur Dichte, woraus für den Brechungsindex folgt

$$n(T) = 1 + \delta \cdot \rho(T) \qquad \text{mit} \qquad \delta = \frac{n(20\,^\circ\mathrm{C}) - 1}{\rho(20\,^\circ\mathrm{C})} \approx 2{,}43 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}}\,. \tag{8.10}$$

Daraus lassen sich die gesuchten Dichten und Brechungsindizes bestimmen zu

$$\boxed{\begin{aligned} \rho(30\,^\circ\mathrm{C}) &= 1{,}164\,\mathrm{kg\,m^{-3}} & n(30\,^\circ\mathrm{C}) &= 1 + 2{,}82 \cdot 10^{-4} \\ \rho(55\,^\circ\mathrm{C}) &= 1{,}076\,\mathrm{kg\,m^{-3}} & n(55\,^\circ\mathrm{C}) &= 1 + 2{,}61 \cdot 10^{-4} \end{aligned}}\,. \tag{8.11}$$

8.f)

Rechnungen und Erläuterungen

Der von schräg oben einfallende Lichtstrahl durchläuft horizontale Luftschichten mit verschiedenen Dichten und damit Brechungsindizes. Von oben bis zum Boden nimmt die Temperatur zu, so dass die Dichte und der Brechungsindex abnehmen. Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz wird der Lichtstrahl daher beim Lichtweg von oben zum Boden vom Lot weg und beim Lichtweg nach oben zum Lot hin gebrochen. Dabei bleibt nach dem Brechungsgesetz das Produkt $n \sin\alpha$ aus Brechungsindex und Sinus des Lotwinkels über den gesamten Weg konstant.

Von oben kommend nähert sich der Lichtstrahl so lange dem Boden, bis er beim Übergang zur darunterliegenden optisch dünneren Schicht Totalreflexion erfährt und nach oben zurückgeworfen wird. Die minimale Entfernung zum Beobachter, in der das erste Mal eine Fata Morgana zu sehen ist, ergibt sich, wenn die Totalreflexion direkt am Boden stattfindet.

Der totalreflektierte Lichtstrahl trifft von schräg unten in das Auge des Betrachters. Bezeichne mit α den Lotwinkel, unter dem der Lichtstrahl auf die horizontale Luftschicht auf Höhe des Auges des Beobachters trifft. Dann liefert das Brechungsgesetz mit $n_\mathrm{o} := n(30\,^\circ\mathrm{C})$ und $n_\mathrm{u} := n(55\,^\circ\mathrm{C})$

$$n_\mathrm{o} \sin\alpha = n_\mathrm{u} \sin 90^\circ = n_\mathrm{u}\,. \tag{8.12}$$

Dieses Ergebnis nutzt lediglich die Konstanz des Produktes $n \sin\alpha$ bei Brechungen an Übergängen zwischen optischen Medien und ist unabhängig davon, wie die Schichtung der Luftschichten im Detail aussieht.

Für den Arbeiter erscheint das Bild unter dem Winkel α. Für die Entfernung d gilt damit die geometrische Beziehung

$$\sin\alpha = \frac{d}{\sqrt{h^2 + d^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{d^2} + 1}}\,, \tag{8.13}$$

wobei h die Höhe der Augen des Arbeiters über dem Boden angibt.

Kombinieren von (8.12) mit (8.13) und Auflösen liefert den gesuchten Abstand

$$\boxed{d = \frac{h}{\sqrt{\frac{n_o^2}{n_u^2} - 1}} \approx 2{,}3 \cdot 10^2\,\mathrm{m}}\,, \tag{8.14}$$

so dass die Luftspiegelungen auf dem Boden in einer Entfernung von etwa 230 m beginnen.

Bemerkung: Der Teil der Aufgabe zur thermischen Ausdehnung wurde mit Hilfe von ChatGPT (Modell: GPT-5.6 Sol) formuliert. Weitere Erklärungen zu einer Fata Morgana finden sich z. B. auf LEIFIphysik unter www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung/ausblick/fata-morgana.

Bewertung - Heiße Schienen im Wilden Westen		**Punkte**
8.a)	Nutzen des korrekten Zusammenhanges für lineare Wärmeausdehnung (8.1)	0.5
	Verwenden des korrekten Wertes für Längenänderung	0.5
	Bestimmen der Temperatur T (8.2)	1.0
8.b)	Bestimmen der zusätzlichen Temperaturerhöhung (8.3)	1.0
	Bestimmen der Spannung σ (8.5)	1.0
8.c)	Bestimmen der Länge der vollständig erwärmten Schiene (8.6)	0.5
	Geometrische Betrachtung und Nutzen des Satzes von Pythagoras	0.5
	Bestimmen der seitlichen Auslenkung a (8.7)	1.0
8.d)	Korrektes Einzeichnen des geraden Lichtweges	0.5
	Gekrümmter Lichtweg zeigt eine kontinuierliche Krümmung	0.5
	Gekrümmter Lichtweg streift den Boden horizontal	0.5
	Gekrümmter Lichtweg trifft von unten auf das Auge des Beobachters	0.5
8.e)	Nutzen, dass die Luftdichte invers proportional zur Temperatur ist	1.0
	Bestimmen der Proportionalitätskonstanten für die Dichte (8.9)	0.5
	Bestimmen der Proportionalitätskonstanten für den Brechungsindex (8.10)	0.5
	Berechnen der Dichten und Brechungsindizes (je 0.5 P.) (8.11)	2.0
8.f)	Erkennen, dass der Einfallswinkel am Boden 90° beträgt	0.5
	Nutzen des Brechungsgesetzes	0.5
	Ausdrücken des Einfallswinkels beim Beobachter durch Brechungsindizes n_o und n_u (8.12)	1.0
	Angeben einer geometrischen Beziehung zwischen Winkel α und Entfernung d (8.13)	1.0
	Auflösen der Bedingungen nach der Entfernung (8.14)	1.0
	Berechnen des Werts der Entfernung (8.14)	1.0
		17.0

Bemerkung: Sollte im letzten Aufgabenteil vereinfacht nur eine Totalreflexion am Boden betrachtet und die weitere Schichtung der Luft nicht beachtet werden, sollte trotz identischem Ergebnis der Punkt für das Ausdrücken des Einfallswinkels beim Beobachter nicht gegeben werden, so dass maximal 4 Punkte in der Teilaufgabe erreicht werden können.

Aufgabe 9 Atmosphärische Myonen (18.0 Pkt.)

Myonen sind instabile Elementarteilchen mit einer mittleren Lebensdauer von etwa $\tau_0 = 2{,}20\,\mu s$. Nach der Zeit τ_0 sind im Mittel also noch 1/e der ursprünglichen Anzahl der Teilchen vorhanden. Myonen entstehen unter anderem, wenn hochenergetische Teilchen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre wechselwirken.

Im Jahr 1963 untersuchten David H. Frisch und James H. Smith die Lebensdauer dieser atmosphärischen Myonen. Sie maßen mit derselben Apparatur zunächst auf dem Mount Washington und anschließend nahe Meereshöhe. Am oberen Messort konnten sie die mittlere Geschwindigkeit der Myonen zu $v = 0{,}9952\,c$ bestimmen. Nimm vereinfachend an, dass die Myonen zwischen den Messorten geradlinig nach unten fliegen und ihre Geschwindigkeit dabei konstant bleibt. Verwende zur Bearbeitung der Aufgaben außerdem die folgenden Werte:

Höhendifferenz der Messorte	$\Delta h = 1907\,\text{m}$
mittlere Zählrate auf dem Mount Washington	$n_1 = 563 \pm 10$ pro Stunde
mittlere Zählrate nahe Meereshöhe	$n_2 = 408 \pm 9$ pro Stunde

9.a) Bestimme die Halbwertszeit $T_{1/2}$ eines ruhenden Myons aus dem angegebenen Wert der mittleren Lebensdauer. *(2.0 Pkt.)*

9.b) Ignoriere zunächst relativistische Effekte. Bestimme die Flugzeit der Myonen zwischen den Messorten und berechne, welcher Anteil der am Mount Washington registrierten Myonen nach dieser Zeit noch nicht zerfallen sein sollte. Gib daraus die klassisch erwartete Zählrate nahe Meereshöhe an und vergleiche sie mit dem tatsächlichen Messwert. *(4.0 Pkt.)*

9.c) Bestimme nun aus den gemessenen mittleren Zählraten den Anteil der Myonen, der während des Fluges zwischen den beiden Messorten nicht zerfallen ist. Bestimme daraus die Flugzeit im bewegten Bezugsystem der Myonen. Vergleiche diese Zeit mit der Flugzeit im Erdsystem. *(3.0 Pkt.)*

9.d) Vergleiche dein Ergebnis für die Flugzeit im Myonensystem mit dem Ergebnis, das sich für die gemessene Myonengeschwindigkeit von $v = 0{,}9952\,c$ ergibt. Beurteile die Übereinstimmung der Ergebnisse und gib mindestens zwei Gründe für mögliche Abweichungen an. *(4.0 Pkt.)*

In einem Physikkurs wird über die Auswertung des Experimentes diskutiert.

> *Okay, aus Sicht der Erde lebt das Myon wegen der Zeitdilatation länger. Aber alles ist relativ und wenn ich das Ganze aus Sicht eines ruhenden Myons anschaue, verlängert sich seine Lebensdauer ja gar nicht. Dann müssten doch eigentlich fast alle Myonen zerfallen, bevor sie den Boden erreichen. Wie passt das denn zusammen?*

9.e) Hilf den verzweifelten Jungphysiker*innen und beschreibe den Vorgang aus Sicht des Ruhesystems eines Myons. Berechne ebenfalls den Myonenanteil der während des Fluges zwischen den beiden Messorten nicht zerfällt und zeige, dass beide Beschreibungen konsistent sind. *(5.0 Pkt.)*

Lösung

9.a)

Rechnungen und Erläuterungen

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ ist die Zeit, nach der im Mittel noch die Hälfte einer ursprünglich vorhandenen Teilchenzahl nicht zerfallen ist. Für die Teilchenzahl N bei dem exponentiellen Zerfall der Myonen gilt

$$N(t) = N_0\,\mathrm{e}^{-t/\tau_0}\,, \tag{9.1}$$

wobei $N(t)$ die zum Zeitpunkt t vorhandene Anzahl Teilchen angibt und $N_0 = N(0)$ die ursprüngliche Teilchenzahl angibt. Aus $N(T_{1/2}) = N_0/2$ folgt durch Logarithmieren die Halbwertszeit zu

$$\boxed{T_{1/2} = \tau_0\,\ln 2 \approx 1{,}52\,\mu\mathrm{s}}\,. \tag{9.2}$$

9.b)

Rechnungen und Erläuterungen

Die Flugzeit t_F im Bezugssystem der Erde beträgt

$$\boxed{t_\mathrm{F} = \frac{\Delta h}{v} = \frac{1907\,\mathrm{m}}{0{,}9952\,c} \approx 6{,}39\,\mu\mathrm{s}}\,. \tag{9.3}$$

Das entspricht etwa $t_\mathrm{F}/T_{1/2} \approx 4{,}20$ Halbwertszeiten oder $t_\mathrm{F}/\tau_0 \approx 2{,}90$ mittleren Myonenlebensdauern.

Ohne relativistische Effekte würde damit in dieser Zeit nur ein Anteil

$$\boxed{\frac{N}{N_0} = \mathrm{e}^{-t_\mathrm{F}/\tau_0} \approx \mathrm{e}^{-2{,}90} \approx 0{,}0548}\,, \tag{9.4}$$

also nur etwa 5,5 % der Myonen, noch nicht zerfallen sein. Mit der gegebenen mittleren Zählrate am oberen Messort würde damit am Boden klassisch eine Zählrate von

$$\boxed{n_\mathrm{klass} = (563 \pm 10)\cdot 0{,}0548 \approx 31 \pm 1 \text{ Myonen pro Stunde}} \tag{9.5}$$

erwartet werden. Gemessen wurden dagegen 408 ± 9 Myonen pro Stunde. Die klassische Vorhersage liegt somit um mehr als eine Größenordnung unter dem Messwert.

9.c)

Rechnungen und Erläuterungen

Der aus den mittleren Zählraten bestimmte Anteil an nicht zerfallenen Myonen ist

$$\boxed{\frac{N'}{N_0} = \frac{408}{563} \approx 0{,}725}\,. \tag{9.6}$$

Für die im Ruhesystem der Myonen während des Fluges vergangene Eigenzeit t'_F gilt

$$\frac{N'}{N_0} = \mathrm{e}^{-t'_\mathrm{F}/\tau_0}\,. \tag{9.7}$$

Auflösen liefert für die Flugzeit im Myonensystem daher

$$\boxed{t'_\mathrm{F} = -\tau_0\,\ln\frac{N'}{N_0} \approx 0{,}708\,\mu\mathrm{s}}\,. \tag{9.8}$$

Das Verhältnis der Flugzeit im Erdsystem zu der im Myonensystem beträgt damit

$$\boxed{\gamma_{\text{exp}} = \frac{t_{\text{F}}}{t'_{\text{F}}} \approx \frac{6{,}39}{0{,}708} \approx 9{,}0}\,, \tag{9.9}$$

so dass im System des Myons während des Fluges nahezu ein Faktor 10 weniger Zeit vergeht als im Erdsystem. Berücksichtigt man die Unsicherheiten der mittleren Zählraten, ergibt sich als Min-Max-Abschätzung der Unsicherheit $\gamma_{\text{exp}} = 9{,}0 \pm 1{,}0$.

9.d)

Rechnungen und Erläuterungen

Für einen Beobachter im Erdsystem läuft die Zeit im bewegten System der Myonen langsamer ab. Bezeichne mit t eine Zeitdauer im Erdsystem und mit t' die entsprechende Zeitdauer im System der Myonen. Dann gilt für diese relativistische Zeitdilatation

$$t' = t\,\sqrt{1 - v^2/c^2} =: \frac{t}{\gamma}\,. \tag{9.10}$$

Mit $v = 0{,}9952\,c$ ergibt sich für den Lorentzfaktor $\gamma \approx 10{,}2$ und damit für die Flugzeit im Myonensystem

$$\boxed{t'_{\text{F}} = \frac{t_{\text{F}}}{\gamma} \approx 0{,}626\,\mu\text{s}}\,. \tag{9.11}$$

Der Wert für γ entspricht dem bei der Geschwindigkeit theoretisch zu erwarteten Verhältnis der Flugzeiten in den beiden Systemen. Das Ergebnis liegt in derselben Größenordnung wie der aus den Zählraten bestimmte Faktor $9{,}0 \pm 1{,}0$, stimmt aber auch im Rahmen der Unsicherheiten nicht genau überein.

Gründe für systematische Abweichungen können z. B. in der Abbremsung und dem damit verbundenen Energieverlust der Myonen in der Atmosphäre, der Geschwindigkeitsverteilung der Myonen, der zusätzlichen relativistischen Zeitdilatation durch die Gravitation und systematischen Ungenauigkeiten des Detektors liegen.

9.e)

Rechnungen und Erläuterungen

Im Ruhesystem des Myons ist nicht seine Eigenlebensdauer verändert. Stattdessen ist der Abstand zwischen den beiden Messorten in Bewegungsrichtung relativistisch längenkontrahiert. Für die zurückzulegende Höhendifferenz gilt im Ruhesystem des Myons

$$\Delta h' = \frac{\Delta h}{\gamma} = \frac{1907\,\text{m}}{10{,}2} \approx 187\,\text{m}\,. \tag{9.12}$$

Dabei wurde der aus der gegebenen Myonengeschwindigkeit ermittelte Wert für γ verwendet. Aus Sicht des Myons bewegt sich die Erde mit dem Betrag der Geschwindigkeit v auf das Myon zu. Daher wird die Strecke $\Delta h'$ in der Zeit

$$t_\mu = \frac{L'}{v} = \frac{t_{\text{F}}}{\gamma} = t'_{\text{F}} \approx 0{,}626\,\mu\text{s} \tag{9.13}$$

zurückgelegt.

Der zu erwartende Anteil an Myonen, die während dieser Zeit nicht zerfallen, ist mit (9.1) damit

$$\boxed{\frac{N_\mu}{N_0} = \mathrm{e}^{-t_\mu/\tau_0} \approx 0{,}752}\,. \tag{9.14}$$

Dieser Wert entspricht wegen $t_\mu = t'_\mathrm{F}$ exakt dem Wert, der sich im vorigen Aufgabenteil ergeben würde.

Beide Bezugssysteme beschreiben dieselben beiden Ereignisse: das Passieren des oberen Messorts und das Erreichen des unteren Messorts. Im Erdsystem ist die Strecke 1907m lang, dafür läuft die bewegte „Myonenuhr“ langsamer. Im Ruhesystem eines Myons besitzt das Myon seine unveränderte Eigenlebensdauer. Dafür ist in diesem System der Abstand der Messorte verkürzt. Beide Beschreibungen führen zum gleichen physikalischen Ergebnis und sind damit konsistent.

Bemerkung: Die Aufgabe wurde mit Hilfe von ChatGPT (Modell: GPT-5.6 Sol) formuliert. Die Daten stammen aus D. H. Frisch und J. H. Smith, *Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ-Mesons*, American Journal of Physics 31 (1963), 342–355. Frisch und Smith bestimmten einen beobachteten Zeitdilatationsfaktor von $8{,}8 \pm 0{,}8$, der sehr gut zu dem für das Experiment vorhergesagten theoretischen Wert von $8{,}4 \pm 0{,}2$ passt. Ähnliche Betrachtungen finden sich z. B. auch auf LEIFIphysik unter www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/erster-einblick/versuche/myonenexperiment-von-rossi-und-hall.

Bewertung - Atmosphärische Myonen		**Punkte**
9.a)	Angeben der exponentiellen Abhängigkeit der Teilchenzahl von der Zeit (9.1)	1.0
	Bestimmen der Halbwertszeit der Myonen (9.2)	1.0
9.b)	Bestimmen der klassischen Flugzeit (9.3)	1.0
	Bestimmen des klassisch erwarteten Anteils nicht zerfallener Myonen (9.4)	1.0
	Bestimmen der klassisch erwarteten Zählrate (9.5)	1.0
	Vergleich des Messwertes mit klassischer Vorhersage und Einordnung der Abweichung	1.0
9.c)	Bestimmen des Anteils der nicht zerfallenen Myonen aus Zählraten (9.6)	1.0
	Bestimmen der Flugzeit im Myonensystem aus Zählraten (9.8)	1.0
	Bestimmen des Verhältnisse der Flugzeiten (oder anderer sinnvoller Vergleich) (9.9)	1.0
9.d)	Korrektes Anwenden der Zeitdilatation (9.10)	1.0
	Bestimmen der Flugzeit im Myonensystem aus Geschwindigkeit (9.11)	1.0
	Durchführen eines fachlich sinnvollen Vergleichs der Flugzeiten	1.0
	Angeben von mindestens zwei physikalisch sinnvollen Ursachen für mögliche Abweichungen	1.0
9.e)	Nutzen der Längenkontraktion im Ruhesystem des Myons	1.0
	Bestimmen der Fluglänge im im Myonenruhesystem (9.12)	1.0
	Bestimmen der Eigenzeit im im Myonenruhesystem (9.13)	1.0
	Bestimmen des Anteils der nicht zerfallenen Myonen im Myonenruhesystem (9.14)	1.0
	Zeigen, dass die Betrachtung in beiden Systemen konsistent ist (z. B. durch Hinweis auf identische Ergebnisse)	1.0
		18.0

Bemerkung: Das Eingehen auf die Unsicherheiten der Messwerte wird von den Teilnehmenden nicht erwartet.