PhysikOlympiade in Deutschland

MC-Aufgaben aus der PhysikOlympiade - Lösungen

zusammengestellt von Stefan Petersen

Diese Sammlung enthält Multiple-Choice Aufgaben aus den ersten beiden Runden der PhysikOlympiade in Deutschland, dem nationalen Auswahlwettbewerb für die Internationale PhysikOlympiade (IPhO). Multiple-Choice Aufgaben werden in der PhysikOlympiade hauptsächlich in der Klausur der zweiten Runden verwendet, in der sieben dieser Aufgaben in etwa 60-90 Minuten beantwortet werden sollen.

Zu jeder Frage gibt es genau eine richtige Antwortalternative. Es ist jeweils physikalisch zu begründen, warum dies die korrekte Lösung ist. Die in dieser Sammlung angegebenen physikalischen Konstanten werden auch in den Klausuren gegeben.

Die Themen der Aufgaben sind quer durch die Physik verteilt. Den fachlichen Rahmen spannt dabei der Stoffkatalog der Internationalen PhysikOlympiade auf. Eine deutsche Übersetzung davon ist unter dem folgenden Link[1] auf der IPhO-Webseite zu finden. Zum Lösen der Aufgaben der PhysikOlympiade in Deutschland ist es aber in der Regel nicht erforderlich, alle Teile des Stoffkataloges vollständig zu beherrschen.

Die Aufgaben und Lösungen werden sicher noch Fehler oder unklare Formulierungen enthalten. Für Hinweise und Verbesserungsvorschläge unter ipho@ipho.info sind wir sehr dankbar.

Das Team der PhysikOlympiade wünscht viel Spaß und Erfolg beim Knobeln.

[1] Die URL ist www.scienceolympiaden.de/ipho/internationale-physik-olympiade-wettbewerb/anforderungen

Inhaltsverzeichnis

1 Mechanik **5**
1.1 Kräftegleichgewichte . . . 5
Aufgabe 1 - Sinkender Körper (MC-Aufgabe) . . . 5
Aufgabe 2 - Korken im Eimer (MC-Aufgabe) . . . 6
Aufgabe 3 - Stein im Wasserglas (MC-Aufgabe) . . . 7
Aufgabe 4 - Eiswürfel im Glas (MC-Aufgabe) . . . 8
1.2 Kinematik & Dynamik . . . 9
Aufgabe 5 - Linealverschiebung (MC-Aufgabe) . . . 9
Aufgabe 6 - Bewegung! (MC-Aufgabe) . . . 10
Aufgabe 7 - Rutschende Kästen (MC-Aufgabe) . . . 11
Aufgabe 8 - Wasserstrahl (MC-Aufgabe) . . . 12
Aufgabe 9 - Puck am Faden (MC-Aufgabe) . . . 14
Aufgabe 10 - Fall auf Exoplanet (MC-Aufgabe) . . . 15
Aufgabe 11 - Rotierender Würfel (MC-Aufgabe) . . . 16
1.3 Himmelsmechanik . . . 17
Aufgabe 12 - Pendel im Fahrstuhl (MC-Aufgabe) . . . 17
Aufgabe 13 - Erde und Mars (MC-Aufgabe) . . . 18
Aufgabe 14 - Schwarzes Loch in der Milchstraße (MC-Aufgabe) . . . 19
1.4 Schwingungen & Wellen . . . 21
Aufgabe 15 - Schwingung mit Hindernis (MC-Aufgabe) . . . 21
Aufgabe 16 - Doppeltes Federpendel (MC-Aufgabe) . . . 22

2 Elektrizitätslehre **24**
2.1 Elektrische & magnetische Felder . . . 24
Aufgabe 17 - Coulombkraft (MC-Aufgabe) . . . 24
Aufgabe 18 - Koaxialkabel (MC-Aufgabe) . . . 25
Aufgabe 19 - Felder (MC-Aufgabe) . . . 26
Aufgabe 20 - Geladener Staub (MC-Aufgabe) . . . 27
Aufgabe 21 - Induktion in Leiterschleifen (MC-Aufgabe) . . . 29
Aufgabe 22 - Magnetfall (MC-Aufgabe) . . . 30
Aufgabe 23 - Fallende Leiterschleife im Magnetfeld (MC-Aufgabe) . . . 31
2.2 Gleischstromkreise . . . 34
Aufgabe 24 - Fünfeck aus Widerständen (MC-Aufgabe) . . . 34
Aufgabe 25 - Batteriebetrieb (MC-Aufgabe) . . . 35
Aufgabe 26 - Diode und Widerstände (MC-Aufgabe) . . . 36
2.3 Wechselstromkreise . . . 38
Aufgabe 27 - Schwingkreise (MC-Aufgabe) . . . 38
Aufgabe 28 - Wechselstromschaltkreis (MC-Aufgabe) . . . 40

3 Thermodynamik **42**
3.1 Temperatur, Wärmekapazität & thermische Ausdehnung . . . 42
Aufgabe 29 - Heiße Scheibe (MC-Aufgabe) . . . 42
Aufgabe 30 - Temperatureinheiten (MC-Aufgabe) . . . 42
Aufgabe 31 - Wärmekapazität (MC-Aufgabe) . . . 43
Aufgabe 32 - Wasserkocher mit Eiswürfel (MC-Aufgabe) . . . 44
Aufgabe 33 - Eis schmelzen (MC-Aufgabe) . . . 46
3.2 Wärmetransport . . . 48
Aufgabe 34 - Wärmeleitung (MC-Aufgabe) . . . 48

Aufgabe 35 - Widerstandserwärmung (MC-Aufgabe) . . . 49
Aufgabe 36 - Wärmestrahlung (MC-Aufgabe) . . . 51
Aufgabe 37 - Erderwärmung stoppen (MC-Aufgabe) . . . 52
3.3 Gasgesetze und Kreisprozesse . . . 53
Aufgabe 38 - Kreisprozess (MC-Aufgabe) . . . 53
Aufgabe 39 - Feuchte Badezimmerluft (MC-Aufgabe) . . . 54

4 Optik 55
4.1 Geometrische Optik . . . 55
Aufgabe 40 - Lichtbrechung (MC-Aufgabe) . . . 55
Aufgabe 41 - Glasquader (MC-Aufgabe) . . . 57
Aufgabe 42 - Sammellinse (MC-Aufgabe) . . . 59
Aufgabe 43 - Linsensammlung (MC-Aufgabe) . . . 60
Aufgabe 44 - Zwei Bilder (MC-Aufgabe) . . . 62
4.2 Wellenoptik & Strahlung . . . 64
Aufgabe 45 - Interferenz (MC-Aufgabe) . . . 64
Aufgabe 46 - Wasserschichtreflexion (MC-Aufgabe) . . . 65
Aufgabe 47 - Zwei Sender (MC-Aufgabe) . . . 67
Aufgabe 48 - Bleiglasfenster (MC-Aufgabe) . . . 68

5 Diverse 69
5.1 Atomphysik & Radioaktivität . . . 69
Aufgabe 49 - Spektren (MC-Aufgabe) . . . 69
Aufgabe 50 - Radioaktiver Zerfall (MC-Aufgabe) . . . 70
5.2 Relativitätstheorie . . . 72
Aufgabe 51 - Galaktische Flaschenpost (MC-Aufgabe) . . . 72
5.3 Physikalische Dimensionen & Skalierungen . . . 73
Aufgabe 52 - Leistung von Windenergieanlagen (MC-Aufgabe) . . . 73
Aufgabe 53 - Leistung von Gravitationswellen (MC-Aufgabe) . . . 74
Aufgabe 54 - Gezeitenheizung (MC-Aufgabe) . . . 75
Aufgabe 55 - Zwei Platten im Vakuum (MC-Aufgabe) . . . 77

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	$0\,\mathrm{K} = -273{,}15\,°\mathrm{C}$
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 $20\,°\mathrm{C}$ und Normdruck)
Stefan-Boltzmann-Konstante	α, σ	$5{,}6704 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W\,m}^{-2}\,\mathrm{K}^{-4}$
Universelle Gaskonstante	R	$8{,}314\,46\,\mathrm{J\,K}^{-1}\,\mathrm{mol}^{-1}$

1 Mechanik

1.1 Kräftegleichgewichte

Aufgabe 1 - Sinkender Körper (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Wenn ein fester Körper mit der Dichte $1{,}80\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ in zähem Öl der Dichte $0{,}90\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ mit konstanter Geschwindigkeit sinkt, so ...

A ... wirkt auf den Körper keine Gewichtskraft.

B ... ist die Masse des Körpers gleich der Masse der verdrängten Flüssigkeit.

C ... ist die Gewichtskraft des Körpers im Gleichgewicht mit der Reibungskraft.

D ... ist die Auftriebskraft auf den Körper gleich der Reibungskraft.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Auf den Körper wirken in der Flüssigkeit Gewichtskraft, Auftriebskraft und Reibungskraft. Beim Sinken mit konstanter Geschwindigkeit addieren sich diese Kräfte zu Null.

Antwort A ist falsch, da auch in der Flüssigkeit eine Gewichtskraft auf den Körper wirkt.

Antwort B ist falsch, da sich dann die nach unten gerichtete Gewichtskraft und die Auftriebskraft aufheben würden, so dass der Körper aufgrund der Reibung nicht sinken würde.

Antwort C ist falsch, da sich dann die nach unten gerichtete Gewichtskraft und die nach oben gerichtete Reibungskraft aufheben würden, so dass der Körper aufgrund der Auftriebskraft abbremsen und schließlich nach oben steigen würde.

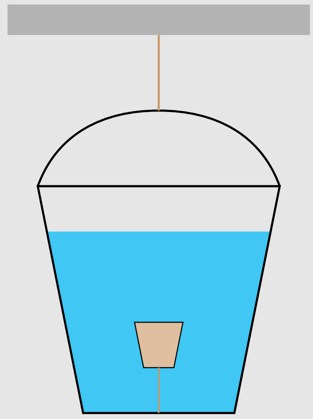
Antwort D ist korrekt: Wenn die Dichte des Körpers doppelt so groß wie die Dichte der Flüssigkeit ist, entspricht die Auftriebskraft der Hälfte der Gewichtskraft. Um das für eine konstante Sinkgeschwindigkeit notwendige Kräftegleichgewicht herzustellen, muss die Reibungskraft dann die andere Hälfte der Gewichtskraft kompensieren und ebenso groß wie die Auftriebskraft sein.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 2 - Korken im Eimer (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Ein mit Wasser gefüllter Eimer ist an einem Seil aufgehängt. In dem Eimer befindet sich, wie nebenstehend abgebildet, ein Korken, der mit einem Faden am Boden des Eimers befestigt ist. Wenn der Faden durchtrennt wird, steigt der Korken an die Wasseroberfläche. Wird das Seil am Eimer durchtrennt, fällt dieser mit Inhalt nach unten.



Wie bewegt sich der Korken relativ zu dem Eimer, unmittelbar nachdem das Seil und der Faden gleichzeitig durchtrennt worden sind?

A Der Korken steigt schneller zur Wasseroberfläche.

B Der Korken steigt genau so schnell an die Wasseroberfläche.

C Der Korken bleibt in Ruhe.

D Der Korken sinkt zum Boden des Eimers.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

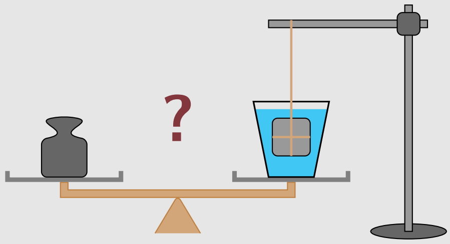
Wenn das Seil und der Faden gleichzeitig durchtrennt werden, befinden sich der Eimer mit dem Wasser sowie dem Korken im freien Fall und fallen nach dem Äquivalenzprinzip gleich schnell. Sie sind also im Bezugsystem des Eimers schwerelos, so dass auch keine Auftriebskraft wirkt. Daher steigt der Korken weder auf noch sinkt er, er bleibt also in Ruhe.

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 3 - Stein im Wasserglas (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2022, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Bernd Schade)

Auf einer Waage steht ein mit Wasser einer Dichte von $1000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ gefülltes Glas. Durch Auflegen eines Massestückes wird die Waage ins Gleichgewicht gebracht.



Nun wird, wie in der Abbildung gezeigt, ein Stein mit einem Volumen von $300\,\mathrm{cm^3}$ und einer Dichte von $3000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ an einem dünnen Faden an einem Stativ hängend in das Wasser eingetaucht, ohne den Boden zu berühren.

Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?

Um die Waage ins Gleichgewicht zu bringen, muss ...

A ... nichts unternommen werden, da die Waage im Gleichgewicht bleibt.

B ... ein Massestück einer Masse von $0{,}3\,\mathrm{kg}$ auf die linke Seite der Waage gelegt werden.

C ... ein Massestück einer Masse von $0{,}6\,\mathrm{kg}$ auf die linke Seite der Waage gelegt werden.

D ... ein Massestück einer Masse von $0{,}9\,\mathrm{kg}$ auf die linke Seite der Waage gelegt werden.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Durch das verdrängte Wasser erfährt der Stein gemäß dem archimedischen Prinzip eine Auftriebskraft, die so groß ist wie die Gewichtskraft des von dem Stein verdrängten Wassers. Das Volumen des Steins ist mit $V_{\text{Stein}} = 300\,\mathrm{cm^3} = 3{,}00 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m^3}$ gegeben, so dass sich die Auftriebskraft F_{A} bestimmt zu:

$$F_{\text{A}} = g \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{Stein}} = g \cdot 0{,}300\,\mathrm{kg}\,. \tag{1.1}$$

Nach dem dritten Newtonschen Gesetz muss auf das Wasserglas eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kraft wirken. Diese muss durch ein zusätzliches Massestück auf der linken Seite der Waage ausgeglichen werden, um die Waage im Gleichgewicht zu halten. Da die Arme der Waage gleich lang sind, muss die Gewichtskraft des zusätzlichen Massestückes betragsmäßig gerade der Auftriebskraft F_{A} entsprechen, so dass ein Massestück einer Masse von $0{,}3\,\mathrm{kg}$ zu verwenden ist.

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 4 - Eiswürfel im Glas (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Eugen Dizer)

In drei mit Wasser gefüllten Gläsern schwimmt jeweils ein Eiswürfel. Der Eiswürfel in Glas 1 hat eine Luftblase im Inneren, der Eiswürfel in Glas 2 besitzt einen Kern aus flüssigem Wasser und in Glas 3 schwimmt ein Eiswürfel mit einem Aluminiumkern.

Was lässt sich über die Wasserspiegel in den Gläsern direkt nach dem Schmelzen der Eiswürfel sagen?

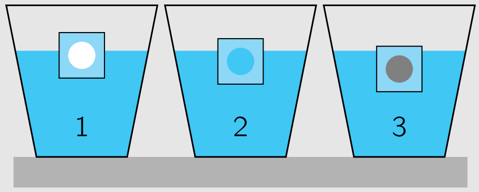


Abb. 1. *Nicht maßstabsgerechte Skizze der schwimmenden Eiswürfel mit Einschlüssen.*

A Der Wasserspiegel in Glas 1 ist gestiegen, die in den anderen Gläsern sind unverändert.

B Der Wasserspiegel in Glas 3 ist gesunken, die in den anderen Gläsern sind unverändert.

C Die Wasserspiegel in Glas 1 und 3 sind gestiegen, der in Glas 2 ist unverändert.

D Die Wasserspiegel in allen Gläsern sind unverändert.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Aufgrund des archimedischen Prinzips entspricht die Masse des von einem schwimmenden Eiswürfel verdrängten Wassers genau der Masse des Eiswürfels inklusive eines eventuellen Einschlusses. Beim Schmelzen des Eiswürfels bleibt diese Masse erhalten.

Glas 1: Die Masse der Luft im Eiswürfel ist im Vergleich zur Eismasse vernachlässigbar. Die Masse des von dem Eiswürfel verdrängten Wassers entspricht also der Masse des Eises. Nach dem Schmelzen ist die gleiche Masse als Wasser vorhanden und nimmt daher das gleiche Volumen ein wie das vorher verdrängte Wasser. Der Wasserspiegel ändert sich nicht.

Glas 2: Ähnlich wie bei Glas 1 ist die Masse des Eises nach dem Schmelzen als Wasser vorhanden, so dass auch hier der Wasserspiegel gleich bleibt.

Glas 3: Da Aluminium eine höhere Dichte als Wasser besitzt, sinkt es nach dem Schmelzen des Eiswürfels auf den Glasboden. Es verdrängt dann nur noch sein eigenes Volumen an Wasser, so dass der Wasserspiegel in dem Glas sinkt.

Damit ist Antwort B korrekt.

Alternativ kann man sich auch in allen drei Fällen eine Trennung von Eismasse und Luft-, Wasser- bzw. Metallmasse vorstellen. In den ersten beiden Gläsern würde dies nicht zu einer Veränderung des Wasserspiegels führen. Bei dem Metallkern würde allerdings der Eiswürfel ohne den Kern weiter oben schwimmen und der Wasserspiegel dadurch sinken.

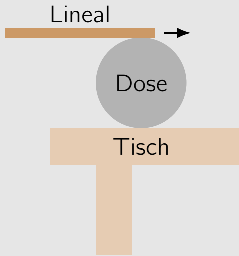
Korrekte Antwort: *B*

1.2 Kinematik & Dynamik

Aufgabe 5 - Linealverschiebung (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2020)

Das Ende eines Lineals liegt auf einer zylindrischen Dose, die wiederum auf einem Tisch liegt. Das Lineal wird horizontal bewegt, so dass die Dose über den Tisch rollt. Dabei rutschen weder das Lineal noch die Dose.



Um welche Strecke hat sich das Lineal relativ zum Tisch bewegt, wenn die Dose eine volle Drehung vollführt hat?

A Die Hälfte des Umfangs der Dose

B Den Umfang der Dose

C Das Doppelte des Umfangs der Dose

D Mehr als das Doppelte des Umfangs der Dose

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Aus Sicht der Dose bewegt sich der Tisch bei einer vollen Umdrehung um eine Strecke, die dem Umfang der Dose entspricht, nach links. Gleichzeitig bewegt sich aber das Lineal um die gleiche Strecke nach rechts. Insgesamt bewegt sich also das Lineal relativ zum Tisch um eine Strecke, die dem doppelten Umfang der Dose entspricht.

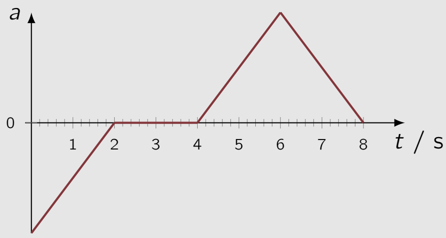
Korrekte Antwort: *C*

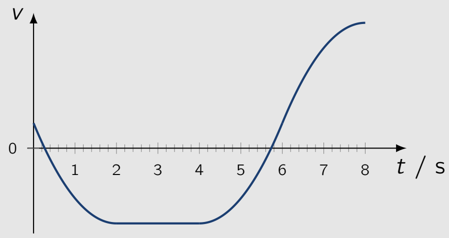
Aufgabe 6 - Bewegung! (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

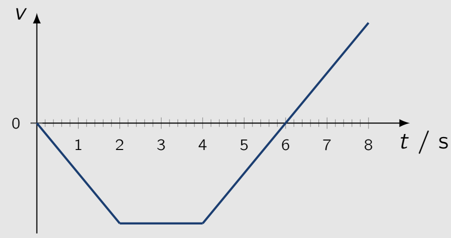
Der nebenstehende Graph zeigt die Beschleunigung a eines Körpers bei einer eindimensionalen Bewegung als Funktion der Zeit t.

Welche der nachfolgenden Graphen stellt die Geschwindigkeit v des Körpers als Funktion der Zeit korrekt dar?

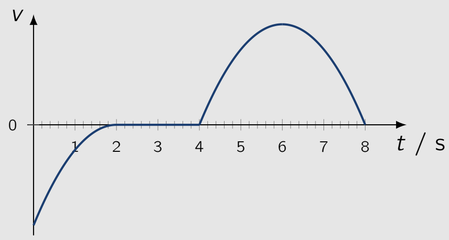




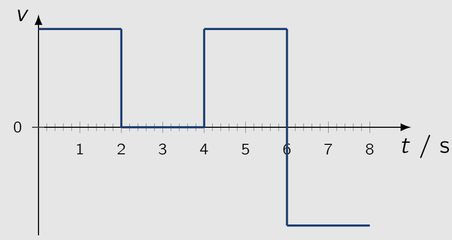
A



B



C



D

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Anfänglich besitzt der Körper eine negative Beschleunigung. Die Geschwindigkeit muss also im ersten Abschnitt zwischen 0 und 2 Sekunden abnehmen. Dies geschieht nur in den ersten beiden Graphen.

Die Beschleunigung ist die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit. Der Graph B zeigt im ersten Abschnitt eine linear abnehmende Geschwindigkeit, die einer konstanten negativen Beschleunigung entsprechen würde. Dies passt nicht zu dem gegebenen Verlauf der Beschleunigung. Der Graph B kommt also nicht in Frage.

Damit verbleibt der erste Graph, deren Geschwindigkeitsverlauf tatsächlich zu dem gegebenen Verlauf der Beschleunigung passt. Im Zeitraum zwischen 0 und 2 Sekunden ist die Beschleunigung negativ und steigt linear auf Null an. Im Zeitraum zwischen 2 und 4 Sekunden ist die Geschwindigkeit konstant, und damit die Beschleunigung gleich Null. Die verbleibenden beiden Abschnitte besitzen erneut Beschleunigungen, die sich linear mit der Zeit ändern. Erst ansteigend und dann abfallend bis die Geschwindigkeit bei 8 Sekunden wieder einen konstanten Wert annimmt und die Beschleunigung damit Null wird.

Korrekte Antwort: *A*

Aufgabe 7 - Rutschende Kästen (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2017)

Zwei Kästen rutschen reibungsfrei aus gleicher Höhe jeweils eine schiefe Ebene hinab. Die beiden schiefen Ebenen besitzen unterschiedliche Steigungen, beide Kästen legen aber insgesamt den gleichen Höhenunterschied zurück. Der eine Kasten ist doppelt so schwer wie der andere.

Welche der folgenden Aussagen trifft zu?

A Beide Kästen haben anfänglich die gleiche potentielle Energie.

B Die Kästen benötigen die gleiche Zeit für das Rutschen auf den schiefen Ebenen.

C Am Ende der schiefen Ebenen besitzen beide Kästen die gleiche kinetische Energie.

D Am Ende der schiefen Ebenen sind beide Kästen gleich schnell.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die potentielle Energie der Kästen ist proportional zur Masse m und zur Höhendifferenz Δh zwischen Start- und Endpunkt. Während des als reibungsfrei anzunehmenden Rutschens wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Dabei gilt

$$m\,g\,\Delta h = \frac{1}{2}\,m\,v^2 \qquad \text{und damit} \qquad v = \sqrt{2\,g\,\Delta h}. \tag{1.2}$$

Am Ende beträgt die kinetische Energie eines Kastens damit $m\,g\,\Delta h$, ist also auch proportional zur Masse des Kastens. Da sich die Masse auf beiden Seiten der obigen Gleichung herauskürzt, ist die Geschwindigkeit in jeder Höhe nur von der zurückgelegten Höhendifferenz eines Kastens abhängig. Damit ist aufgrund der unterschiedlichen Längen der schiefen Ebenen die Zeit, die die Kästen zum Rutschen benötigen, unterschiedlich. Allerdings ist die Geschwindigkeit der Kästen am Ende der beiden schiefen Ebenen betragsmäßig gleich.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 8 - Wasserstrahl (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Die Unterseite eines mit Wasser gefüllten Behälters befindet sich, wie nebenstehend gezeigt, auf einer Höhe von $H_{\text{unten}} = 15\,\text{cm}$ über dem Boden. Die Wasserhöhe im Behälter beträgt $H = 50\,\text{cm}$.

In den Behälter wird nun auf einer Höhe h über der Unterseite ein kleines Loch gebohrt, so dass sich ein Wasserstrahl aus dem Behälter ergießt, der anfänglich in einer Entfernung x auf den Boden trifft.

Welcher der Graphen gibt die Entfernung x des Auftreffpunktes in Abhängigkeit von der Höhe h, in der das Loch gebohrt wird, korrekt wieder?

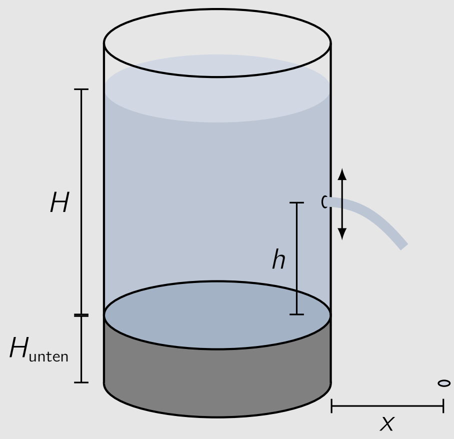
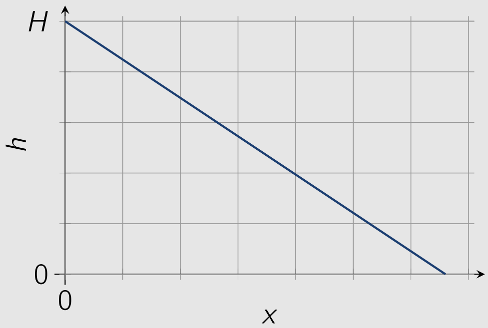
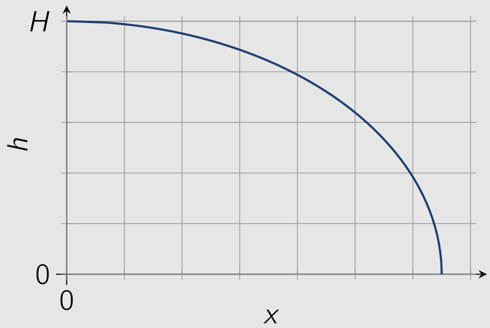


Abb. 2. *Skizze zum Wasserstrahl.*

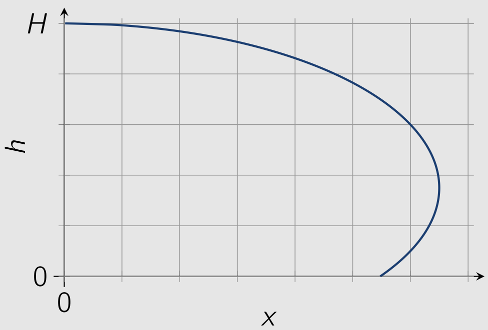
A



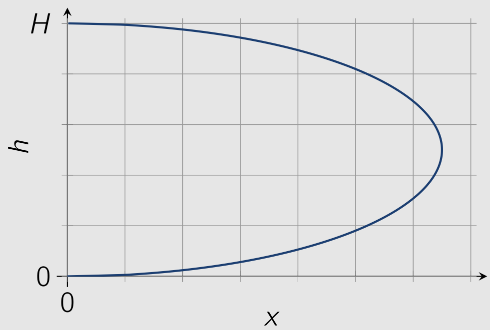
B



C



D



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Der Wasserstrahl tritt stets waagerecht aus dem Loch aus. Die Austrittsgeschwindigkeit v des Wasserstrahl ist dabei von der über dem Loch befindlichen Wasserhöhe abhängig. Bezeichne mit ρ die Dichte des Wassers. Dann gilt mit der Bernoulli-Gleichung

$$\rho\, g\, (H-h) = \frac{1}{2}\,\rho\, v^2 \qquad \text{bzw.} \qquad v = \sqrt{2\, g\, (H-h)}\,. \tag{1.3}$$

Der Wasserstrahl trifft in einer Entfernung $x = v\, t$ auf den Boden, wobei t die Zeit für den freien

Fall aus der Höhe $H_{\text{unten}} + h$ angibt. Für diese gilt

$$H_{\text{unten}} + h = \frac{1}{2}\, g\, t^2 \qquad \text{bzw.} \qquad t = \sqrt{\frac{2\,(H_{\text{unten}} + h)}{g}}\,. \tag{1.4}$$

Daraus ergibt sich schließlich für die Entfernung x des Auftreffpunktes

$$\boxed{x = v\, t = 2\,\sqrt{(H - h)\,(H_{\text{unten}} + h)}}\,. \tag{1.5}$$

Mit $h' := h + H_{\text{unten}}$ lässt sich dieser Ausdruck umschreiben zu

$$\boxed{x = 2\,\sqrt{(H + H_{\text{unten}} - h')\, h'} = 2\,\sqrt{\frac{(H + H_{\text{unten}})^2}{4} - \left(\frac{H + H_{\text{unten}}}{2} - h'\right)^2}}\,. \tag{1.6}$$

Der Ausdruck unter der Wurzel ist eine quadratische Funktion in h', der für $h' = \frac{H + H_{\text{unten}}}{2}$ maximal wird. Die maximale Reichweite des Wasserstrahls wird also erreicht, wenn sich das Loch auf der Hälfte der Gesamthöhe $H + H_{\text{unten}}$, also bei etwa $h = H/3$ befindet. Dies ist nur bei Graph C der Fall.

Korrekte Antwort: *C*

Bemerkung: Die Antwortoptionen B und D ergeben sich aus den abgeleiteten Gleichungen für die speziellen Fälle $H_{\text{unten}} = H$ bzw. $H_{\text{unten}} = 0$. Antwortoption A stellt keine physikalische Lösung dar.

Aufgabe 9 - Puck am Faden (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2020)

Ein sehr kleiner Puck kann sich reibungsfrei auf einem Luftkissentisch bewegen. Er ist mit einem dünnen Faden an einer festen Stange befestigt und wird nun so angestoßen, dass er um die Stange rotiert und sich der stets gespannte Faden dabei an der Stange aufwickelt.

Wie verhält sich die Bahngeschwindigkeit des Pucks während der Bewegung?

A Sie bleibt konstant.
B Sie erhöht sich.
C Sie verringert sich.
D Das lässt sich so nicht beantworten.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Da das System energetisch abgeschlossen ist, muss die kinetische Energie des Pucks und damit der Betrag seiner Bahngeschwindigkeit während der Bewegung konstant bleiben.

Korrekte Antwort: *A*

Hinweis: Die betrachtete Situation unterscheidet sich von dem Fall einer radial an dem Puck ziehenden Kraft, bei dem der Drehimpuls des Pucks erhalten bleiben würde und damit die Geschwindigkeit zunehmen müsste. Die endliche Ausdehnung des Stange führt dazu, dass die Kraft auf den Puck nicht nur eine Komponente in Richtung der Mitte des Stabes sondern auch eine dazu senkrechte Komponente besitzt. Diese ist für die Verringerung des Drehimpulses verantwortlich.

Wenn man annimmt, dass die Ausdehnung der Stange vernachlässigbar ist, wird der Faden durch das Aufwickeln nicht kürzer und es bleibt neben der Geschwindigkeit auch der Drehimpuls erhalten.

Aufgabe 10 - Fall auf Exoplanet (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2022, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Thomas Hellerl)

Auf der Oberfläche eines extrasolaren Planeten - kurz: Exoplaneten - ist die Fallzeit eines Körpers aus einer kleinen Höhe h unter Vernachlässigung aller Reibungseffekte genau doppelt so groß, wie auf der Erde.

Welche der folgenden Aussagen ist damit vereinbar, wenn man von einem kugelsymmetrischen Aufbau des Exoplaneten ausgeht?

Der Exoplanet hat ...

A ...die halbe Erdmasse und den doppelten Erdradius.

B ...genau die Erdmasse und vierfachen Erdradius.

C ...die doppelte Erdmasse und den doppelten Erdradius.

D ...die vierfache Erdmasse und den vierfachen Erdradius.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Fallzeit für einen freien Fall aus der Höhe h auf der Planetenoberfläche bestimmt sich aus $h = \frac{1}{2}\, g\, t^2$ zu:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}\,. \tag{1.7}$$

Die Schwerebeschleunigung g auf dem Planeten lässt sich mit Hilfe des Gravitationsgesetzes ausdrücken durch

$$g = \frac{G\, M}{R^2}\,, \tag{1.8}$$

wobei M die Planetenmasse, R dessen Radius und G die Gravitationskonstante bezeichnen. Für die Fallzeit ergibt sich so

$$t = \sqrt{\frac{2\, h\, R^2}{G\, M}}\,. \tag{1.9}$$

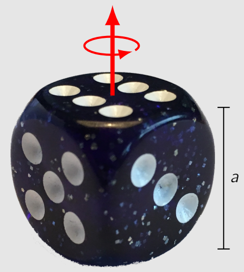
Soll diese Fallzeit bei festem h doppelt so groß sein, so muss $\frac{R^2}{M} = 4 \cdot \frac{R_{\text{Erde}}^2}{M_{\text{Erde}}}$ gelten. Das ist nur bei Antwortmöglichkeit D erfüllt.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 11 - Rotierender Würfel (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Bezeichne mit I das Trägheitsmoment des nebenstehend abgebildeten Würfels bei Drehung um die eingezeichnete Achse durch die Mittelpunkte zweier gegenüberliegender Seiten.



Wie groß ist das entsprechende Trägheitsmoment eines Würfels aus dem gleichen Material aber mit doppelt so großer Kantenlänge a?

A $2\,I$ B $4\,I$ C $16\,I$ D $32\,I$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Das Trägheitsmoment eines Körpers bei Drehung um eine Schwerpunktachse ist proportional zur Masse m des Körpers und zum Quadrat einer charakteristischen Länge senkrecht zur Rotationsachse. Die Masse des Körpers wiederum ist proportional zur dritten Potenz einer charakteristischen Länge des Körpers, für die hier die Kantenlänge a verwendet werden kann. Es gilt also:

$$I \sim m \cdot a^2 \sim a^5 \tag{1.10}$$

Bei einer Verdopplung der Kantenlänge a wird das Trägheitsmoment damit um einen Faktor $2^5 = 32$ größer. Damit ist die letzte Antwort korrekt.

Korrekte Antwort: *D*

1.3 Himmelsmechanik

Aufgabe 12 - Pendel im Fahrstuhl (MC-Aufgabe)

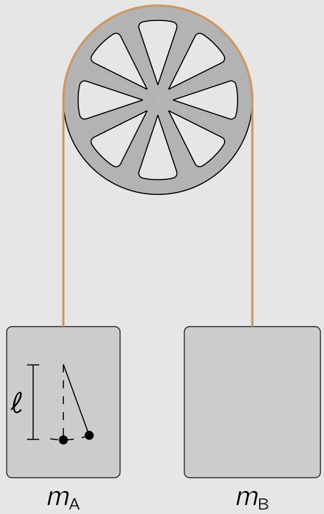
(2. Rd. zur IPhO 2022)

Zwei Fahrstuhlkabinen der Massen m_A und m_B mit $m_A < m_B$ hängen an den Enden eines langen Seiles, das über eine feste Rolle geführt ist. Die Masse der Rolle und des Seils können vernachlässigt werden. In der linken Kabine hängt ein Fadenpendel der Länge ℓ. Bei ruhenden Kabinen und kleinen Auslenkungen beträgt die Periodendauer des Pendels T.

Wenn die Kabinen losgelassen werden, bewegen diese sich reibungsfrei unter dem Einfluss der Schwerkraft.

Wie muss die Länge ℓ' des Fadenpendels in der linken Kabine gewählt werden, damit es nach dem Loslassen der Kabine mit der Periode T schwingt?

A $\ell' = \frac{m_a}{m_B}\,\ell$ B $\ell' = \frac{2\,m_A}{m_A+m_B}\,\ell$ C $\ell' = \frac{2\,m_B}{m_A+m_B}\,\ell$ D $\ell' = \frac{m_B}{m_A}\,\ell$



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Periodendauer T eines Fadenpendels der Länge ℓ beträgt

$$T = 2\,\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \qquad \text{bzw.} \qquad \ell = \frac{T^2\,g}{4\,\pi^2}\,, \tag{1.11}$$

wobei g die Schwerebeschleunigung auf der Erde angibt.

Nach dem Loslassen der Kabinen wird die Kabine A nach oben beschleunigt, da ihre Masse kleiner ist als die der anderen Kabine. Die Beschleunigung nach oben lässt sich bestimmen aus

$$(m_B + m_A)\,a = m_B\,g - m_A\,g\,, \qquad \text{so dass} \qquad a = \frac{m_B - m_A}{m_A + m_B}\,g\,. \tag{1.12}$$

Auf das Pendel in der Kabine A wirkt damit die Beschleunigung $g + a$ nach unten. Wenn das Pendel auch im beschleunigten Fall die gleiche Pendeldauer T besitzen soll, muss es dafür eine Länge ℓ' haben mit

$$\boxed{\ell' = \frac{T^2}{4\,\pi^2}\,(g+a) = \frac{T^2\,g}{4\,\pi^2}\,\frac{2\,m_B}{m_A + m_B} = \frac{2\,m_B}{m_A + m_B}\,\ell > \ell}\,. \tag{1.13}$$

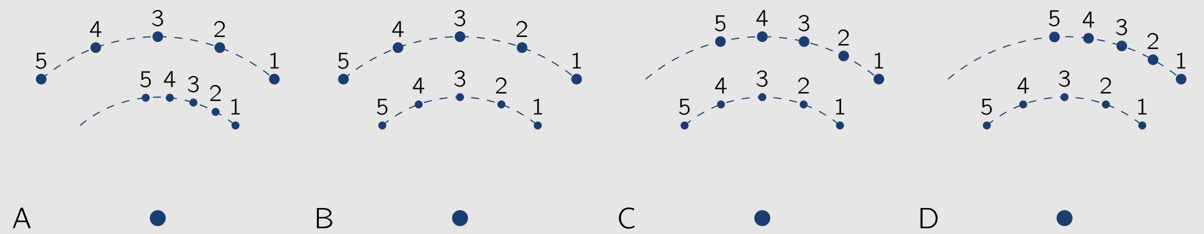
Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 13 - Erde und Mars (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2017)

Die folgenden Abbildungen sollen, von rechts nach links, jeweils fünf Schnappschüsse der Bahnpositionen von Erde und Mars darstellen, die jeweils zu gleichen Zeiten aufgenommen worden sind. Die Verhältnisse der Bahnradien sind maßstabsgetreu, die Planeten aber stark vergrößert.

Gib an, welche der Abbildungen korrekt ist und begründe deine Antwort.



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Nach dem dritten Keplerschen Gesetz gilt für die Winkelgeschwindigkeiten ω_i von Mars und Erde sowie deren Abstände r_i zur Sonne

$$\omega_{\text{Erde}}^2\, r_{\text{Erde}}^3 = \omega_{\text{Mars}}^2\, r_{\text{Mars}}^3 \tag{1.14}$$

Da nach der Abbildung $r_{\text{Mars}} \approx 1,5\, r_{\text{Erde}}$ ist, gilt

$$\omega_{\text{Mars}} = \omega_{\text{Erde}} \left(\frac{r_{\text{Erde}}}{r_{\text{Mars}}}\right)^{3/2} \approx 0,54\, \omega_{\text{Erde}}\,. \tag{1.15}$$

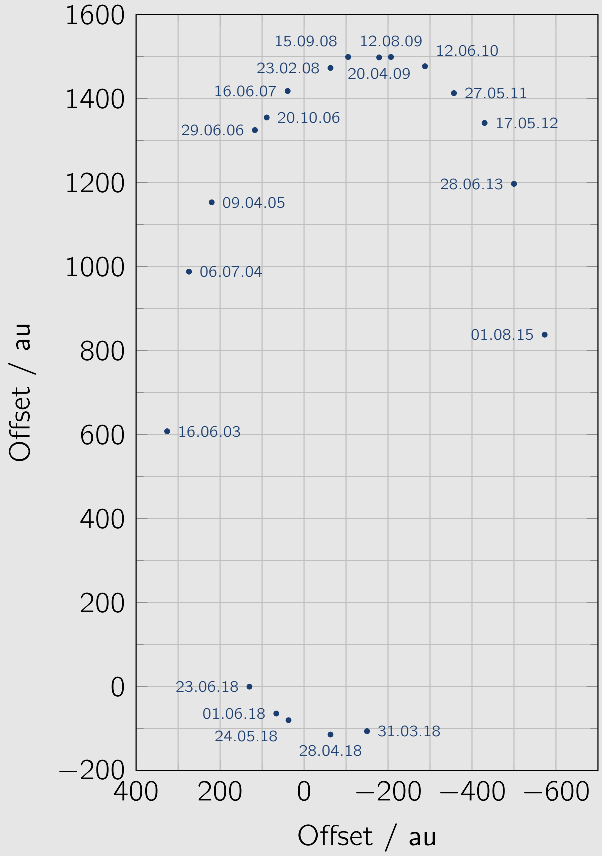
In der Zeit, in der die Erde den dargestellten Winkelbereich durchlaufen hat, muss der Mars somit etwa die Hälfte des Bereiches durchlaufen haben. Beachtet man auch noch, dass der Mars, wenn die Erde 75% des dargestellten Bereiches durchlaufen hat, nur etwa 41% des Bereiches durchlaufen haben soll, dann verbleibt nur die ganz rechte Abbildung als korrekte Darstellung.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 14 - Schwarzes Loch in der Milchstraße (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Der Physiknobelpreis 2020 wurde für die Entdeckung eines sehr massereichen, kompakten Objektes im Zentrum unserer Galaxie, der Milchstraße, vergeben. Vieles deutet darauf hin, dass es sich bei diesem Objekt um ein schwarzes Loch handelt. Die nebenstehende Abbildung zeigt die zu verschiedenen Daten beobachtete Position eines Sternes relativ zur vermuteten Position des Zentrums der Milchstraße. Die Position ist in Vielfachen des Abstandes Sonne-Erde, also in astronomischen Einheiten mit 1 au = $1{,}50 \cdot 10^{11}$ m, angegeben. Der Stern befindet sich also auf galaktischen Längenmaßstäben in der Nähe des Zentrums der Milchstraße. Nimm vereinfachend an, dass die Bahn des Sterns in der Zeichenebene verläuft und dass die Bahn nicht durch relativistische Effekte beeinflusst wird.



Welche Masse lässt sich aus den Daten für das im Zentrum der Milchstraße vermutete schwarze Loch als Vielfaches der Sonnenmasse mit $M_{\text{Sonne}} = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg abschätzen?

Die Masse des schwarzen Loches entspricht am ehesten ...

A ... $1 \cdot 10^5$ Sonnenmassen.

B ... $2 \cdot 10^6$ Sonnenmassen.

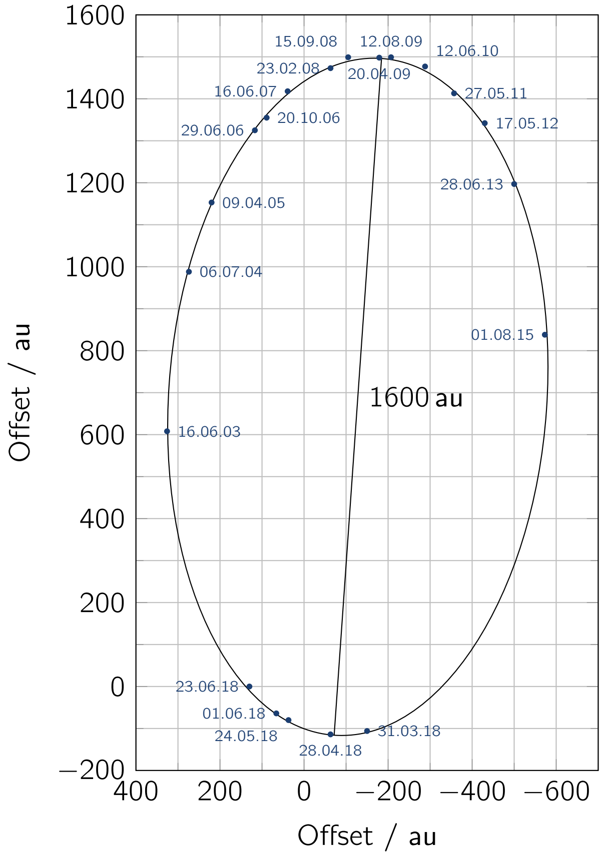
C ... $4 \cdot 10^7$ Sonnenmassen.

D ... $8 \cdot 10^8$ Sonnenmassen.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Es wird angenommen, dass die Bewegung des Sternes im Wesentlichen durch die von dem schwarzen Loch verursachten Gravitationskraft auf den Stern bestimmt wird. Dann muss sich der Stern auf einer Ellipsenbahn um das schwarze Loch, also um das Zentrum der Milchstraße bewegen. Dies trifft auch näherungsweise zu, wie die nebenstehende eingezeichnete Ellipse verdeutlicht.



Nach dem dritten Keplerschen Gesetz ist das Quadrat der Umlaufzeiten um das schwarze Loch proportional zur dritten Potenz der großen Halbachse der Bahnen. Dies gilt auch für Kreisbahnen. Für eine Kreisbahn mit Radius a und Umlaufzeit T muss die Zentripetalkraft durch die Gravitationskraft gegeben sein. Daher gilt

$$\frac{4\,\pi^2}{T^2}\,a = G\,\frac{M}{a^2} \quad \text{bzw.} \quad T^2 = \frac{4\,\pi^2}{G\,M}\,a^3\,, \tag{1.16}$$

wobei G die Gravitationskonstante bezeichnet und M die Masse des schwarzen Loches ist. Damit ist die Proportionalitätskonstante in dem Keplerschen Gesetz durch bekannte Größen und die gesuchte Masse ausgedrückt.

Für den beobachteten Stern lassen sich große Halbachse und die Umlaufzeit bestimmen zu $a \approx 800\,\mathrm{au} \approx 1{,}2 \cdot 10^{14}\,\mathrm{m}$ sowie $T \approx 18\,\mathrm{yr} \approx 5{,}7 \cdot 10^{8}\,\mathrm{s}$.

Damit lässt sich die Masse des zentralen schwarzen Loches abschätzen zu

$$\boxed{M = \frac{4\,\pi^2\,a^3}{G\,T^2} \approx 3{,}1 \cdot 10^{36}\,\mathrm{kg} \approx 1{,}6 \cdot 10^{6}\,\mathrm{M_{Sonne}}}\,. \tag{1.17}$$

Die Masse des schwarzen Loches entspricht damit am ehesten $2 \cdot 10^6$ Sonnenmassen.

Korrekte Antwort: *B*

Hinweis: Eine aktuelle Abschätzung der Masse des zentralen Loches liegt etwas oberhalb von $4 \cdot 10^6$ Sonnenmassen (s. z. B. S. Gillessen et al (2017). ApJ 837 30.). Die verwendeten Daten sind entnommen aus M. Parsa et al (2017). ApJ 845 22 sowie Daten von www.eso.org und gehören zu Beobachtungen des Sterns S2, dessen Bahnebene nicht genau senkrecht zur Beobachtungslinie liegt. Eine genauere Untersuchung der Bahn würde auch die Berücksichtigung relativistischer Effekte notwendig machen.

1.4 Schwingungen & Wellen

Aufgabe 15 - Schwingung mit Hindernis (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020)

Eine kleine Metallkugel hängt, wie nebenstehend skizziert, an einem dünnen Faden der Länge L von der Decke. Wenn dieses Fadenpendel leicht zur Seite ausgelenkt und losgelassen wird, schwingt es mit einer Schwingungsperiodendauer $T = 1{,}0\,\mathrm{s}$ parallel zur Wand.

Nun wird ein Nagel in einem Abstand von $\frac{3}{4}L$ von der Decke fest in die Wand geschlagen. Das Fadenpendel stößt beim Schwingen nach rechts an den Nagel und wird durch diesen behindert. Die Kugel wird jetzt aus der in Abbildung 3 rechts gezeigten Position losgelassen.

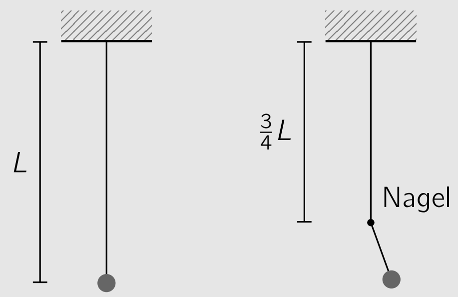
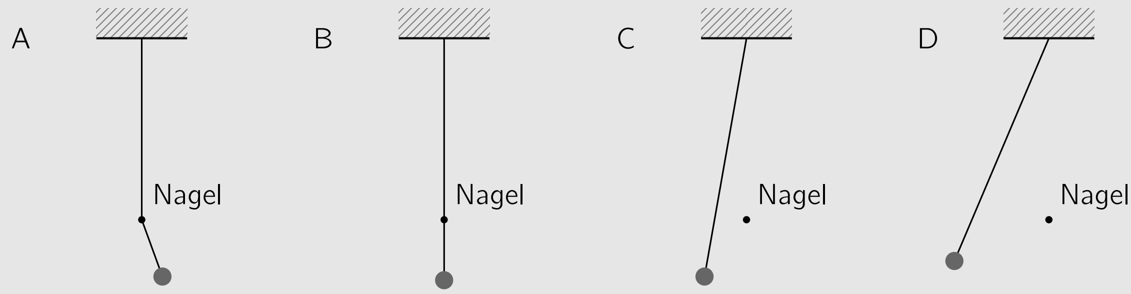


Abb. 3. *Skizze des Pendels ohne (links) und mit Nagel in der Wand (rechts).*

Welche der folgenden Abbildungen zeigt die Position der Kugel 1,5 s nach dem Loslassen?



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Pendelperiode T eines Fadenpendels bei kleinen Auslenkungen ist proportional zur Wurzel aus der Pendellänge. Durch den Nagel wird die Pendellänge für einen Teil der Schwingung auf ein Viertel reduziert. Dadurch halbiert sich die Schwingungsdauer für den Teil der Schwingung, der durch den Nagel eingeschränkt ist.

Für die Pendelbewegung aus der anfänglichen Lage (in A gezeigt) bis zum Durchgang durch die Ruhelage (B) benötigt das Pendel daher eine Zeit von $\frac{1}{8}\,T$. Nach $\frac{3}{8}\,T$ ist es auf dem höchsten Punkt auf der anderen Seite angekommen (C) und nach $\frac{5}{8}\,T$ durchläuft es erneut die Ruhelage, bevor es nach $\frac{6}{8}\,T = \frac{3}{4}\,T$ wieder Position in A erreicht. 1,5 s oder $\frac{3}{2}\,T$ nach dem Loslassen hat das Pendel daher bereits zwei volle Schwingungsperioden durchlaufen und befindet sich wieder bei Position A.

Antwort A ist also die gesuchte Lösung.

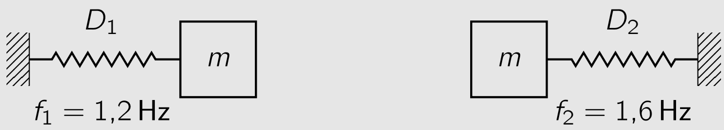
Hinweis: Position D kann von dem Pendel gar nicht erreicht werden, da das Pendel dann höher wäre als in der ursprünglichen Lage, was energetisch unmöglich ist.

Korrekte Antwort: *A*

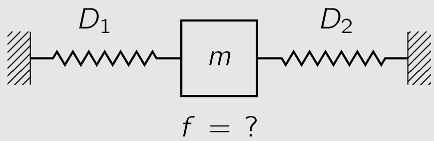
Aufgabe 16 - Doppeltes Federpendel (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Thomas Hellerl)

In den beiden in der Abbildung gezeigten Federpendeln schwingt jeweils ein Körper der Masse m reibungsfrei. Die Federkonstanten D_1 und D_2 der beiden hookeschen Federn sind dabei jedoch unterschiedlich. Daher schwingen die Körper nach einer Auslenkung mit unterschiedlichen Frequenzen f_1 und f_2.



Wie groß ist die Schwingungsfrequenz (Eigenfrequenz) des unten gezeigten Systems, in dem die Federn gekoppelt sind?



A $1{,}4\,\mathrm{Hz}$ B $2{,}0\,\mathrm{Hz}$ C $2{,}4\,\mathrm{Hz}$ D $2{,}8\,\mathrm{Hz}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

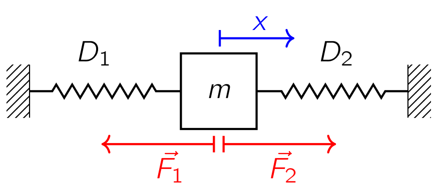
Die Eigenfrequenzen der oberen Oszillatoren sind gegeben durch

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_i}{m}}\,. \tag{1.18}$$

Für die Federkonstanten D_i folgt demnach

$$D_i = 4\,\pi^2\,m\,f_i^2\,. \tag{1.19}$$

Die einzelnen Federkonstanten D_1 und D_2 des unteren Systems addieren sich zur neuen Federkonstante D aufgrund folgender Überlegung.



Im Gleichgewicht zieht jede Feder mit der Kraft F_0. Bei einer Auslenkung um x aus der Gleichgewichtslage üben die linke Feder den Kraftbetrag $F_1 = F_0 + D_1 x$ und die rechte Feder den Kraftbetrag $F_2 = F_0 - D_2 x$ auf m aus. Wir erhalten für die insgesamt auf die schwingende Masse m wirkende Kraft.

$$F(x) = -F_1 + F_2 = -(F_0 + D_1 x) + (F_0 - D_2 x) = -(D_1 + D_2)x \tag{1.20}$$

und damit ist für das System mit beiden Federn

$$D = D_1 + D_2 \tag{1.21}$$

Das neue System schwingt also mit der Frequenz

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_1 + D_2}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{4\pi^2\, m\,(f_1^2 + f_2^2)}{m}} = \sqrt{f_1^2 + f_2^2}\,. \tag{1.22}$$

Mit den gegebenen Werten ergibt sich

$$\boxed{f = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} = \sqrt{1.2^2 + 1.6^2}\,\mathrm{Hz} \approx 2{,}0\,\mathrm{Hz}}\,. \tag{1.23}$$

Korrekte Antwort: *B*

2 Elektrizitätslehre

2.1 Elektrische & magnetische Felder

Aufgabe 17 - Coulombkraft (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2017)

Zwei gleich große, geladene Metallkugeln befinden sich in einem sehr großen Abstand voneinander. Die Ladung der einen Kugel ist drei mal so groß wie die der anderen. Die Kraft, die die Kugeln aufeinander ausüben, ist F. Nun werden die Kugeln miteinander in Kontakt gebracht und anschließend in einem Abstand positioniert, der doppelt so groß wie anfänglich ist.

Wie groß ist jetzt etwa die Kraft zwischen ihnen?

A $0,25\,F$ B $0,33\,F$ C $0,50\,F$ D Die Kraft bleibt gleich.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Coulombkraft F, die die beiden Kugeln anfänglich aufeinander ausüben, beträgt:

$$F = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{3\,q^2}{r^2}\,. \tag{2.1}$$

Die Ladungen der beiden Kugeln werden dabei mit q bzw. $3\,q$ bezeichnet und deren anfänglicher Abstand mit r. Wenn sich die Kugeln berühren, gleichen sich die Ladungen aus, so dass jede Kugel eine Ladung $2\,q$ trägt. Nach der Abstandsänderung beträgt die Kraft daher

$$F' = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{(2\,q)^2}{4\,r^2} = \frac{1}{3}\,F \approx 0,33\,F\,. \tag{2.2}$$

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 18 - Koaxialkabel (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Arne Wolf)

Ein Koaxialkabel besteht, wie nebenstehend im linken Querschnitt abgebildet, aus einem langen schmalen Zylinder mit spezifischem Widerstand ρ_1 ummantelt von einem Hohlzylinder mit spezifischem Widerstand $\rho_2 > \rho_1$, Durch das Kabel fließt ein Strom der Stärke I.

Ein zweites, rechts abgebildetes Koaxialkabel sieht von außen aus wie das erste, besteht im Inneren aber nur aus einem Material. Der spezifische Widerstand dieses Materials ist ρ und die Stromstärke in dem zweiten Kabel beträgt ebenfalls I.

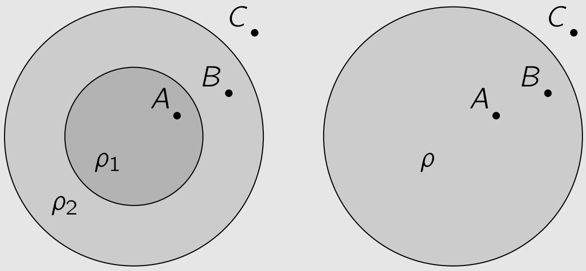


Abb. 4. *Querschnitt des ersten (links) und zweiten (rechts) Koaxialkabels.*

An wie vielen der gekennzeichneten Punkte A, B und C unterscheiden sich die durch das jeweilige Kabel hervorgerufenen Magnetfelder?

A 0 B 1 C 2 D 3

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Da die Gesamtstromstärke in beiden Kabeln gleich ist und der spezifische Widerstand des Kerns im ersten Kabel kleiner ist als in dessen Mantel, fließt im ersten Kabel im Kern mehr Strom als im zweiten. Nach dem Ampèreschen Gesetz ist das von einem geraden Draht erzeugte Magnetfeld in Abstand r zur Drahtachse proportional zum Strom, der in Abstand kleiner oder gleich r zur Drahtachse fließt.

Da dieser Strom für die Punkte A und B im ersten Kabel erhöht ist und an Punkt C für beide Kabel gleich, unterscheidet sich das Magnetfeld an den Punkten A und B. Damit ist C die richtige Antwort.

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 19 - Felder (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Ein sehr leichtes, geladenes Teilchen wird durch eine Spannung U beschleunigt. Anschließend fliegt es in einen Bereich, der von einem konstanten Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung des Teilchens durchsetzt ist. Das Teilchen beschreibt in diesem Bereich einen Kreisbogen mit einem Kreisradius von $r = 1{,}50\,\mathrm{cm}$.

Nun wird ein elektrisches Feld der konstanten Feldstärke $E = 4{,}40 \cdot 10^4\,\mathrm{V\,m^{-1}}$ eingeschaltet, das senkrecht sowohl zum magnetischen Feld als auch zur momentanen Bewegungsrichtung des Teilchens orientiert ist. Das Teilchen bewegt sich daraufhin geradeaus weiter.

Wie groß ist die Spannung U mit der das Teilchen anfänglich beschleunigt wurde?

A 110 V B 220 V C 330 V D 440 V

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Bezeichne mit m, q und v die Masse, die Ladung und den Betrag der Geschwindigkeit des Teilchens nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung. Die von dem Teilchen durch die Beschleunigungsspannung erhaltene Energie entspricht der kinetischen Energie des Teilchens. Im nichtrelativistischen Fall ist daher

$$q\,U = \frac{1}{2}\,m\,v^2\,. \tag{2.3}$$

Wenn nur das magnetische Feld auf das Teilchen wirkt, beschreibt es eine Kreisbahn, deren Radius sich durch Gleichsetzen der Zentripetalkraft mit der Lorentzkraft ermitteln lässt. Es ergibt sich:

$$\frac{m\,v^2}{r} = q\,v\,B \qquad \text{bzw.} \qquad m\,v^2 = r\,q\,v\,B\,. \tag{2.4}$$

Dabei bezeichnet B die magnetische Flussdichte des Magnetfeldes.

Damit das Teilchen nach dem Anschalten des elektrischen Feldes geradeaus weiterfliegt, muss die Kraft aufgrund des elektrischen Feldes gerade die Lorentzkraft ausgleichen, es muss also gelten:

$$q\,E = q\,v\,B \qquad \text{bzw.} \qquad E = v\,B\,. \tag{2.5}$$

Einsetzen der Ergebnisse aus (2.4) und (2.5) in (2.3) ergibt schließlich für die Beschleunigungsspannung

$$\boxed{U = \frac{1}{2}\,\frac{m\,v^2}{q} = \frac{1}{2}\,r\,v\,B = \frac{1}{2}\,r\,E \approx 330\,\mathrm{V}}\,. \tag{2.6}$$

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 20 - Geladener Staub (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Stefan Petersen)

Sechs identische, anfänglich ruhende Staubteilchen mit Masse $m = 2{,}0\cdot 10^{-10}$ kg und Ladung $q = 2{,}0\cdot 10^{-12}$ C werden, wie nebenstehend skizziert, im Vakuum in einem regelmäßigen Sechseck der Kantenlänge $a = 10\,\mu$m angeordnet. Im Mittelpunkt des Sechsecks befindet sich ein ebenfalls anfänglich ruhendes siebtes Staubteilchen mit gleicher Masse m aber entgegengesetzter Ladung $-q$. Nun werden die Teilchen losgelassen.

Wie groß ist die Geschwindigkeit eines der positiv geladenen Staubteilchen relativ zum negativ geladenen Staubteilchen nachdem sich die Teilchen weit voneinander entfernt haben?

A etwa $5{,}5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

B etwa $6{,}0\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

C etwa $9{,}8\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

D etwa $13\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

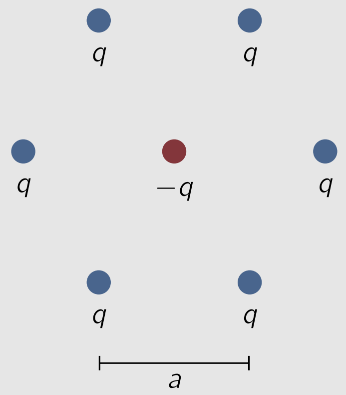


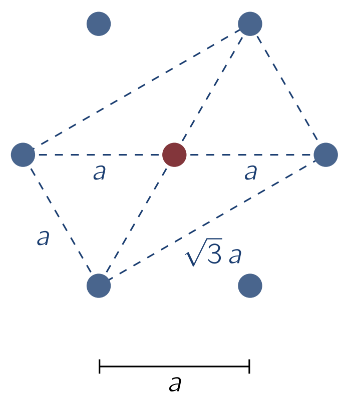
Abb. 5. *Skizze der Anordnung. Die äußeren Teilchen besitzen jeweils eine Masse m und eine Ladung q, das zentrale Teilchen ebenfalls eine Masse m aber eine Ladung −q.*

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Für die Lösung wird nur das elektrostatische Feld der Konfiguration, nicht aber das Gravitationsfeld der Staubteilchen berücksichtigt[2].

Die elektrostatische Feldenergie der anfänglichen Konfiguration berechnet sich aus der Summe der paarweisen Beiträge je zweier Staubteilchen. Betrachte das Teilchen an der linken Seite des Sechsecks. Sein Abstand zu den beiden nächsten positiv geladenen Teilchen beträgt a. Da die äußeren Teilchen in Form eines regelmäßigen Sechsecks um das innere Teilchen angeordnet sind, bildet das innere Teilchen zusammen mit je zwei benachbarten äußeren ein gleichseitiges Dreieck der Kantenlänge a. Damit beträgt der Abstand eines äußeren Teilchens zum inneren ebenfalls a. In der nebenstehenden Abbildung ist zu erkennen, dass der Abstand des linken Teilchens zu einem der schräg jenseits des zentralen Teilchens liegenden Teilchen nach dem Satz des Pythagoras durch $\sqrt{3}\,a$ gegeben ist.



Damit ergibt sich für die elektrostatische Feldenergie E_{el} der anfänglichen Konfiguration

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0}\left[6\left(\frac{2}{a}+\frac{2}{\sqrt{3}\,a}+\frac{1}{2\,a}-\frac{1}{a}\right)-6\,\frac{1}{a}\right] = \frac{6\,q^2}{4\pi\varepsilon_0\,a}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}+\frac{1}{4}\right). \tag{2.7}$$

Wenn sich die Teilchen weit voneinander entfernt haben, ist die elektrostatische Feldenergie in guter Näherung gleich Null. Aufgrund der Energieerhaltung muss diese dann vollständig in der kinetischen

Energie der Teilchen zu finden sein. Aufgrund der Symmetrie der Ausgangssituation ist auch die kinetische Energie der sechs davonfliegenden, positiv geladenen Staubteilchen identisch, während das mittlere Teilchen in Ruhe verbleibt. Für die kinetische Energie eines Teilchens gilt daher:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}\, m\, v^2 = \frac{1}{6} E_{\text{el}} = \frac{q^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0\, a} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{4}\right) . \tag{2.8}$$

Damit ergibt sich für die gesuchte Geschwindigkeit v des Teilchens

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{2\,E_{\text{kin}}}{m}} = \sqrt{\frac{q^2}{8\,\pi\, m\,\varepsilon_0\, a}\,\frac{4+\sqrt{3}}{\sqrt{3}}} \approx 5{,}5\,\mathrm{m\,s^{-1}}} . \tag{2.9}$$

Korrekte Antwort: *A*

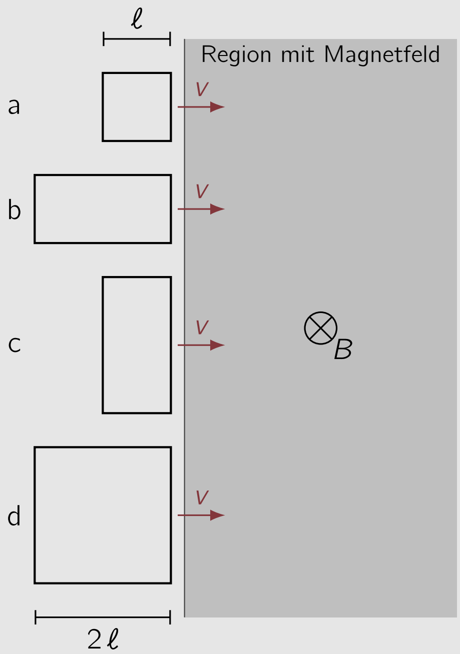
Hinweis: Die anderen Antwortalternativen ergeben sich aus: *B* - Rechnen mit einer Konfiguration aus nur zwei positiven Ladungen q im Abstand a, *C* - Berücksichtigen der elektrostatischen Energie nur eines Teilchens und Vernachlässigen der Änderung der übrigen Konfiguration, *D* - Vergessen des Faktors 6 in kinetischer Energie.

[b] Die elektrische Feldenergie ist bis auf einen numerischen Faktor proportional zu $\frac{q^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{1}{a}$, wohingegen die Feldenergie des Gravitationsfeldes proportional zu $G\, m^2\, \frac{1}{a}$ ist. Der Quotient aus beiden Feldenergien ist mit den gegebenen Werten für die Ladung und die Masse in der Größenordnung von 10^{16}, so dass der Beitrag der Gravitation hier vernachlässigt werden kann, so lange sich die elektrische Feldenergie nicht nahezu zu Null aufaddiert (was nicht der Fall ist, wie man an (2.7) erkennt).

Aufgabe 21 - Induktion in Leiterschleifen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Die vier in der Abbildung gezeigten Leiterschleifen (a bis d) besitzen jeweils Kantenlängen ℓ oder 2ℓ. Sie bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit v in eine scharf begrenzte Region mit einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte B, das in die Zeichenebene hinein orientiert ist.



Wie verhalten sich die direkt bei Eintritt in die Region mit dem Magnetfeld in den Schleifen induzierten Spannungen U_a bis U_d zueinander?

A $|U_a| = |U_b| = |U_c| = |U_d|$

B $|U_a| < |U_b| < |U_c| < |U_d|$

C $|U_a| = |U_b| < |U_c| = |U_d|$

D $|U_a| < |U_b| = |U_c| < |U_d|$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die induzierte Spannung ist proportional zur Änderung des magnetischen Flusses durch die Leiterschleife. Da das Magnetfeld homogen ist, ist diese wiederum proportional zur Änderung der Fläche, die in der Region mit dem Magnetfeld ist. Direkt nach dem Eintreten in diese Region ist die induzierte Spannung daher proportional zur Höhe der Leiterschleife in der Zeichenebene und die Breite der Leiterschleife spielt keine Rolle. Daher sind die in den Schleifen a und b induzierten Spannungen gleich und betragsmäßig geringer als die in den Schleifen c und d induzierten Spannungen, die ebenfalls zueinander gleich sind.

Korrekte Antwort: *C*

Hinweis: Alternativ kann die Aufgabe auch durch Betrachtung der Lorentzkraft auf eine Ladung in der vorderen Leiterkante gelöst werden. Betrachte eine Ladung q, diesich mit der Leiterkante mit einer Geschwindigkeit v in die Region mit dem Magnetfeld hinein bewegt. Dort erfährt sie eine Lorentzkraft $F = q\,v\,B$ parallel zu der Leiterkante. Zwischen den beiden vorderen Ecken der Leiterschleife entsteht so eine Potentialdifferenz von $U = F\,\ell\,/\,q = v\,B\,\ell$ bzw. $U = F\,2\ell\,/\,q = 2\,v\,B\,\ell$, was zu der gleichen Antwortmöglichkeit führt.

Aufgabe 22 - Magnetfall (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024)

Ein zylinderförmiger Magnet wird durch drei verschiedene, senkrecht aufgestellte Rohre fallen gelassen. Die Rohre haben identische Abmessungen, bestehen aber aus unterschiedlichem Material - eines aus Plexiglas, eines aus Messing und eines aus Aluminium.

Für eine Fallstrecke von $L = 1{,}0\,\mathrm{m}$ in den Rohren werden die folgenden Fallzeiten des Magneten gemessen:

$$\begin{aligned} \text{Plexiglas} \quad & t_{\text{Plexiglas}} = 0{,}46\,\mathrm{s} \\ \text{Messing} \quad & t_{\text{Messing}} = 2{,}15\,\mathrm{s} \\ \text{Aluminium} \quad & t_{\text{Aluminium}} = 3{,}81\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Die elektrische Leitfähigkeit des Materials, aus dem das Aluminiumrohr besteht, beträgt $\sigma_{\text{Aluminium}} = 3{,}7 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}$.

Welcher Wert ergibt sich aus den Fallzeiten als Abschätzung für die elektrische Leitfähigkeit σ_{Messing} des Materials des Messingrohres?

A $1{,}2 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}$ B $2{,}1 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}$

C $4{,}9 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}$ D $6{,}6 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn der Magnet in einem der Metallrohre fällt, werden in dem Rohr Wirbelströme induziert, die wiederum ein Magnetfeld hervorrufen, das dem Magnetfeld des Magneten entgegengesetzt ist und diesen bremst.

Nach dem Induktionsgesetz ist die von dem Magneten in horizontalen Querschnitten des Rohrs induzierte Spannung proportional zur Änderung des magnetischen Flusses durch den betrachteten Querschnitt. Diese ist proportional zur Geschwindigkeit des Magneten.

Die in einem Rohrquerschnitt umgesetzte elektrische Leistung P ist gleich dem Quadrat der entlang des Querschnitts induzierten Spannung U geteilt durch den Widerstand des Rohrquerschnitts: $P = U^2/R$. U ist nun aber proportional zur mittleren Fallgeschwindigkeit $v = L/t$ und P entspricht der insgesamt beim Fall umgesetzten Energie $m\,g\,L$ geteilt durch die Fallzeit t.

Zusammen ergibt sich daraus eine Proportionalität von t zu $1/R$ und damit zu σ.

Damit folgt für die Leitfähigkeit des Materials des Messingrohres

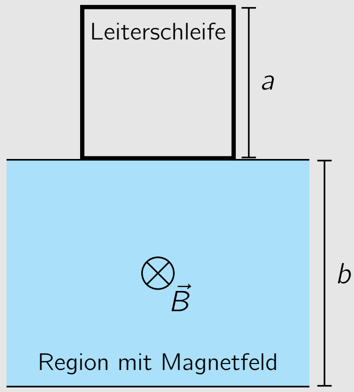
$$\boxed{\sigma_{\text{Messing}} = \sigma_{\text{Aluminium}} \frac{t_{\text{Messing}}}{t_{\text{Aluminium}}} \approx 2{,}1 \cdot 10^{7}\,\mathrm{A\,V^{-1}\,m^{-1}}}\,. \tag{2.10}$$

Korrekte Antwort: *B*

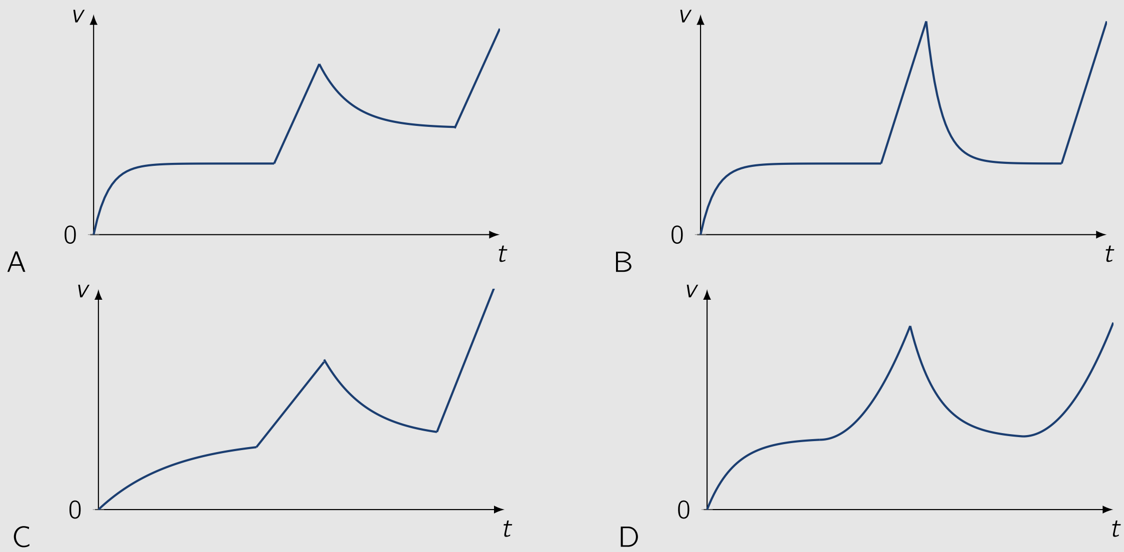
Aufgabe 23 - Fallende Leiterschleife im Magnetfeld (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Richard Reindl)

Eine quadratische Leiterschleife mit Kantenlänge a, Widerstand R und Masse m fällt, wie nebenstehend skizziert, aus der Ruhe heraus in eine scharf begrenzte Region der Breite $b > a$ mit einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte $\vec{B}$, das in die Zeichenebene hinein orientiert ist. Die Graphen A, B, C und D sollen den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit der Leiterschleife für verschiedene Magnetfeldstärken darstellen.



Welcher der Graphen zeigt einen physikalisch möglichen Vorgang?



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Der Fall der Leiterschleife kann in vier Phasen unterteilt werden, wie in der folgenden Abbildung gezeigt.

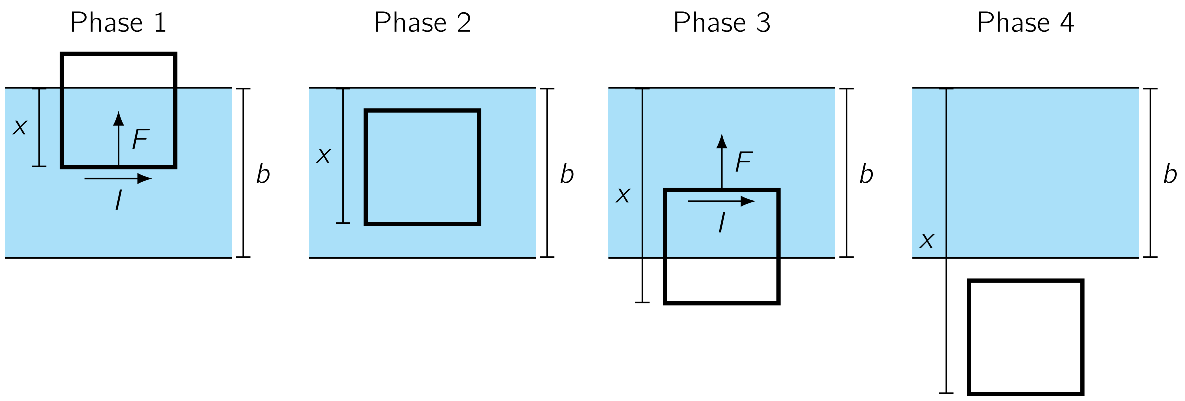


Abb. 6. *Skizzen der vier Phasen des Falls der Leiterschleife.*

Phase 1: $0 < x < a$
Bezeichne mit v die vertikale Geschwindigkeit der Leiterschleife. Im unteren Stück der Leiterschleife wird die Spannung $U = v\,B\,a$ induziert und es fließt ein Strom der Stromstärke $I = \frac{v\,B\,a}{R}$ nach rechts. Dadurch wirkt auf das untere Leiterstück die nach oben gerichtete und damit bremsende Lorentzkraft

$$F = I\,B\,a = \frac{v\,B^2\,a^2}{R}\,. \tag{2.11}$$

Die Beschleunigung der Leiterschleife ist also stets kleiner als die Erdbeschleunigung g. Die Geschwindigkeit v wächst, bis F gleich der Gewichtskraft $m\,g$ der Leiterschleife wird. v nähert sich also an die stationäre Geschwindigkeit

$$v_s = \frac{m\,g\,R}{B^2\,a^2} \tag{2.12}$$

an.

Phase 2: $a < x < b$
In diesem Bereich ändert sich der magnetische Fluss durch die Leiterschleife nicht, so dass kein Strom induziert wird und keine Bremskraft wirkt. Die Leiterschleife fällt frei und die Geschwindigkeit ändert sich linear mit der Zeit.

Phase 3: $b < x < b + a$
Der Induktionsstrom $I = \frac{v\,B\,a}{R}$ fließt jetzt im oberen Leiterstück nach rechts. Dies führt erneut auf die Bremskraft (2.11) und die gleiche stationäre Geschwindigkeit (2.12) als Grenzwert wie in Phase 1.

Phase 4: $b + a < x$
Auch hier ändert sich der magnetische Fluss durch die Leiterschleife nicht, so dass sich diese wieder im freien Fall befindet und die Geschwindigkeit linear mit der Zeit zunimmt. Die Steigung der Geschwindigkeitsgeraden muss die gleiche wie in Phase 2 sein.

Analyse der Graphen
In Graph A wird in Phase 1 und Phase 3 jeweils eine stationäre Geschwindigkeit erreicht, die aber nicht gleich ist. Damit stellt dieser Graph keinen physikalisch möglichen Verlauf dar.

In Graph B sind die in Phase 1 und 3 erreichten stationären Geschwindigkeiten identisch. Darüber hinaus sind die Geradensteigungen in Phase 2 und 4 gleich. Der Graph kann also einen physikalischen Vorgang darstellen.

In Graph C sind die Geradensteigungen in Phase 2 und 4 nicht gleich. Der Graph beschreibt also auch keinen physikalisch möglichen Vorgang.

In Graph D sind die Teilstücke in Phase 2 und 4 keine Geraden, so dass auch dieser Graph keinen physikalisch möglichen Vorgang beschreibt.

Damit beschreibt nur der Graph B einen physikalisch möglichen Vorgang.

Korrekte Antwort: *B*

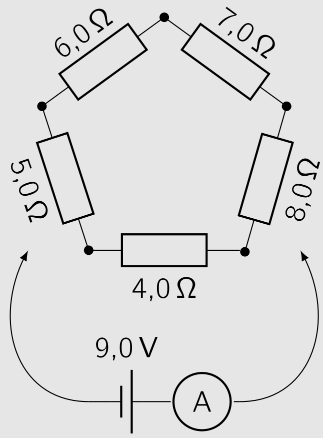
Hinweis: Von den Teilnehmenden wird eine Angabe der Formeln (2.11) und (2.12) nicht erwartet. Es ist ausreichend, wenn erkannt und begründet wird, dass in Phase 1 und 3 eine gleiche stationäre Geschwindigkeit existiert.

2.2 Gleischstromkreise

Aufgabe 24 - Fünfeck aus Widerständen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Eine Batterie mit einer Spannung von 9,0 V ist mit einem idealen Amperemeter in Reihe geschaltet. Die Reihenschaltung kann an zwei beliebige Ecken des abgebildeten Widerstandfünfecks angeschlossen werden.



Wie groß ist die betragsmäßig kleinste Stromstärke, die dabei durch das Amperemeter fließt?

A 0,30 A B 0,60 A C 1,2 A D 2,3 A

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn die Batterie mit dem Amperemeter an zwei verschiedene Ecken des Widerstandsfünfecks angeschlossen wird, fließt der Strom durch eine Parallelschaltung mit zwei Zweigen, in denen jeweils bis zu vier Widerstände in Reihe geschaltet sind. Die Zusammensetzung der beiden Parallelzweige ist davon abhängig, an welchen Ecken die Batterie angeschlossen wird. Die Stromstärke I, die durch das Amperemeter fließt, ergibt sich aus der Batteriespannung $U = 9{,}0\,\mathrm{V}$ und dem Ersatzwiderstand R_{Ersatz} der Parallelschaltung zu $\frac{U}{R_{\mathrm{Ersatz}}}$.

Bei einer Parallelschaltung zweier Widerstände mit Widerstandswerten R_1 und R_2 beträgt der Wert des Ersatzwiderstandes $R_{\mathrm{Ersatz}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ und ist damit immer kleiner als der kleinste Widerstandswert eines der Parallelzweige. Für einen möglichst geringen Strom muss daher die Batterie so angeschlossen werden, dass der Widerstandswert in dem Parallelzweig mit dem kleineren Widerstandswert möglichst groß wird. Die Summe der fünf Widerstände ist konstant. Daher ist diese Bedingung genau dann erfüllt, wenn beide Parallelzweige den gleichen Widerstandswert besitzen. Dies wird erreicht, wenn die Batterie mit dem Amperemeter an der Ecke zwischen dem 6,0 Ω und 7,0 Ω sowie zwischen dem 4,0 Ω und 8,0 Ω Widerstand angeschlossen wird.

In diesem Fall besitzen beide Parallelzweige einen Widerstandswert von 15,0 Ω und der Ersatzwiderstand beträgt $R_{\mathrm{Ersatz}} = 7{,}5\,\Omega$. Damit ist die Stromstärke:

$$\boxed{I = \frac{U}{R_{\mathrm{Ersatz}}} \approx 1{,}2\,\mathrm{A}}\,. \tag{2.13}$$

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 25 - Batteriebetrieb (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2020)

Eine einzelne Batterie kann eine Glühlampe für eine Zeit t zum Leuchten bringen. Nimm vereinfachend an, dass die Lampe mit konstanter Helligkeit leuchtet, bis die Batterie leer ist, und dass der Widerstand der Glühlampe konstant ist.

Welche Aussage ist korrekt, wenn zwei dieser Batterien zum Betreiben von zwei der Glühlampen verwendet werden?

A Wenn die Batterien in Serie und die Glühlampen in Serie geschaltet sind, können die Glühlampen etwa eine Zeit $t/4$ betrieben werden.

B Wenn die Batterien in Serie und die Glühlampen parallel geschaltet sind, können die Glühlampen etwa eine Zeit $t/2$ betrieben werden.

C Wenn die Batterien parallel und die Glühlampen in Serie geschaltet sind, können die Glühlampen etwa eine Zeit $2\,t$ betrieben werden.

D Wenn die Batterien parallel und die Glühlampen ebenfalls parallel geschaltet sind, können die Glühlampen etwa eine Zeit t betrieben werden.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Bezeichne mit U die Spannung einer Batterie, mit R den Widerstand einer Glühlampe und mit E die von einer Batterie zur Verfügung gestellte elektrische Energie. Dann gilt für die Zeit t bei der Schaltung mit einer Batterie und einer Lampe durch die die Stromstärke I fließt: $E = U\,I\,t = \frac{U^2}{R}\,t$ beziehungsweise $t = \frac{E\,R}{U^2}$. Wenn zwei Batterien verwendet werden, steht doppelt so viel elektrische Energie zur Verfügung. Die angelegte Spannung verdoppelt sich bei einer Serienschaltung der Batterien, wohingegen sie bei der Parallelschaltung gleich bleibt. Analog verdoppelt sich der Widerstandswert der Schaltung bei der Serienschaltung der Lampen. Bei der Parallelschaltung der Lampen halbiert sich hingegen der Widerstandswert. Die Zeiten t_A bis t_D, die die vier gegebenen Lampenschaltungen betrieben werden können, ergeben sich damit zu

$$t_\mathrm{A} = \frac{2\,E\cdot 2\,R}{(2\,U)^2} = t \qquad t_\mathrm{B} = \frac{2\,E\cdot \frac{R}{2}}{(2\,U)^2} = \frac{t}{4} \qquad t_\mathrm{C} = \frac{2\,E\cdot 2\,R}{U^2} = 4\,t \qquad t_\mathrm{D} = \frac{2\,E\cdot \frac{R}{2}}{U^2} = t\,. \quad (2.14)$$

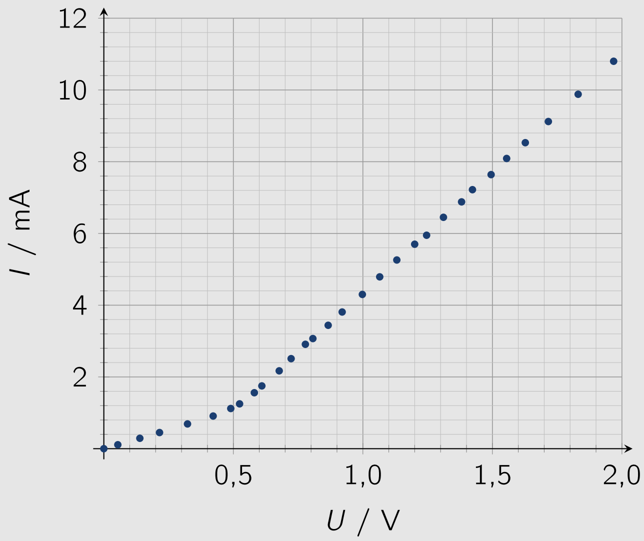
Damit ist nur die letzte Aussage richtig.

Korrekte Antwort: *D*

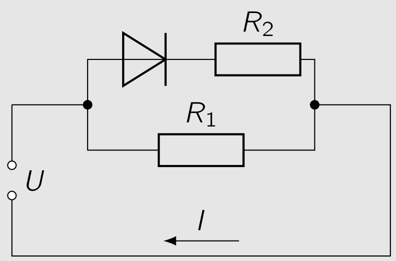
Aufgabe 26 - Diode und Widerstände (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020)

Eine Diode ist ein elektronisches Bauelement, das vereinfacht in einer Richtung, der Sperrrichtung, komplett isolierend wirkt. In umgekehrter Richtung, der Durchlassrichtung, lässt die Diode bis zu einer bestimmten Spannung auch kaum Strom passieren. Ab dieser Spannung verhält sie sich aber näherungsweise wie ein idealer Leiter.



In der nachfolgend abgebildeten Schaltung sind eine Diode (—▷|—) und zwei Widerstände mit Widerstandswerten R_1 und R_2 verbaut. In dem nebenstehenden Graphen sind Messwerte der Stromstärke I in der Schaltung als Funktion der angelegten Spannung U dargestellt.



Welche Widerstandswerte passen am besten zu den dargestellten Messwerten?

A $R_1 = 220\,\Omega$ und $R_2 = 670\,\Omega$

B $R_1 = 220\,\Omega$ und $R_2 = 330\,\Omega$

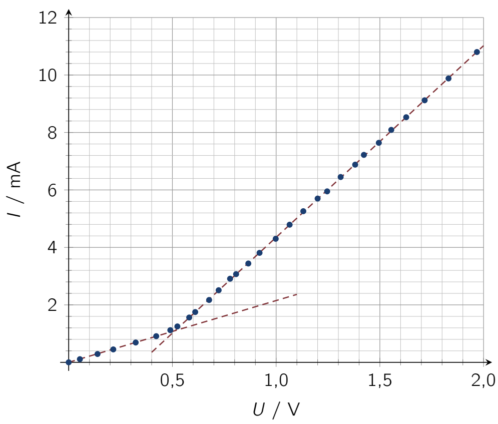
C $R_1 = 470\,\Omega$ und $R_2 = 220\,\Omega$

D $R_1 = 470\,\Omega$ und $R_2 = 150\,\Omega$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Der Verlauf der Messwerte lässt sich in zwei Bereiche aufteilen. Solange die Spannung nicht groß genug ist, wirkt die Diode als Isolator und die Schaltung verhält sich so, als würde sie den oberen Parallelzweig gar nicht enthalten. Sobald die Spannung aber groß genug wird, ist die Diode sehr gut leitend und es fällt eine nahezu konstante Spannung über ihr ab. Daher wirkt sich eine weitere Erhöhung der Spannung auch direkt auf den Widerstand im oberen Parallelzweig aus. Die Strom-Spannungs-Kennlinie verläuft daher im Weiteren wie die einer Parallelschaltung der beiden Widerstände. In dem nebenstehenden Graphen ist der lineare Anstieg der Stromstärke mit der Spannung in den beiden Bereichen gekennzeichnet.



Aus den Steigungen $b_1 \approx \frac{2{,}40\,\mathrm{mA}}{1{,}10\,\mathrm{V}} \approx 2{,}18 \cdot 10^{-3}\,\Omega^{-1}$ und $b_2 \approx \frac{6{,}00\,\mathrm{mA}}{0{,}90\,\mathrm{V}} \approx 6{,}67 \cdot 10^{-3}\,\Omega^{-1}$ der

Ausgleichsgeraden lassen sich die Widerstandswerte bestimmen. Es ergeben sich:

$$R_1 = \frac{1}{b_1} \approx 459\,\Omega \qquad \text{und} \qquad R_2 = \left(\frac{1}{R_\text{parallel}} - \frac{1}{R_1}\right)^{-1} = \frac{1}{b_2 - b_1} \approx 223\,\Omega\,. \tag{2.15}$$

Damit passen die Widerstandswerte $R_1 = 470\,\Omega$ und $R_2 = 220\,\Omega$ am besten zu den dargestellten Messwerten.

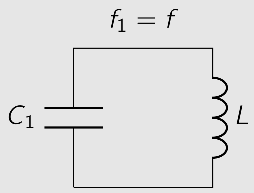
Korrekte Antwort: *C*

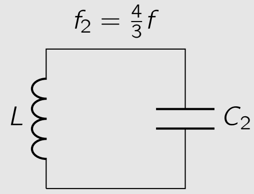
2.3 Wechselstromkreise

Aufgabe 27 - Schwingkreise (MC-Aufgabe)

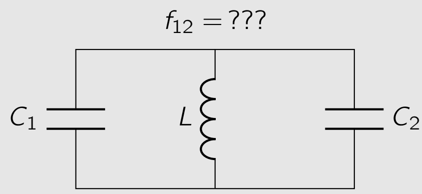
(2. Rd. zur IPhO 2024, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Thomas Hellerl & Rolf Faßbender)

Eine Schaltung aus einer idealen Spule und einem idealen Kondensator heißt Schwingkreis. Die beiden, oben abgebildeten elektrischen Schwingkreise mit gleicher Induktivität L aber unterschiedlichen Kapazitäten C_i schwingen völlig widerstandslos mit den angegebenen Frequenzen.





Wie groß ist die Schwingungsfrequenz f_{12} (Eigenfrequenz) des folgenden, gekoppelten Systems?



A $\frac{2}{3} f$ B $\frac{3}{4} f$ C $\frac{4}{5} f$ D $\frac{5}{4} f$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Periodendauern der Schwingungen der oberen Schwingkreise sind gegeben durch die Thomsonformel

$$T_i = 2\,\pi \sqrt{L\,C_i}\,. \tag{2.16}$$

Im unteren, gekoppelten Schwingkreis addieren sich die Kapazitäten, da sie parallel geschaltet sind.

$$C_{12} = C_1 + C_2\,. \tag{2.17}$$

Für seine Schwingungsdauer T_{12} gilt demnach

$$T_{12} = 2\,\pi \sqrt{L(C_1 + C_2)} \qquad \text{bzw.} \qquad T_{12}^2 = 4\,\pi^2\,L\,(C_1 + C_2) = T_1^2 + T_2^2\,. \tag{2.18}$$

Somit erhalten wir

$$\frac{1}{f_{12}^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2}\,. \tag{2.19}$$

Daraus ergibt sich mit den gegebenen Werten für die gesuchte Frequenz

$$\boxed{f_{12} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f^2} + \frac{1}{\frac{16}{9}\,f^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{9}{16}}}\,f = \frac{4}{5}\,f}\,. \tag{2.20}$$

Korrekte Antwort: *C*

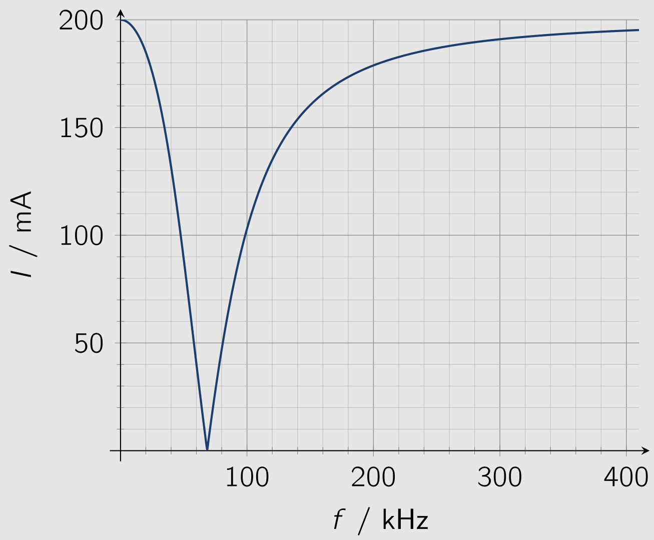
Aufgabe 28 - Wechselstromschaltkreis (MC-Aufgabe)

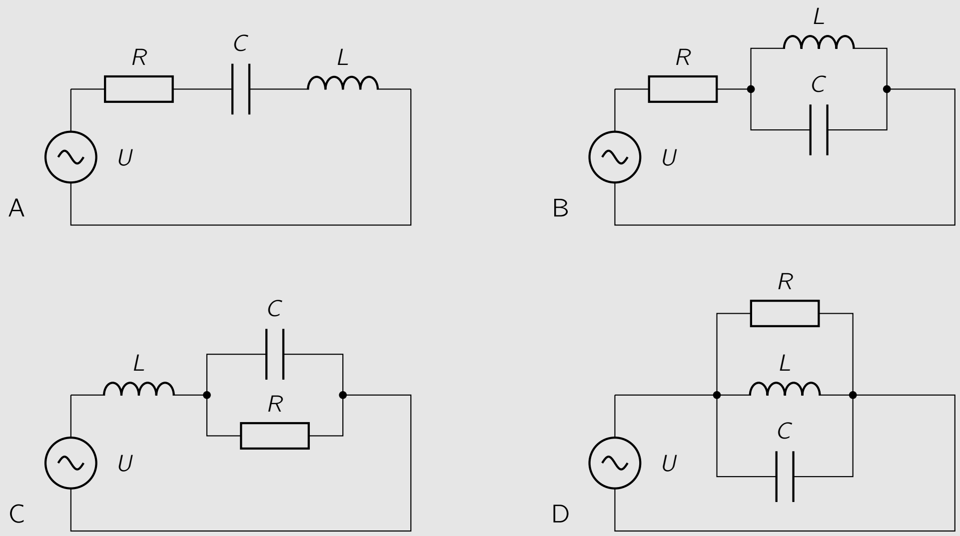
(2. Rd. zur IPhO 2019, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Stefan Petersen)

Ein Widerstand mit Widerstandswert R, ein Kondensator der Kapazität C und eine Spule der Induktivität L werden an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen. Die Amplitude der Wechselspannung beträgt U und die Bauteile können als ideal angenommen werden.

Der folgende Graph zeigt die Amplitude I der Stromstärke in dem Stromkreis als Funktion der Frequenz f der sinusförmigen Wechselspannung.

Welche der folgenden Schaltskizzen stellt die verwendete Schaltung korrekt dar?





Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Dem Graphen entnimmt man für sehr kleine Frequenzen der Wechselspannung eine endliche, von Null verschiedene Amplitude der Stromstärke. Der Scheinwiderstand Z der Schaltung, der oft auch als Impedanz bezeichnet wird, muss wegen des Zusammenhanges $I = \frac{U}{Z}$ bei sehr kleinen Frequenzen daher ebenfalls einen von Null verschiedenen und endlichen Wert besitzen. Damit scheiden bereits die Schaltungen A und D aus. Bei der Schaltung A führt der in Reihe geschaltete Kondensator bei niedrigen Frequenzen zu einem beliebig hohen Scheinwiderstand. Bei Schaltung D ist die Parallelschaltung aufgrund der Spule für niedrige Frequenzen quasi kurzgeschlossen, so dass der Strom beliebig groß werden würde.

Für hohe Frequenzen nähert sich die Stromstärke dem Wert an, die auch für sehr kleine Frequenzen beobachtet wird. Dieses würde in Schaltung C nicht passieren, da dort für hohe Frequenzen der

Widerstand durch den Kondensator kurzgeschlossen würde und der Scheinwiderstand aufgrund der Induktivität dann näherungsweise linear mit der Frequenz ansteigen würde. In Schaltung B wird entsprechend die Induktivität durch den Kondensator kurzgeschlossen, so dass für hohe Frequenzen ein konstanter Wert für den Scheinwiderstand zu erwarten ist. Dies passt zu dem beobachteten asymptotischen Verhalten der Stromstärke.

Von den Schaltungen kommt damit nur die Schaltung B in Frage.

Alternativ lässt sich auch argumentieren, dass gemäß dem Graphen im Resonanzfall kein Strom fließt und die Impedanz folglich unendlich groß ist. Das passiert nur bei der Parallelschaltung von Spule und Kondensator (idealer Parallelschwingkreis). Damit muss Schaltung B korrekt sein.

Korrekte Antwort: *B*

3 Thermodynamik

3.1 Temperatur, Wärmekapazität & thermische Ausdehnung

Aufgabe 29 - Heiße Scheibe (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2017)

Eine Metallscheibe mit einem Loch in ihrer Mitte wird erwärmt.

Was passiert beim Erwärmen?

A Das Loch wird größer.
B Das Loch wird kleiner.
C Das Loch bleibt gleich groß.
D Diese Frage lässt sich ohne weitere Informationen nicht beantworten.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Da sich das Material der Scheibe beim Erwärmen ausdehnt, dehnt sich jede Länge in der Scheibe aus, wobei die Mitte der Scheibe aus Symmetriegründen ortsfest bleibt. Insbesondere dehnt sich auch der Umfang des Loches aus, so dass das Loch insgesamt größer wird.

Korrekte Antwort: *A*

Aufgabe 30 - Temperatureinheiten (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Stefan Petersen)

Die fiktive Temperatureinheit Nups ist durch Festlegung von $0\,\mathrm{K} = 1000\,\mathrm{Nups}$, $0\,°\mathrm{C} = 400\,\mathrm{Nups}$ und eine lineare Änderung mit der Temperatur festgelegt.

Welcher Temperatur in °C entspricht am ehesten $0\,\mathrm{Nups}$?

A $120\,°\mathrm{C}$
B $150\,°\mathrm{C}$
C $180\,°\mathrm{C}$
D $210\,°\mathrm{C}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Temperatur $0\,\mathrm{Nups}$ ist von $400\,\mathrm{Nups}$ $2/3$ so weit weg wie $400\,\mathrm{Nups}$ von $1000\,\mathrm{Nups}$. Aufgrund der linearen Änderung mit der Temperatur ist damit die Temperaturdifferenz von $400\,\mathrm{Nups}$ zu $0\,\mathrm{Nups}$ gleich $2/3$ der Temperaturdifferenz zwischen $0\,\mathrm{K}$ und $0\,°\mathrm{C} \approx 273\,\mathrm{K}$. Die Temperatur $0\,\mathrm{Nups}$ entspricht also ungefähr

$$\boxed{0\,°\mathrm{C} + \frac{2}{3}273\,°\mathrm{C} \approx 180\,°\mathrm{C}}. \qquad (3.1)$$

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 31 - Wärmekapazität (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2017)

Die gleiche Wärmeenergie wird vier Proben verschiedener Stoffe zugeführt. Die Temperatur von 3 g des Stoffes A erhöht sich dabei um 8 K, die Temperatur von 4 g des Stoffes B um 5 K, die Temperatur von 6 g des Stoffes C um 9 K und die Temperatur von 7 g des Stoffes D um 4 K.

Welcher Stoff hat die höchste spezifische Wärmekapazität?

A B C D

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die für eine Erwärmung einer Probe der Masse m um eine Temperaturdifferenz ΔT notwendige Wärmeenergie ΔE hängt gemäß

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

von deren spezifischer Wärmekapazität c ab. Die spezifische Wärmekapazität ist damit invers proportional zu dem Produkt $m \cdot \Delta T$. Die höchste spezifische Wärmekapazität hat also der Stoff, bei dem dieses Produkt am kleinsten ist.

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 32 - Wasserkocher mit Eiswürfel (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024)

In einem Wasserkocher wird Wasser erhitzt. Während des Erhitzens wird ein Eiswürfel der Temperatur $\vartheta_0 = 0\,°\mathrm{C}$ in das Wasser geworfen. Abbildung 7 zeigt die Temperatur des Wassers als Funktion der Zeit. Die Temperatur des Wassers ist anfänglich gleich der Raumtemperatur und kann zu jeder Zeit als im ganzen Wasserkocher gleich angenommen werden.

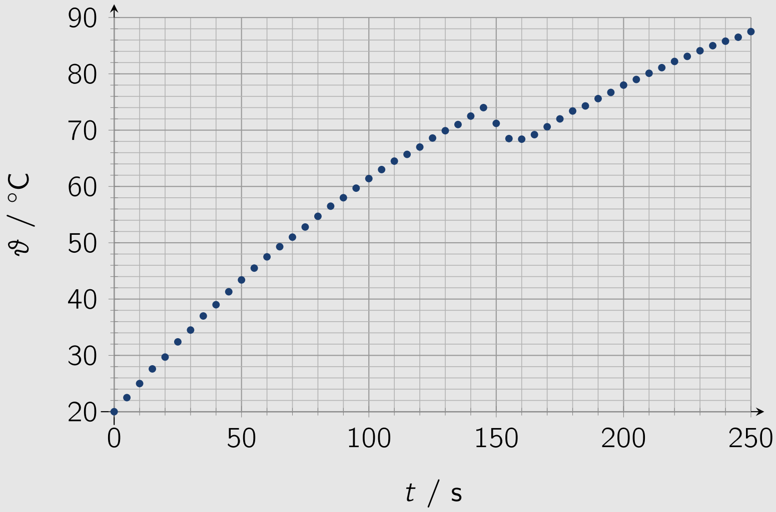


Abb. 7. *Temperatur ϑ im Wasserkocher in Abhängigkeit von der Heizzeit t.*

Die Heizleistung des Wasserkochers beträgt 900 W. Für die spezifische Wärmekapazität von Wasser kann der Wert $c = 4{,}2\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$ verwendet werden und für die spezifische Schmelzwärme (oder Schmelzenthalpie) von Eis $h = 335\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$.

Welche Masse besaß der Eiswürfel, als er in das Wasser geworfen wurde?

A 16 g B 26 g C 56 g D 145 g

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

In der Kurve ist ab etwa 145 s ein deutliches Absinken der Temperatur zu erkennen. Zu dieser Zeit wurde offensichtlich der Eiswürfel ins Wasser geworfen.

Die Masse des Eiswürfels lässt sich aus der Absenkung der Temperatur bestimmen. Bezeichne mit m_{Eis} die Masse des Eiswürfels und m_{W} die ebenfalls unbekannte Masse des Wassers, das sich anfänglich im Wasserkocher befindet.

Aus dem Graphen lässt sich für die Zeit $t' = 160\,\mathrm{s}$ eine Wassertemperatur von $\vartheta' = 68{,}5\,°\mathrm{C}$ ablesen. Vergleicht man diese Temperatur mit der Fortführung der Heizkurve ohne das Hinzufügen des Eiswürfels (vgl. Abb. 8), so ist ein Temperaturunterschied zwischen den beiden Verläufen von $\Delta\vartheta \approx 76{,}5\,°\mathrm{C} - 68{,}5\,°\mathrm{C} = 9{,}0\,\mathrm{K}$ zu erkennen. Die bei dem Abkühlen des Wassers um diese Temperatur freiwerdende Energie wird zum Schmelzen des Eiswürfels und Erhitzen des dabei entstehenden Schmelzwassers auf die Temperatur ϑ' aufgewendet. Daher gilt:

$$c\, m_{\mathrm{W}}\, \Delta\vartheta = \left(c\left(\vartheta' - \vartheta_0\right) + h\right) m_{\mathrm{Eis}}\,. \tag{3.2}$$

Um die noch unbekannte Masse m_W des Wassers zu bestimmen, kann der Verlauf der Heizkurve für kleine Temperaturen untersucht werden. Zu Beginn des Heizens wird nur wenig Wärme an die Umgebung abgeführt, so dass die Heizleistung P_{Heiz} fast ausschließlich zum Erhitzen des Wassers genutzt wird. In einer kleinen Zeit δt erwärmt sich das Wasser um eine Temperatur $\delta\vartheta$, für die gilt:

$$P_{Heiz}\,\delta t = c\,m_W\,\delta\vartheta\,. \tag{3.3}$$

Mit Hilfe der gegebenen Werte und der aus dem Graphen abzulesenden Steigung $\delta\vartheta/\delta t \approx 0{,}50\,\mathrm{K\,s^{-1}}$ bestimmt sich die Wassermasse daraus zu

$$m_W = \frac{P_{Heiz}}{c\,\frac{\delta\vartheta}{\delta t}} \approx 0{,}43\,\mathrm{kg}\,. \tag{3.4}$$

Damit folgt schließlich für die Masse des Eiswürfels

$$\boxed{m_{Eis} = m_W\,\frac{c\,\Delta\vartheta}{c(\vartheta' - \vartheta_0) + h} \approx 26\,\mathrm{g}}\,. \tag{3.5}$$

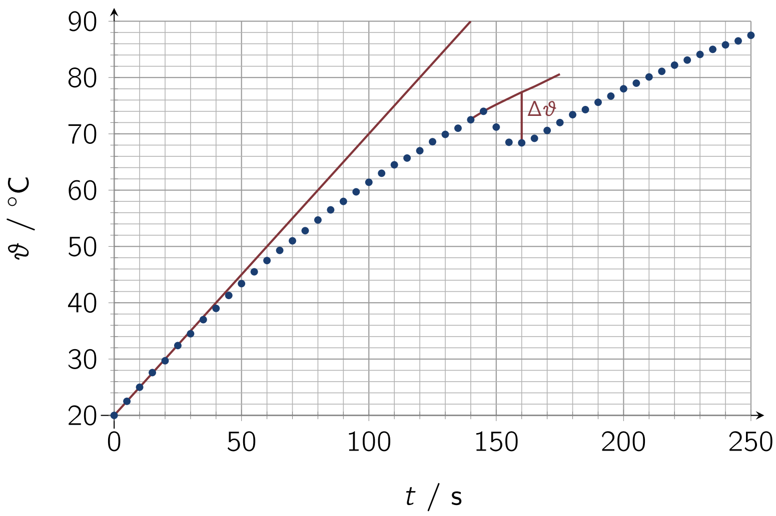


Abb. 8. *Temperatur ϑ im Wasserkocher in Abhängigkeit von der Heizzeit t mit konstruierten Größen für die Lösung.*

Korrekte Antwort: *B*

Bemerkung: Die Antwortoption A ergibt sich, wenn der Temperatursprung ohne Extrapolation der Daten zu etwa 5,5 K bestimmt wird. Antwortoption C ist das Ergebnis ohne Berücksichtigung der latenten Wärme und Antwortoption D folgt aus der Temperatur von 88 °C nach 250 s heizen, wenn angenommen wird, dass die gesamte Heizleistung in die Erwärmung des Wassers und das Schmelzen des Eises geht, die Wärmeabgabe an die Umgebung also nicht berücksichtigt wird.

Aufgabe 33 - Eis schmelzen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

An einem kalten Wintertag stehen drei identische, nicht isolierte Holzkisten vor dem Haus, die jeweils mit der gleichen Menge Eis der Temperatur 0,0 °C befüllt werden. Um das Eis zu schmelzen, wird in jede der Boxen ein elektrisches Heizelement platziert. Die Heizelemente sind identisch, werden aber mit unterschiedlichen Spannungen betrieben.

In der ersten Kiste wird das Heizelement mit einer Spannung von 80 V betrieben. Das gesamte Eis in der Kiste schmilzt dann in 20,0 **Minuten**. An das Heizelement der zweiten Kiste wird eine Spannung von 120 V angelegt, woraufhin das Eis in nur 4,0 **Minuten** vollständig schmilzt. In der dritten Kiste wird für das Heizelement eine Spannung von 40 V verwendet.

Die Heizelemente sind so konstruiert, dass sie die gesamte Eismasse in der jeweiligen Kiste gleichzeitig heizen. Nimm an, dass das Schmelzwasser nicht durch das Heizelement erwärmt wird.

Welche der folgenden Aussagen ist dann für das Schmelzen des Eises in der dritten Kiste zutreffend?

A Zum Schmelzen des gesamten Eises in der dritten Kiste werden etwa 80 Minuten benötigt.

B Zum Schmelzen des gesamten Eises in der dritten Kiste werden etwa 100 Minuten benötigt.

C Zum Schmelzen des gesamten Eises in der dritten Kiste werden etwa 130 Minuten benötigt.

D Mit der verwendeten Spannung ist es nicht möglich, das gesamte Eis zu schmelzen.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Dem Eis wird durch das Heizelement eine Wärmeleistung P_{zu} zugeführt. Gleichzeitig gibt die Kiste aber eine Wärmeleistung P_{ab} an die kalte Umgebung ab. Die elektrische Leistung der Heizung ist bei einem konstanten elektrischen Widerstand der Heizung proportional zum Quadrat der Spannung U, die an das Heizelement angelegt wird. Die an die Umgebung abgegebene Leistung ist proportional zur konstanten Temperaturdifferenz ΔT der Eistemperatur zur Umgebungstemperatur.

Um das Eis in einer Zeit t vollständig zu schmelzen, muss die dem Eis insgesamt zugeführte Wärme gleich der Schmelzwärme $Q = m\,h$ sein. Dabei bezeichnet m die Masse des Eises und h dessen spezifische Schmelzwärme oder Schmelzenthalpie. Es muss also gelten:

$$(P_{\text{zu}} - P_{\text{ab}})\,t = Q \qquad \text{bzw.} \qquad (c_1\,U^2 - c_2\,\Delta T)\,t = m\,h \tag{3.6}$$

mit Proportionalitätskonstanten c_1 und c_2. Mit den Abkürzungen $\alpha = \frac{c_1}{m\,h}$ und $\beta = \frac{c_2\,\Delta T}{m\,h}$ lässt sich dieser Ausdruck umschreiben zu

$$\alpha\,U^2 - \beta = \frac{1}{t}\,. \tag{3.7}$$

Für zwei Werte von U sind die dazugehörigen Schmelzzeiten t bekannt. Daraus lassen sich die beiden Konstanten α und β bestimmen zu

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}}{U_2^2 - U_1^2} = \frac{\frac{1}{4{,}0\,\text{min}} - \frac{1}{20\,\text{min}}}{(120\,\text{V})^2 - (80\,\text{V})^2} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-5}\,\text{min}^{-1}\,\text{V}^{-2},\\ \beta &= \frac{\frac{U_1^2}{t_2} - \frac{U_2^2}{t_1}}{U_2^2 - U_1^2} \approx 0{,}11\,\text{min}^{-1}\,.\end{aligned} \tag{3.8}$$

Mit den ermittelten Werten lässt sich die Zeit t_3 bestimmen, die für das Schmelzen des Eises in der dritten Kiste notwendig ist:

$$\boxed{t_3 = \frac{1}{\alpha\, U_3^2 - \beta} \approx \frac{1}{2{,}5 \cdot 10^{-5}\,\mathsf{min}^{-1}\,\mathsf{V}^{-2} \cdot (40\,\mathsf{V})^2 - 0{,}11\,\mathsf{min}^{-1}} \approx -14\,\mathsf{min}}\,. \tag{3.9}$$

Das Ergebnis für die Zeit ist negativ, so dass es bei der gegebenen Heizspannung aufgrund der Wärmeabgabe an die Umgebung überhaupt nicht möglich ist, das Eis vollständig zu schmelzen.

Hinweis: Für die Lösung wäre es ausreichend gewesen zu erkennen, dass β größer ist als $\alpha\, U_3^2$.

Korrekte Antwort: *D*

3.2 Wärmetransport

Aufgabe 34 - Wärmeleitung (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020)

Die Enden von drei runden Metallstäben aus identischem Material werden jeweils auf konstanten Temperaturen gehalten. Für die Stäbe sind die folgenden Daten bekannt:

Stab I - Durchmesser: 2,0 cm, Länge: 20 cm, Temperaturen der Stabenden: 50 °C und 20 °C
Stab II - Durchmesser: 3,0 cm, Länge: 50 cm, Temperaturen der Stabenden: 60 °C und 30 °C
Stab III - Durchmesser: 4,0 cm, Länge: 80 cm, Temperaturen der Stabenden: 70 °C und 40 °C

Wie verhalten sich die durch die Stäbe aufgrund von Wärmeleitung übertragenen Wärmeleistungen P_{I}, P_{II} und P_{III} zueinander (Die Leistungen können alle als positiv angenommen werden)?

A $P_{\mathrm{I}} < P_{\mathrm{II}} = P_{\mathrm{III}}$ B $P_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{II}} < P_{\mathrm{III}}$ C $P_{\mathrm{II}} < P_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{III}}$ D $P_{\mathrm{III}} < P_{\mathrm{II}} < P_{\mathrm{I}}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die übertragene Wärmeleistung P ist nach dem Fourierschen Gesetz proportional zur Querschnittsfläche des Stabes und damit zum Quadrat des Durchmessers d. Außerdem ist sie proportional zur Temperaturdifferenz ΔT zwischen den Stabenden und invers proportional zur Länge des Stabes ℓ. Es gilt also:

$$P \sim \frac{d^2}{\ell}\,\Delta T\,. \tag{3.10}$$

Die Temperaturdifferenz ist für alle Stäbe identisch. Entscheidend ist daher das Verhältnis d^2/ℓ. Dieses ist für Stab I und III identisch und beträgt für Stab II nur 9/10 des Wertes der anderen beiden Stäbe. Damit ist $P_{\mathrm{II}} < P_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{III}}$

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 35 - Widerstandserwärmung (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Bernd Schade & Stefan Petersen)

Zwei Widerstände gleicher Bauform werden parallel an eine Spannungsquelle mit einer Spannung von 2,6 V angeschlossen. Dabei fließt ein Gesamtstrom von 310 mA. Mit einer Infrarotkamera wird das nebenstehende Bild der Schaltung gemacht. Die Kamera kann nach einer Kalibrierung auch die Oberflächentemperaturen der beiden Widerstände ermitteln. Sie betragen 33 °C und 67 °C. Die Umgebungstemperatur ist dabei 21 °C.

Welche Werte besitzen die beiden Widerstände ungefähr?

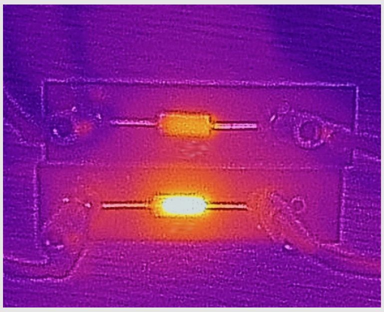


Abb. 9. *Infrarotaufnahme der Widerstände.*

A 1,7 Ω und 6,7 Ω B 12 Ω und 30 Ω C 10 Ω und 45 Ω D 20 Ω und 80 Ω

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die an einem Widerstand mit Widerstandswert R umgesetzte elektrische Leistung P_{el} ergibt sich aus der über dem Widerstand abfallenden Spannung U und dem durch den Widerstand fließenden Strom I zu

$$P_{\mathrm{el}} = U\,I = \frac{U^2}{R}\,. \tag{3.11}$$

Dabei wurde für die zweite Umformung das ohmsche Gesetz $R = U/I$ genutzt.

Die umgesetzte elektrische Leistung wird in Wärme umgewandelt, die der Widerstand an die Umgebung abgibt. Für nicht zu hohe Temperaturen ist die Wärmeabgabe an die Umgebung in guter Näherung proportional zur Temperaturdifferenz zur Umgebung[a]. Für die abgegebene Wärmeleistung P_{th} gilt also

$$P_{\mathrm{th}} = \kappa\,(\vartheta - \vartheta_0) =: \kappa\,\Delta T\,, \tag{3.12}$$

wobei ϑ sowie ϑ_0 die Temperatur des Widerstandes bzw. der Umgebung angeben und κ eine Proportionalitätskonstante ist, die abhängig von der Geometrie des Widerstandes und dessen Ankopplung an die Umgebung ist. Da die untersuchten Widerstände eine gleiche Bauform besitzen, kann davon ausgegangen werden, dass die Proportionalitätskonstante für beide Widerstände identisch ist.

Durch Gleichsetzen von (3.11) und (3.12) ergibt sich

$$R\,\Delta T = \frac{U^2}{\kappa}\,. \tag{3.13}$$

Bezeichne mit R_1 und R_2 die gesuchten Widerstände und mit I_1 bzw. I_2 die Stromstärken der durch die Widerstände fließenden Ströme. Da die Widerstände parallel geschaltet sind, gilt für den Gesamtstrom I in der Schaltung

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\,. \tag{3.14}$$

Aus (3.13) ergibt sich $R_1\,\Delta T_1 = R_2\,\Delta T_2 = U^2/\kappa$, wobei ΔT_1 und ΔT_2 die Temperaturdifferenzen zur Umgebung der beiden Widerstände bezeichnen. Damit lässt sich (3.14) umformen zu

$$I = U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) = \frac{U}{R_1}\left(1+\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) \qquad \text{und daraus} \qquad R_1 = \frac{U}{I}\left(1+\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) . \tag{3.15}$$

Analog erhält man einen Ausdruck für R_2 durch Vertauschen der beiden Temperaturdifferenzen. Mit den gegebenen Werten ergeben sich die Widerstandswerte zu

$$\boxed{R_1 = \frac{U}{I}\left(1+\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) \approx 41\,\Omega} \qquad \text{und} \qquad \boxed{R_2 = \frac{U}{I}\left(1+\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \approx 11\,\Omega} . \tag{3.16}$$

Die Widerstandswerte entsprechen also am ehesten denen der Antwort C.

Korrekte Antwort: *C*

Bemerkung: Die Antwortoption A ergibt sich bei Annahme einer Reihenschaltung der beiden Widerstände. In diesem Fall gilt $R_1 = U/I \cdot (1+\Delta T_1/\Delta T_2)^{-1}$ und analog für R_2. In Antwortoption B sind die Widerstände so gewählt, dass sie etwa im Verhältnis der Temperaturen dimensioniert sind und der Gesamtwiderstand bei Parallelschaltung passend zu den gegebenen Werten von U und I ist. Auf die gleiche Antwortoption wird man ebenfalls geführt, wenn die Umgebungstemperatur nicht berücksichtigt und in (3.16) die Temperaturen in °C eingesetzt werden. In Antwortoption D ist die linke Seite von (3.13) für beide Widerstände etwa gleich, der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung passt aber nicht zu den gegebenen Werten.

[a] Alternativ und ohne Näherung lässt sich auch das Stefan-Boltzmann-Gesetz anwenden, das dann an Stelle von (3.12) auf den Ausdruck $P_{\text{th}} = \kappa' \left(T^4 - T_0^4\right)$ führt. Statt der Temperaturdifferenzen sind dann in (3.16) die Differenzen der vierten Potenzen der Temperaturen (in Kelvin) zu verwenden und es ergeben sich $R_1 \approx 46\,\Omega$ sowie $R_2 \approx 10\,\Omega$. Die Antwort bleibt also die gleiche.

Aufgabe 36 - Wärmestrahlung (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2020)

Ein Metallstück gibt bei einer Temperatur von 550 °C Wärmestrahlung mit einer Leistung P ab.

Wie groß ist die abgestrahlte Leistung, wenn die Temperatur des Metalls auf 1100 °C erhöht wird?

A etwa 1,7 P B etwa 2,0 P C etwa 7,7 P D etwa 16 P

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die abgestrahlte Leistung ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur, es gilt also $P \approx \text{const.} \cdot (550\,\text{K} + 273\,\text{K})^4$. Die Proportionalitätskonstante ist auch bei der höheren Temperatur die gleiche. Daher gilt für die bei der höheren Temperatur abgestrahlte Leistung P'.

$$P' \approx \text{const.} \cdot (1100\,\text{K} + 273\,\text{K})^4 \approx \left(\frac{1100\,\text{K} + 273\,\text{K}}{550\,\text{K} + 273\,\text{K}}\right)^4 P \approx 7{,}7\,P\,. \tag{3.17}$$

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 37 - Erderwärmung stoppen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2022, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Richard Reindl)

Der verrückte Wissenschaftler Knox hat eine Methode gefunden, die Erderwärmung zu stoppen. Dazu will er den Radius r der als kreisförmig angenommenen Erdbahn um 1,0 % vergrößern.

Um wieviel könnte dabei die mittlere Temperatur T an der Erdoberfläche, die momentan etwa 15 °C beträgt, ungefähr sinken?

A etwa 0,7 K B etwa 1,4 K C etwa 2,8 K D etwa 5,6 K

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die von der Erde aufgenommene Sonnenstrahlungsleistung ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Bahnradius r:

$$P_{\text{auf}} \sim \frac{1}{r^2} \tag{3.18}$$

Die von der Erde emittierte Strahlungsleistung ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Temperatur in Kelvin:

$$P_{\text{ab}} \sim T^4 \tag{3.19}$$

Im Gleichgewicht gilt $P_{\text{auf}} = P_{\text{ab}}$, woraus

$$\frac{1}{r^2} \sim T^4 \quad \text{und damit} \quad T = \frac{\kappa}{\sqrt{r}} \tag{3.20}$$

mit einer Konstanten κ folgt.

Bei Erhöhung von r auf $r' = 1{,}01\,r$ sinkt T damit um den Betrag

$$\boxed{\Delta T = \frac{\kappa}{\sqrt{r}} - \frac{\kappa}{\sqrt{1{,}01\,r}} = \frac{\kappa}{\sqrt{r}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1{,}01}}\right) \approx 0{,}0050\,T \approx 1{,}4\,\text{K}}\,, \tag{3.21}$$

wobei $T \approx 288\,\text{K}$ verwendet wurde.

Korrekte Antwort: *B*

3.3 Gasgesetze und Kreisprozesse

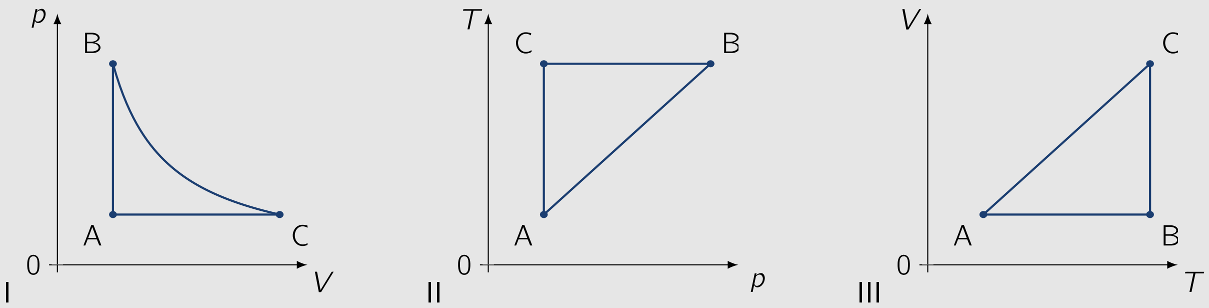
Aufgabe 38 - Kreisprozess (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Ein ideales Gas durchläuft einen Kreisprozess. Ausgehend von dem Zustand A wird es zunächst bei konstantem Volumen bis zu einem Zustand B erwärmt, anschließend expandiert es ohne Temperaturänderung bis zu einem Zustand C und wird schließlich isobar wieder zum Ausgangszustand A komprimiert.

Bezeichne mit p, V und T den Druck, das Volumen und die Temperatur des Gases.

Welche der nachfolgenden Graphen stellen den Kreisprozess korrekt dar?



A Nur die Graphen I und II.

B Nur die Graphen I und III.

C Nur die Graphen II und III.

D Alle drei Graphen.

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Zustandsänderungen eines idealen Gases lassen sich mit der Zustandgleichung

$$pV \sim T \tag{3.22}$$

beschreiben. Betrachte die einzelnen Abschnitte des Kreisprozesses.

Abschnitt A-B: In diesem Abschnitt ist das Volumen V konstant und damit $T \sim p$. Diese Abhängigkeiten finden sich in allen drei Graphen.

Abschnitt B-C: In diesem Abschnitt ist die Temperatur T konstant und damit $p \sim \frac{1}{V}$. Diese Abhängigkeiten finden sich ebenfalls in allen drei Graphen.

Abschnitt C-A: Bei einer isobaren Zustandsänderung ist der Druck p konstant und damit $V \sim T$. Auch diese Abhängigkeiten sind in allen drei Graphen zu finden.

Damit stellen alle drei Graphen den Kreisprozess richtig dar.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 39 - Feuchte Badezimmerluft (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2022)

Nach einer ausgiebigen Dusche beträgt die Temperatur im Badezimmer 28 °C und die relative Luftfeuchtigkeit liegt bei 80 %.

In der nebenstehenden Abbildung ist die Sättigungsdampfdruckkurve für Wasserdampf dargestellt. Sie gibt den maximalen Wasserdampfdruck p_{sat} an, der bei einer Temperatur ϑ möglich ist, bevor der Wasserdampf in der Luft kondensiert.

Wie viel Wasserdampf (in $\mathrm{g\,m^{-3}}$) befindet sich in der Luft im Badezimmer?

Verwende für die molare Masse von Wasser den Wert $M_{Wasser} = 18{,}0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$.

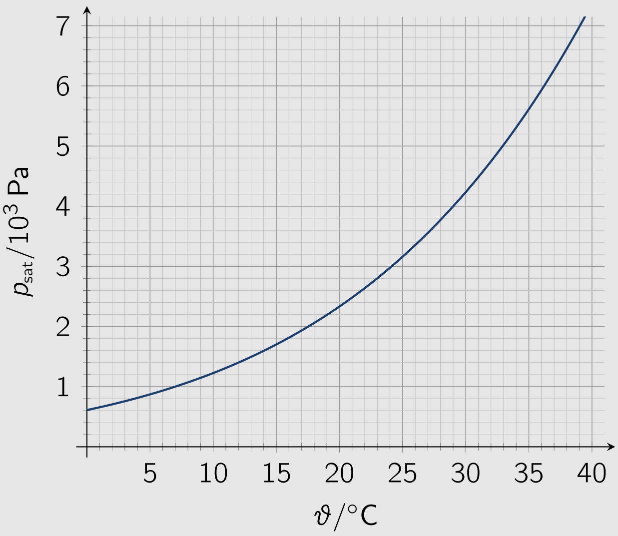


Abb. 10. *Sättigungsdampfdruckkurve für Wasserdampf.*

A etwa $22\,\mathrm{g\,m^{-3}}$ B etwa $27\,\mathrm{g\,m^{-3}}$ C etwa $2{,}3 \cdot 10^2\,\mathrm{g\,m^{-3}}$ D etwa $3{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{g\,m^{-3}}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Der Sättigungsdampfdruck im Badezimmer kann aus der Abbildung zu

$$p_{sat}(28\,°C) \approx 3{,}8 \cdot 10^3\,\mathrm{Pa} \tag{3.23}$$

abgelesen werden. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % beträgt der Wasserdampfdruck in dem Raum daher $p = 0{,}80 \cdot p_{sat} \approx 3{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{Pa}$. Der Wasserdampf kann näherungsweise als ideales Gas behandelt werden. Daher lässt sich für den Druck p, das Volumen V, die Stoffmenge n und die thermodynamische Temperatur T des Gases die folgende Zustandsgleichung verwenden:

$$pV = nRT\,. \tag{3.24}$$

Dabei bezeichnet R die universelle Gaskonstante. Die Stoffmenge kann über $n = m/M_{Wasser}$ durch die Masse m des Wasserdampfs und dessen molare Masse ausgedrückt werden. Damit lässt sich die Stoffmenge in der Zustandsgleichung durch die Dichte ρ ersetzen und es gilt:

$$pV = \frac{m}{M_{Wasser}} RT \qquad \text{bzw.} \qquad \boxed{\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\,M_{Wasser}}{RT}}\,. \tag{3.25}$$

Mit den Werten $p \approx 3{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{Pa}$, $M_{Wasser} = 18{,}0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$, $R = 8{,}314\,46\,\mathrm{J\,K^{-1}\,mol^{-1}}$ und $T \approx 301\,\mathrm{K}$ ergibt sich die gesuchte Dichte zu

$$\boxed{\rho \approx 22\,\mathrm{g\,m^{-3}}}\,. \tag{3.26}$$

Korrekte Antwort: *A*

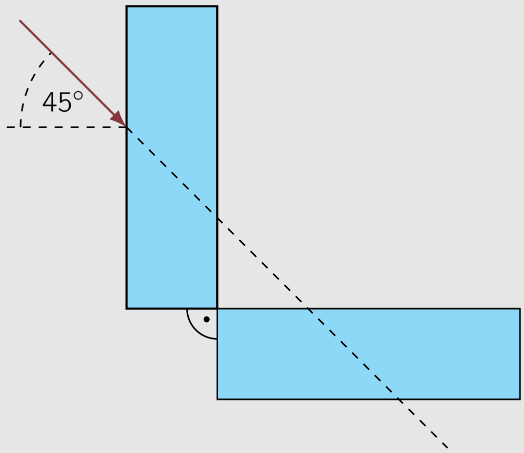
4 Optik

4.1 Geometrische Optik

Aufgabe 40 - Lichtbrechung (MC-Aufgabe)

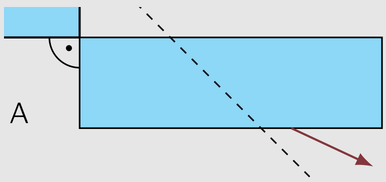
(2. Rd. zur IPhO 2020)

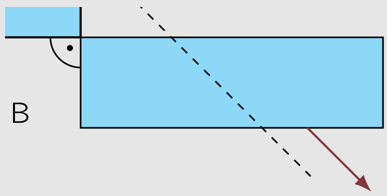
Ein Lichtstrahl trifft, wie nebenstehend abgebildet, auf eine Anordnung von zwei gleich großen, senkrecht zueinander aufgebauten Glasquadern und wird beim Eintritt in den ersten Quader gebrochen. Der Brechungsindex des Glases beträgt 1,5. Außerhalb der Quader befindet sich Luft.

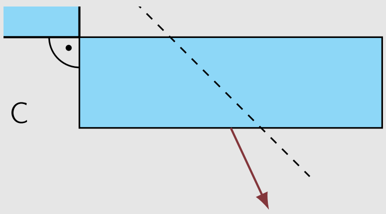


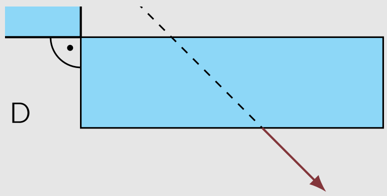
Welcher der folgenden Abbildungsausschnitte zeigt den Verlauf des gebrochenen Lichtstrahls nach dem Austritt aus dem zweiten Quader?

Der Verlauf des Lichtstrahls in dem Quader ist dabei nicht dargestellt und die gestrichelte Linie gibt den Verlauf des ungebrochenen Lichtstrahls wieder.









Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Bei der Brechung eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 gilt für die Lotwinkel α_1 und α_2 des einfallenden bzw. des gebrochenen Strahles das Snelliussche Brechungsgesetz

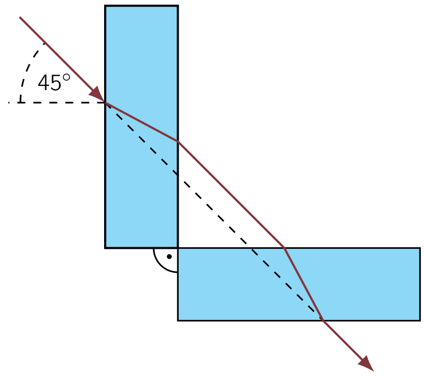
$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \,.$$

Bei Eintritt in den ersten Glasquader wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Beim Austritt aus diesem vom Lot weg. Durch zweimalige Anwendung des Brechungsgesetzes ist leicht einzusehen, dass der Lotwinkel nach Austritt aus dem ersten Glasquader erneut 45° beträgt. Der Lichtstrahl ist allerdings verglichen mit dem Verlauf des ungebrochenen Lichtstrahls nach oben parallel verschoben.

Der Lichtstrahl trifft dann unter einem Lotwinkel von ebenfalls 45° auf den zweiten Glasquader und wird analog durch diesen lediglich verschoben, dieses Mal zu dem gestrichelten Verlauf hin. Da beide Glasquader gleich groß sind, ist auch die Verschiebung gleich groß, so dass der Lichtstrahl nach dem Austritt aus dem zweiten Glasquader auf der gestrichelten Linie verläuft.

Damit ist Antwort D die richtige.

Bemerkung: Man kann die Lösung auch direkt durch Konstruktion des Verlaufs des Lichtstrahls mit Hilfe des Brechungsgesetzes in der Skizze herleiten. Dies ist nebenstehend skizziert. Der Lotwinkel in den Glasquadern beträgt dabei etwa 28°.



Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 41 - Glasquader (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Thomas Hellerl & Titus Bornträger)

Ein in der Zeichenebene verlaufender Laserstrahl trifft von links unter dem Einfallswinkel $\alpha = 30°$ auf einen Glasquader (Brechungsindex $n = 1,5$) mit den Seitenlängen a und $4a$. Wie in der nicht maßstabsgetreuen Skizze in Abbildung 11 angedeutet, trifft er im Glasquader schließlich genau auf die rechte untere Ecke.

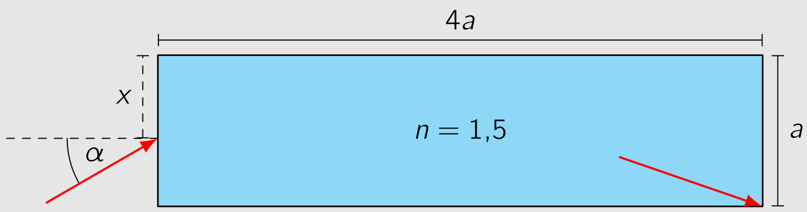


Abb. 11. *Nicht maßstabsgetreue Skizze des Laserstrahls im Glasquader in der Seitenansicht.*

Wie groß ist der Abstand x der Eintrittsstelle von der oberen Begrenzungsfläche des Quaders?

A $a \cdot (\sqrt{2} - 1)$ B $a \cdot (2 - \sqrt{3})$ C $a \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$ D $a \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{3}\right)$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

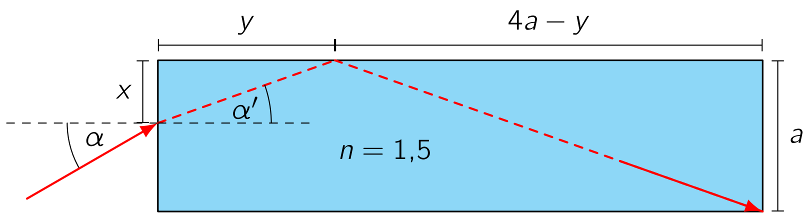


Abb. 12. *Vollständige Skizze des Strahlenverlaufs im Glasquader in der Seitenansicht*

Nach dem Brechungsgesetz gilt:

$$\sin\alpha = n \cdot \sin\alpha' \,. \tag{4.1}$$

Der im Glas verlaufende Strahl wird an der oberen Seite im Inneren total reflektiert. Im linken und im rechten Dreieck findet man aufgrund der Ähnlichkeit

$$\frac{a}{4a - y} = \frac{x}{y} = \tan\alpha' \,. \tag{4.2}$$

Der Wert von $\tan\alpha'$ lässt sich direkt bestimmen mittels

$$\tan\alpha' = \frac{\sin\alpha'}{\cos\alpha'} = \frac{\frac{1}{n}\cdot\sin\alpha}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2\alpha}{n^2}}} = \frac{\frac{1}{1,5}\cdot\sin 30°}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 30°}{1,5^2}}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \,. \tag{4.3}$$

Dabei wurde $\sin\alpha = \sin 30° = 0{,}5$ genutzt. Es folgt unmittelbar aus (4.2):

$$y = 2\sqrt{2}\,x\,. \tag{4.4}$$

Einsetzen in Gleichung (4.2) und auflösen nach x ergibt:

$$\frac{a}{4a - 2\sqrt{2}x} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \qquad \text{bzw.} \qquad 2\sqrt{2}a = 4a - 2\sqrt{2}x \tag{4.5}$$

und damit

$$\boxed{x = \frac{2}{\sqrt{2}}a - a = a \cdot \left(\sqrt{2} - 1\right)}\,. \tag{4.6}$$

Korrekte Antwort: *A*

Aufgabe 42 - Sammellinse (MC-Aufgabe)

(1. Rd. zur IPhO 2020)

Eine dünne Sammellinse erzeugt von einem Objekt, das einen Abstand d von der Linse besitzt, ein Bild, dessen Abstand von der Linse ebenfalls d beträgt.

In welchem Abstand von der Linse entsteht das Bild, wenn der Abstand zwischen Objekt und Linse verdoppelt wird?

A etwa $\frac{1}{2}\,d$ B etwa $\frac{2}{3}\,d$ C etwa $\frac{3}{2}\,d$ D etwa $2\,d$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Wenn der Abstand d zwischen Objekt und Linse der gleiche ist wie zwischen Linse und Bild, muss dieser der doppelten Brennweite f der Linse entsprechen, wie man in der Abbildungsgleichung für dünne Linsen erkennen kann. Wenn g die Gegenstandsweite und b die Bildweite bezeichnen, gilt nämlich:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \qquad \text{bzw.} \qquad b = \frac{f\,g}{g-f}\,. \tag{4.7}$$

Wenn $g = b = d$ ist, folgt also $g = d = 2\,f$. Bei einer Verdopplung der Gegenstandsweite auf $g = 4\,f$ besitzt das Bild nach obiger Gleichung eine Gegenstandsweite von $b = \frac{4}{3}\,f = \frac{2}{3}\,d$.

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 43 - Linsensammlung (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Aus den Tiefen der Physiksammlung hat dein Physiklehrer eine Kiste mit drei dünnen Linsen zu Tage befördert, die mit I, II und III beschriftet sind. Die Linsen I und II sind bikonvex, wohingegen Linse III auf beiden Seiten konkav geformt ist. Zur Bestimmung der Brennweiten der Linsen hast du deiner Lehrkraft beim Durchführen einiger Abbildungsversuche geholfen.

Dazu habt ihr einen Gegenstand in einer Entfernung von 50,0 cm zu einer der Linsen oder zu einer Kombination von zwei dicht hintereinander stehenden Linsen positioniert und den Abstand zwischen der Linse bzw. dem Linsensystem und dem entstehenden reellen Bild des Gegenstandes gemessen. Die nebenstehende Tabelle gibt die in den einzelnen Versuchen gemessenen Bildweiten an. Dummerweise hat dein Lehrer ab dem zweiten Versuch vergessen aufzuschreiben, welche der Linse(n) jeweils verwendet wurde(n), aber vielleicht kannst du trotzdem die folgende Frage beantworten:

Versuch	Linse(n)	Bildweite
①	I	21,4 cm
②		50,2 cm
③		11,6 cm
④		30,9 cm
⑤		175,0 cm

Welche der Linse(n) wurde(n) in den einzelnen Versuchen verwendet?

A	②: I & III	③: I & II	④: II	⑤: II & III
B	②: I & III	③: II	④: II & III	⑤: I & II
C	②: II	③: I & II	④: I & III	⑤: II & III
D	②: II & III	③: II	④: I & II	⑤: I & III

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Da keine zwei Bildweiten in den Versuchen gleich sind, muss in jedem Versuch ein anderer Aufbau vorliegen. Damit müssen alle möglichen Linsenkombinationen aus zwei Linsen sowie die Linse II als Einzellinse für einen der Versuche verwendet werden.

Versuch ③: In diesem Versuch ergibt sich die kleinste Bildweite und damit die stärkste Brechkraft. Um diese höhere Brechkraft zu realisieren, müssen die beiden konvexen Linsen I und II hintereinander zu einem Linsensystem kombiniert sein.

Damit verbleiben von den Antwortoptionen nur noch die Möglichkeiten A und C. Außerdem muss im Versuch ⑤ dann die Kombination der Linsen II & III verwendet worden sein. Es bleibt noch zu klären, ob in Versuch ② alleine die Linse II oder eine Kombination der Linsen I & III verwendet wurde. Dazu können die Brennweiten der Linsen I und II mit Hilfe der Ergebnisse aus den Versuchen ① und ③ verwendet werden.

Versuch ①: Die Brennweite der in diesem Versuch verwendeten Linse I lässt sich mit Hilfe der Gegenstandsweite $g = 50{,}0\,\mathrm{cm}$ und der Bildweite $b_\mathrm{I} = 21{,}4\,\mathrm{cm}$ über die Abbildungsgleichung dünner Linsen bestimmen. Es gilt

$$\frac{1}{f_\mathrm{I}} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b_\mathrm{I}} \qquad \text{bzw.} \qquad f_\mathrm{I} = \frac{g\, b_\mathrm{I}}{g + b_\mathrm{I}} \approx \frac{50{,}0\,\mathrm{cm} \cdot 21{,}4\,\mathrm{cm}}{50{,}0\,\mathrm{cm} + 21{,}4\,\mathrm{cm}} \approx 15{,}0\,\mathrm{cm}\,. \tag{4.8}$$

Versuch ③: Die Gesamtbrennweite $f_{\mathrm{I\&II}}$ des Systems aus den Linsen I und II ergibt sich auch hier aus der bestimmten Bildweite $f_{\mathrm{I\&II}}$ und zwar zu

$$f_{\mathrm{I\&II}} = \frac{g\, b_{\mathrm{I\&II}}}{g + b_{\mathrm{I\&II}}} \approx \frac{50{,}0\,\mathrm{cm} \cdot 11{,}6\,\mathrm{cm}}{50{,}0\,\mathrm{cm} + 11{,}6\,\mathrm{cm}} \approx 9{,}4\,\mathrm{cm}\,. \tag{4.9}$$

Bei der Kombination zweier nah beieinander stehender dünner Linsen ergibt sich die Gesamtbrennweite des Systems aus einer inversen Addition der einzelnen Brennweiten, also

$$\frac{1}{f_{\mathrm{I\&II}}} = \frac{1}{f_{\mathrm{I}}} + \frac{1}{f_{\mathrm{II}}}\,, \tag{4.10}$$

womit sich die Brennweite f_{II} ergibt zu

$$f_{\mathrm{II}} = \frac{f_{\mathrm{I}}\, f_{\mathrm{I\&II}}}{f_{\mathrm{I}} - f_{\mathrm{I\&II}}} \approx \frac{15{,}0\,\mathrm{cm} \cdot 9{,}4\,\mathrm{cm}}{15{,}0\,\mathrm{cm} - 9{,}4\,\mathrm{cm}} \approx 25{,}2\,\mathrm{cm}\,. \tag{4.11}$$

Schließlich lässt sich durch Umstellen der Abbildungsgleichung die Bildweite b_{II} bestimmen, die sich bei Abbildung alleine mit der Linse II ergibt. Diese ist

$$b_{\mathrm{II}} = \frac{g\, f_{\mathrm{II}}}{g - f_{\mathrm{II}}} \approx \frac{50{,}0\,\mathrm{cm} \cdot 25{,}2\,\mathrm{cm}}{50{,}0\,\mathrm{cm} - 25{,}2\,\mathrm{cm}} \approx 50{,}8\,\mathrm{cm}\,. \tag{4.12}$$

Das Ergebnis passt, wenn man kleine Messunsicherheiten annimmt, zu dem Ergebnis in Versuch ②, nicht aber zu dem in Versuch ④. Damit ist die richtige Antwort die Option C.

Korrekte Antwort: *C*

Aufgabe 44 - Zwei Bilder (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024)

Mit einer Handykamera wird ein Foto einer wunderschönen Trinkflasche aufgenommen, die sich in einer Entfernung von etwa 35 cm von der Kamera befindet. Auf dem Foto erscheint der etwa 5,8 m entfernte Hintergrund unscharf. Wird nun eine Linse direkt vor der Kamera positioniert, so erscheint der Hintergrund durch die Linse auf dem Foto scharf.

Abb. 13. *Fotos der Trinkflasche ohne (links) und mit (rechts) Linse. Die Linse ist an dem Rand zu erkennen und befindet sich im linken Teil des rechten Fotos.*

Wie groß ist die Brennweite der Linse?

Hinweis: Positive Brennweiten kennzeichnen Sammellinsen und negative Zerstreuungslinsen.

A etwa −35 cm B etwa −18 cm C etwa 35 cm D etwa 58 cm

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Auf beiden Bildern ist die Schrift auf der Flasche scharf zu erkennen. Die Kamera ist also in beiden Fällen auf diese und damit auf eine Entfernung von etwa 35 cm fokussiert.

Für die Abbildung der Flasche gilt unter der Annahme einer dünnen Kameralinse die Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}\,, \tag{4.13}$$

wobei f die Brennweite der Kameralinse, b die unbekannte Bildweite der Abbildung mit der Kamera und $g = 35\,\mathrm{cm}$ den Abstand der Flasche von der Kamera angeben.

Bezeichne die Brennweite der zusätzlichen Linse mit f'. Wenn die Linse direkt vor die Kamera gestellt wird, addieren sich in guter Näherung die Brechkräfte der Linsen und die Gesamtbrennweite der beiden Linsen zusammen beträgt $(\frac{1}{f}+\frac{1}{f'})^{-1}$. Für die Abbildung mit der Linse gilt daher mit der Entfernung $g' = 5{,}8\,\mathrm{m}$ zum Hintergrund die Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{f}+\frac{1}{f'}}} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g'} \,. \tag{4.14}$$

Entscheidend ist hier, dass die Bildweite aufgrund des unveränderten Fokus der Kamera die gleiche wie im Fall ohne Linse ist. Auflösen von (4.13) nach $1/b$ und Einsetzen in obige Gleichung ergibt für die gesuchte Brennweite der Linse

$$\boxed{f' = \frac{g\,g'}{g - g'} \approx -37\,\mathrm{cm}} \,. \tag{4.15}$$

Damit kommt nur Antwort A in Frage.

Alternativ lässt sich die Brennweite auch ohne Rechnung durch folgende Überlegung bestimmen:

Wenn der Hintergrund durch die Linse scharf zu erkennen ist, muss dieser durch die Linse für die Kamera in dem gleichen Abstand erscheinen, wie die Flasche. Die Kamera sieht also ein (virtuelles) Bild des Hintergrundes, das etwa $35\,\mathrm{cm}$ hinter der Linse auf der Objektseite liegt. Damit muss es sich bei der Linse um eine Zerstreuungslinse handeln[a].

Da der Hintergrund mit fast sechs Metern weit entfernt ist, entsteht das Bild des Hintergrundes in guter Näherung in der Brennebene. Die Brennweite f' ist also gleich der Bildweite und beträgt

$$\boxed{f' \approx -35\,\mathrm{cm}} \,. \tag{4.16}$$

Korrekte Antwort: *A*

[a]Eine Sammellinse kann auch ein virtuelles Bild erzeugen, wenn die Gegenstandsweite kleiner als die Brennweite ist. Dann ist die Bildweite, wie zum Beispiel bei einer Lupe, betragsmäßig aber immer größer als die Gegenstandsweite, was hier nicht der Fall ist.

4.2 Wellenoptik & Strahlung

Aufgabe 45 - Interferenz (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020)

In einem Versuch fällt einfarbiges Laserlicht senkrecht auf ein optisches Gitter mit 300 Linien pro mm. Hinter dem Gitter wird das Interferenzmuster auf einem Schirm beobachtet. Der Abstand des Schirms zum Gitter ist dabei sehr groß gegenüber der Ausdehnung des Interferenzmusters.

Die nebenstehenden Graustufenbilder zeigen die bei Verwendung von zwei Lasern mit unterschiedlichen Wellenlängen aber ansonsten gleicher Versuchsanordnung auf dem Schirm entstehenden Interferenzmuster. Die Wellenlänge des vom ersten Laser emittierten Lichts beträgt 650 nm.

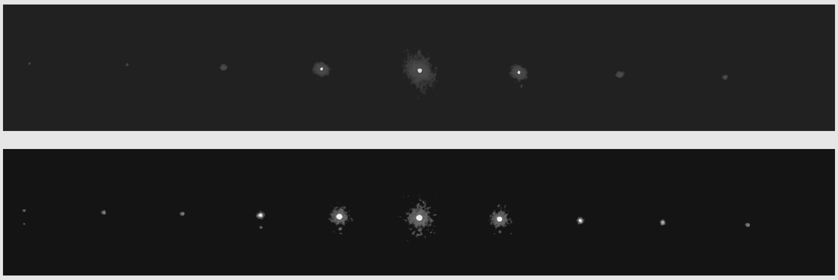


Abb. 14. *Interferenzmuster auf dem Schirm für eine Wellenlänge von 650 nm (oben) und eine zweite unbekannte Wellenlänge (unten). Die Bilder zeigen den gleichen Ausschnitt des Schirms.*

Wie groß ist die Wellenlänge des vom zweiten Laser emittierten Laserlichts?

A etwa 450 nm B etwa 530 nm C etwa 610 nm D etwa 690 nm

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Da der Abstand des Schirms zum Gitter groß verglichen mit dem Interferenzmuster auf dem Schirm ist, kann die Interferenz für kleine Winkel zu dem einfallenden Strahl betrachtet werden. Für den Abstand d_n des n-ten Interferenzmaximums auf dem Schirm vom Hauptmaximum in der Mitte gilt daher

$$n\,\lambda = g\,\frac{d_n}{\ell}\,. \tag{4.17}$$

Dabei bezeichnen λ die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts, g die Gitterkonstante des optischen Gitters und ℓ den Abstand des Gitters vom Schirm. Bezeichne mit $\lambda_1 = 650\,\mathrm{nm}$ die Wellenlänge des ersten Lasers und mit λ_2 die unbekannte Wellenlänge des zweiten Lasers. Da für beide Laser der gleiche Versuchsaufbau verwendet wurde, gilt bei Betrachtung der gleichen Beugungsordnung n mit (4.17)

$$\frac{\lambda_1}{d_{n,1}} = \frac{\lambda_2}{d_{n,2}} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{\lambda_2 = \lambda_1\,\frac{d_{n,2}}{d_{n,1}}}\,. \tag{4.18}$$

In den Abbildungen kann man zum Beispiel den Abstand der Interferenzmaxima zweiter Ordnung ausmessen und vergleichen. Es ergibt sich ein Verhältnis von $\frac{d_{n,2}}{d_{n,1}} \approx (0{,}81 \pm 0{,}01)$. Damit beträgt die Wellenlänge des zweiten Lasers $\lambda_2 = (527 \pm 7)\,\mathrm{nm} \approx 530\,\mathrm{nm}$ und Antwort B ist korrekt.

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 46 - Wasserschichtreflexion (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024)

Die Oberfläche einer glatten, horizontalen Glasplatte ist mit einer dünnen, ebenen Wasserschicht bedeckt. Von oben fällt monochromatisches Licht der Wellenlänge 680 nm unter einem Winkel $\alpha = 30°$ zur Flächennormalen auf die Wasseroberfläche. Der Brechungsindex der Glasplatte beträgt 1,50 und der des Wassers 1,33.

Aufgrund der Verdunstung des Wassers ändert sich die Intensität des reflektierten Lichtes periodisch. Zwischen dem Auftreten von zwei Intensitätsmaxima vergeht eine Zeit von 15 Minuten.

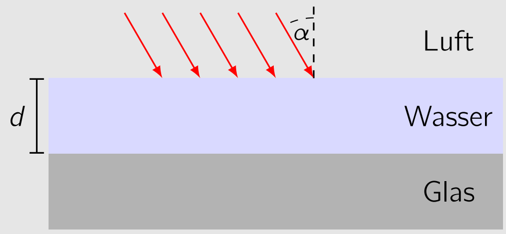


Abb. 15. *Skizze zum Lichteinfall.*

Mit welcher Rate nimmt die Dicke d der Wasserschicht auf dem Glas ab?

A etwa $0{,}3\,\mu\mathrm{m\,h^{-1}}$ B etwa $1\,\mu\mathrm{m\,h^{-1}}$ C etwa $3\,\mu\mathrm{m\,h^{-1}}$ D etwa $9\,\mu\mathrm{m\,h^{-1}}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Betrachte, wie in Abbildung 16 skizziert, zwei einfallende, parallele Lichtstrahlen, die auf die Wasseroberfläche treffen. Für eine konstruktive Interferenz und damit ein Intensitätsmaximum muss der optische Weglängenunterschied zwischen dem direkt an der Wasseroberfläche reflektierten Strahl und dem nach dem Durchgang durch die Wasserschicht an der Glasoberfläche reflektierten Lichtstrahl einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge λ des Lichtes entsprechen. Es muss also für ein $m \in \mathbb{N}$ gelten

$$m\,\lambda = 2\,\frac{d}{\cos\beta}\,n - 2\,d\,\tan\beta\,\sin\alpha\,. \tag{4.19}$$

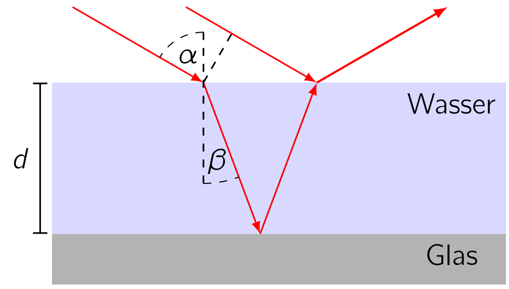


Abb. 16. *Skizze zur Interferenzentstehung mit überhöhten Einfallswinkeln.*

Dabei bezeichnet $n = 1{,}33$ den Brechungsindex von Wasser. Sowohl an der Wasseroberfläche als auch an der Glasoberfläche reflektierte Lichtstrahlen erfahren bei der Reflektion einen Phasensprung, der einer halben Wellenlänge entspricht. Für die Betrachtung der Interferenz kann dieser daher vernachlässigt werden.

Mit Hilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes $\sin\alpha = n\,\sin\beta$ lässt sich Gleichung (4.19) umformen zu

$$m\,\lambda = \frac{2\,d}{\cos\beta}\left(n - \frac{\sin^2\alpha}{n}\right) = 2\,d\,n\,\frac{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}}{\sqrt{1-\sin^2\beta}} = 2\,d\,n\,\sqrt{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}}\,. \tag{4.20}$$

Für zwei aufeinanderfolgenden Intensitätsmaxima muss also für die damit verbundene Verringerung Δd der Wasserschichtdicke

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2\,n\,\sqrt{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}}} \tag{4.21}$$

gelten. Für die Änderungsrate der Wasserschichtdicke pro Zeit ergibt sich daraus mit der Angabe

$\Delta t = 15$ Minuten schließlich

$$\boxed{\frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{\lambda}{2\,\Delta t\, n\sqrt{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}}} \approx 0{,}31\,\mathrm{nm\,s^{-1}} \approx 1{,}1\,\mathrm{\mu m\,h^{-1}}}\,. \tag{4.22}$$

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 47 - Zwei Sender (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Thomas Hellerl)

Zwei identische, senkrecht zur Zeichenebene ausgerichtete, elektrische Sendedipole strahlen von den Punkten S_1 und S_2 aus gleichphasig mit der Frequenz f in den Raum. Ein Empfänger E wird von S_2 ausgehend auf einem Kreis um S_1 verschoben. Die im Empfänger gemessene Intensität in Abhängigkeit von dem Winkel α ist im Diagramm dargestellt und zeigt deutliche Maxima und Minima. Kommt der Empfänger dem Sender S_2 zu nahe, so übersteuert dieser, sodass keine Messung möglich ist.

Wie groß ist die Frequenz f der Strahlung?

A 1,5 GHz

B 3,0 GHz

C 4,5 GHz

D 6,0 GHz

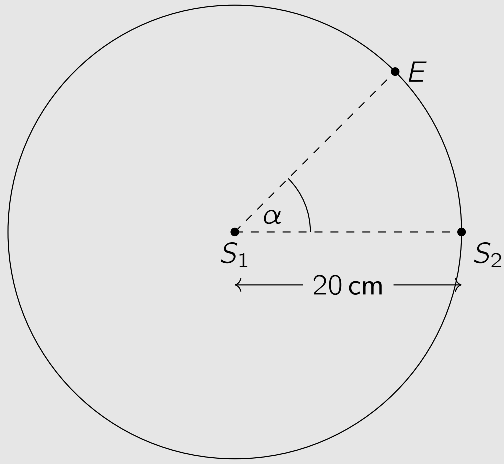


Abb. 17. *Sender und Empfänger.*

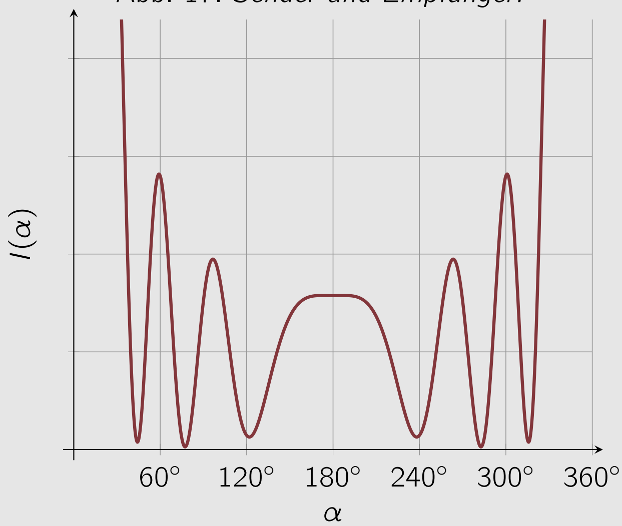


Abb. 18. *Intensitätsverteilung in relativen Einheiten.*

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Bei etwa $\alpha = 60°$ findet man aus Symmetriegründen das Maximum 0. Ordnung. Verschiebt man nun den Empfänger weiter in Richtung $\alpha = 180°$, so findet man zwei weitere Maxima. Exakt bei 180° liegt das Maximum 2. Ordnung, wofür ein Gangunterschied der zwei Teilwellen von $\Delta s = 2 \cdot \lambda$ verantwortlich ist. Es gilt deshalb $\lambda = 10\,\mathrm{cm}$. Für die Frequenz folgt:

$$\boxed{f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8\,\mathrm{ms}^{-1}}{0{,}1\,\mathrm{m}} = 3\,\mathrm{GHz}}. \tag{4.23}$$

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 48 - Bleiglasfenster (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2022, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Stefan Petersen)

Räume mit Röntgengeräten werden durch dicke Wände und Fenster aus Bleiglas abgeschirmt. Ein Bleiglasfenster mit einer Dicke von 2,0 cm kann bereits 75 % der Intensität von Röntgenstrahlung abschirmen.

Wie dick muss das Bleiglasfenster sein, damit die Intensität der Strahlung hinter dem Fenster nur noch 1 % der Intensität vor dem Fenster beträgt?

A etwa 2,7 cm B etwa 4,0 cm C etwa 6,6 cm D etwa 9,2 cm

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die anfängliche Intensität I_0 der Strahlung wird durch das Bleiglasfenster exponentiell gedämpft. Bezeichne mit d die Dicke des Fensters, dann gilt für die Intensität $I(d)$ hinter dem Fenster:

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\frac{d}{\lambda}} . \tag{4.24}$$

Dabei ist λ eine materialabhängige Größe, die angibt, nach welcher Dicke die Strahlungsintensität auf $1/e$ des Ausgangswertes abgefallen ist.

In der Aufgabenstellung ist angegeben, dass die Intensität nach einer Bleiglasdicke von $d_{25\,\%} = 2{,}0\,\mathrm{cm}$ nur noch 25 % der anfänglichen Intensität vorhanden sind. Daraus folgt:

$$0{,}25 \cdot I_0 = I_0 \cdot e^{-\frac{d_{25\,\%}}{\lambda}} \quad \text{und damit durch Logarithmieren} \quad \lambda = -\frac{d_{25\,\%}}{\ln 0{,}25} = \frac{d_{25\,\%}}{\ln 4{,}0} . \tag{4.25}$$

Daraus folgt für die gesuchte Dicke erneut durch Logarithmieren von (4.24) und Nutzen von (4.25)

$$\boxed{d_{1\,\%} = -\ln(1\,\%) \cdot \lambda = \ln(100) \cdot \lambda = d_{25\,\%} \cdot \frac{\ln(100)}{\ln 4{,}0} \approx 6{,}6\,\mathrm{cm}} . \tag{4.26}$$

Korrekte Antwort: *C*

5 Diverse

5.1 Atomphysik & Radioaktivität

Aufgabe 49 - Spektren (MC-Aufgabe)

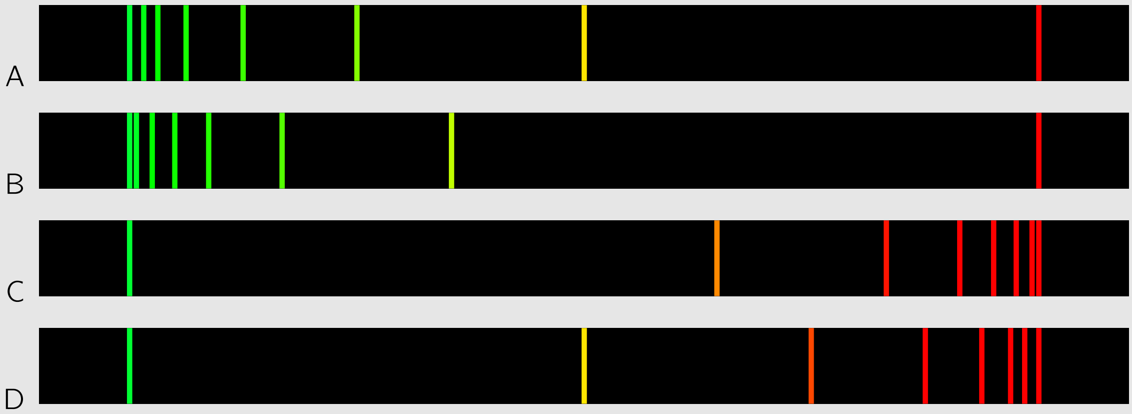
(2. Rd. zur IPhO 2022, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Thomas Hellerl)

Die Atome eines fiktiven Elements nehmen Zustände auf den Energiestufen

$$E_n = -\frac{C}{n^2} \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, \ldots$$

an. Dabei ist C eine Konstante. Nur Linien der Serie der Übergänge in den Grundzustand $n = 1$ liegen im optischen Bereich, diese aber vollständig.

Welches der nachfolgend gezeigten, linear in der Wellenlänge skalierten Spektren stellt die Emissionslinien des beschriebenen Elements korrekt dar?



Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die Energiedifferenz zwischen einem Zustand auf der Stufe $n > 1$ und dem Grundzustand der Energiestufe 1 beträgt

$$E_{n\to 1} = C\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \tag{5.1}$$

Die Wellenlänge der Emissionslinie beim Übergang von diesem Zustand zum Grundzustand berechnet sich aus der Energie $E = h \cdot f$ eines Photons mit der Wellenlänge f und dem Zusammenhang $c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda \cdot E}{h}$ durch

$$\lambda_{n\to 1} = \frac{hc}{C}\,\frac{1}{1 - 1/n^2} = \frac{hc}{C}\,\frac{n^2}{n^2 - 1} \tag{5.2}$$

Bei zunehmendem n wandert λ von oben in kleiner werdenden Schritten gegen eine kleinste Grenzwellenlänge $\lambda_{\infty\to 1} = \frac{hc}{C}$. Deshalb scheiden C und D aus.

Es gilt $\lambda_{2\to 1} = \frac{4}{3}\frac{hc}{C}$ und $\lambda_{3\to 1} = \frac{9}{8} \cdot \frac{hc}{C}$. Das arithmetische Mittel von 1 und $\frac{4}{3}$ ist aber nicht $\frac{9}{8}$. Deshalb scheidet auch A aus, da hier $\lambda_{3\to 1}$ genau in der Mitte zwischen $\lambda_{\infty\to 1}$ und $\lambda_{2\to 1}$ liegt.

Korrekte Antwort: *B*

Aufgabe 50 - Radioaktiver Zerfall (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2020, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Thomas Hellerl)

Im Folgenden werden drei radioaktive Präparate betrachtet. Sie bestehen anfänglich zur Zeit $t = 0$ zu 100 % aus einem einzigen radioaktiven Isotop, dem jeweiligen Mutternuklid. Die anfängliche Aktivität der Präparate wird jeweils mit A_0 bezeichnet. Auch die direkten Zerfallsprodukte, die Tochternuklide, sind wieder radioaktiv und zerfallen. Weitere nachfolgende Zerfälle werden nicht mehr betrachtet. Die Mutter- und Tochternuklide der drei Präparate sind:

Präparat ①: ^{226}Ra ($T_{\text{Mutter}} = 1600\,\text{a}$) $\to$ ^{222}Rn ($T_{\text{Tochter}} = 3{,}8\,\text{d}$)

Präparat ②: ^{211}Pb ($T_{\text{Mutter}} = 36{,}1\,\text{min}$) $\to$ ^{211}Bi ($T_{\text{Tochter}} = 2{,}14\,\text{min}$)

Präparat ③: ^{214}Pb ($T_{\text{Mutter}} = 26{,}8\,\text{min}$) $\to$ ^{214}Bi ($T_{\text{Tochter}} = 19{,}9\,\text{min}$)

Dabei sind mit T_{Mutter} bzw. T_{Tochter} die Halbwertszeiten der jeweiligen Nuklide angegeben. Die folgenden Graphen stellen die zeitlichen Verläufe der Aktivitäten A sowohl des Mutternuklids als auch des Tochternuklids sowie der Gesamtaktivität für die drei Präparate dar.

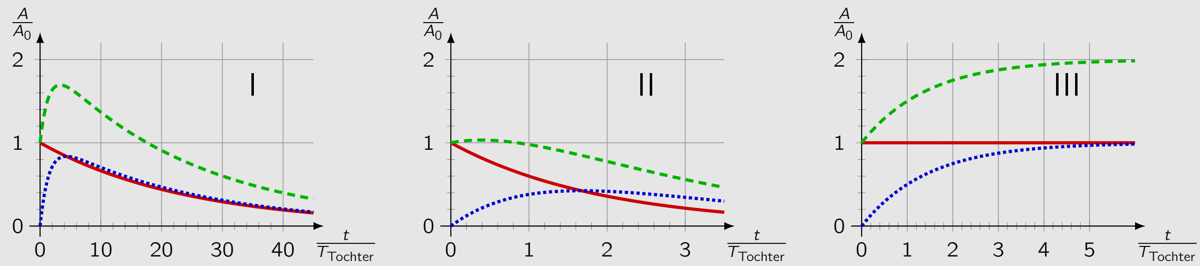


Abb. 19. *Zeitliche Verläufe der Aktivitäten A sowohl des Mutternuklids als auch des Tochternuklids sowie der Gesamtaktivität der Präparate relativ zur Anfangsaktivität des Mutternuklids. Die Zeitachsen sind nach Vielfachen der Halbwertszeiten T_{Tochter} des jeweiligen Tochternuklids skaliert.*

Welches der drei Nuklid-Paare gehört zu welchem Diagramm?

A

①	②	③
I	II	III

B

①	②	③
II	III	I

C

①	②	③
III	II	I

D

①	②	③
III	I	II

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Die grün gestrichelte Kurve beschreibt jeweils die Summe der beiden Aktivitäten, denn nur sie kann größer als A_0 sein. Die roten Kurven stellen die Aktivitäten des Mutternuklids dar. Diese muss mit A_0 beginnen. Für die Aktivität des Tochternuklids kommen daher nur die blau gepunkteten Kurven in Frage. Sie beginnen bei 0, da anfangs noch keine Kerne des Tochternuklids vorhanden sind.

① gehört zu III, da die Halbwertszeit des Radiumisotops um ein Vielfaches größer ist als die des Radonisotops und die Aktivität des Mutternuklids daher bei den betrachteten Zeiten nahezu konstant bleibt.

② gehört zu I und ③ gehört zu II. In beiden Fällen ist die Halbwertszeit des Tochternuklids immer noch kleiner als die des Mutternuklids. Im erstgenannten Fall ist aber das Verhältnis $\frac{T_{\text{Mutter}}}{T_{\text{Tochter}}}$ größer, so dass die Aktivität des Mutternuklids mit der Zeit, gemessen in Vielfachen der Halbwertszeit des Tochternuklids, langsamer abnimmt. Damit ist die letzte Antwort richtig.

Korrekte Antwort: *D*

5.2 Relativitätstheorie

Aufgabe 51 - Galaktische Flaschenpost (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade, Arne Wolf)

Ein Raumschiff startet mit der konstanten Geschwindigkeit $0{,}6\,c$ von der Erde, wobei c die Vakuumlichtgeschwindigkeit bezeichnet. Nach $100\,\mathrm{h}$ an Bord werfen die Raumfahrenden eine Flaschenpost mit der Geschwindigkeit $0{,}8\,c$ relativ zum Raumschiff in Richtung Erde.

Wie lange müssen die Erdbewohner zwischen Start des Raumschiffs und Ankunft der Flaschenpost warten?

A etwa $256\,\mathrm{h}$ B etwa $320\,\mathrm{h}$ C etwa $400\,\mathrm{h}$ D etwa $525\,\mathrm{h}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Aufgrund der Zeitdilatation sind zur Zeit des Abwurfs der Flaschenpost auf der Erde

$$\gamma \cdot 100\,\mathrm{h} = 125\,\mathrm{h} \tag{5.3}$$

mit $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} = 1/\sqrt{1 - 0{,}6^2} = 1{,}25$ vergangen.

Die Geschwindigkeit der Flasche bezüglich der Erde lässt sich mit Hilfe der relativistischen Geschwindigkeitsaddition bestimmen zu

$$\frac{0{,}6 - 0{,}8}{1 - 0{,}8 \cdot 0{,}6} c = -\frac{5}{13} c. \tag{5.4}$$

Somit müssen die Erdbewohner eine Zeit von

$$\boxed{125\,\mathrm{h}\left(1 + \frac{\frac{3}{5}c}{\frac{5}{13}c}\right) = 320\,\mathrm{h}} \tag{5.5}$$

warten, bis die Flaschenpost ankommt.

Korrekte Antwort: *B*

5.3 Physikalische Dimensionen & Skalierungen

Aufgabe 52 - Leistung von Windenergieanlagen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2024)

Windenergieanlagen erzeugen elektrische Leistung, indem sie Energie aus Wind verwenden, um Generatoren anzutreiben. Bei einer moderaten Windgeschwindigkeit beträgt die von dem Wind einer Anlage zur Verfügung gestellte und damit theoretisch maximal nutzbare Leistung P.

Welche von dem Wind der Anlage zur Verfügung gestellte Leistung ergibt sich bei einer Verdopplung der Windgeschwindigkeit?

A $2\,P$ B $3\,P$ C $4\,P$ D $8\,P$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Es wird angenommen, dass sich die Dichte der Luft nicht ändert.

Bei einer Verdopplung der Windgeschwindigkeit besitzt eine feste Luftmasse die vierfache kinetische Energie, da diese quadratisch mit der Geschwindigkeit skaliert.

Außerdem tritt in der gleichen Zeit die doppelte Luftmasse durch die von den Flügeln überstrichene Fläche.

Wenn also alle anderen Parameter identisch bleiben, beträgt die Leistung das Achtfache der ursprünglichen und Antwort D ist richtig.

Bemerkung: Die Abhängigkeit der Windleistung von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist Teil des Betzschen Gesetzes, das die obere Grenze für die nutzbare Leistung von Windenergieanlagen beschreibt.

Korrekte Antwort: *D*

Aufgabe 53 - Leistung von Gravitationswellen (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2019)

Die allgemeine Relativitätstheorie sagt die Existenz von Gravitationswellen, also Wellen in der Struktur der Raumzeit voraus. Diese Wellen werden von beschleunigten Massen erzeugt und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Für zwei Körper mit gleicher Masse m, die sich in einem Abstand r umkreisen, lässt sich die durch Gravitationswellen abgestrahlte Leistung P mit Hilfe der Gravitationskonstante G und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c ausdrücken.

Welcher der folgenden Ausdrücke könnte einen passenden Ausdruck für die Leistung P darstellen?

A $P = \frac{32}{5}\frac{G^5\,m^5}{c^5\,r^4}$ B $P = \frac{32}{5}\frac{G^5\,m^5}{c^4\,r^5}$

C $P = \frac{32}{5}\frac{G^5\,m^4}{c^5\,r^5}$ D $P = \frac{32}{5}\frac{G^4\,m^5}{c^5\,r^5}$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Für eine korrekte Formel müssen beide Seiten der Gleichung die gleiche physikalische Dimension und damit auch die gleichen SI-Einheiten besitzen.

Die Leistung P wird in Watt, also in der Einheit $\mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}}$ angegeben. Dies wird typischerweise durch $[P] = \mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}}$ ausgedrückt. Die auf der rechten Seite der Gleichung vorkommenden physikalischen Größen besitzen die folgenden SI-Einheiten:

$$[G] = \mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}\,, \quad [m] = \mathrm{kg}\,, \quad [c] = \mathrm{m\,s^{-1}}\,, \quad [r] = \mathrm{m}\,. \tag{5.6}$$

Ein als korrekt in Frage kommender Ausdruck für P lässt sich nun mit Hilfe eines Dimensionsvergleiches bestimmen. Bezeichne mit α, β, γ und δ die Exponenten, mit der die Größen G, m, c und r auf der rechten Seite vorkommen. Dann gilt

$$\left[G^\alpha\, m^\beta\, c^\gamma\, r^\delta\right] = \mathrm{kg}^{-\alpha+\beta}\,\mathrm{m}^{3\alpha+\gamma+\delta}\,\mathrm{s}^{-2\alpha-\gamma} \stackrel{!}{=} \mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}} = [P]\,. \tag{5.7}$$

Durch Vergleichen des Exponenten für die Masseneinheit in Gleichung (5.7) ergibt sich, dass β um eins größer sein muss als α. Dies ist nur in der Gleichung D der Fall.

Die dort auftretenden Werte $\alpha = 4$, $\beta = 5$, $\gamma = -5$ und $\delta = -5$ für die Exponenten führen auch zu den korrekten Exponenten für die Einheiten der Länge und der Zeit, denn mit diesen Werte ergeben sich

$$3\alpha + \gamma + \delta = 12 - 5 - 5 = 2 \qquad \text{sowie} \qquad -2\alpha - \gamma = -8 + 5 = -3\,. \tag{5.8}$$

Damit kann nur die letzte Formel die Leistung P richtig beschreiben.[a]

Korrekte Antwort: *D*

[a] *Hinweis:* Der Ausdruck kann auch auf zwei ungleiche Massen m_1 und m_2 erweitert werden und lautet dann $P = \frac{32}{5}\frac{G^4\,(m_1\,m_2)^2\,(m_1+m_2)}{c^5\,r^5}$. Im System Sonne-Erde beträgt die durch Gravitationswellen abgestrahlte Leistung damit knapp 200 W.

Aufgabe 54 - Gezeitenheizung (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2023, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Tim Pokart)

Obwohl eine dicke Eisschicht einen Großteil des auf den Saturnmond Enceladus einfallenden Sonnenlichtes reflektiert, konnte die Raumsonde Cassini auf seiner Oberfläche mehrere hundert Kilometer hohe Wasserfontänen fotografieren. Der Mond bezieht die dafür notwendige Energie aus Gezeitenkräften die ihn bei der Umwandlung in Reibungsarbeit aufheizen.

Betrachte einen Himmelskörper mit Radius r, der um einen Planeten mit Masse M_P auf einer Bahn mit großer Halbachse a und Exzentrizität e kreist. Die Exzentrizität ist dabei für geschlossene Bahnen ein Wert mit $0 \leq e < 1$, der angibt, wie stark die Bahn von einer Kreisbahn abweicht.

Die Heizleistung, die der Körper erfährt, lässt sich ausdrücken durch

$$P \approx \frac{21}{100}\, r^5\, e^2\, G^\alpha\, M_\mathrm{P}^\beta\, a^\gamma .$$

Welche Werte haben die Exponenten α, β und γ?

A	$\alpha = -3/2,$	$\beta = 5/2$	und	$\gamma = -15/2.$
B	$\alpha = 3/2,$	$\beta = 5/2$	und	$\gamma = -15/2.$
C	$\alpha = 3/2,$	$\beta = -5/2$	und	$\gamma = 15/2.$
D	$\alpha = -3/2,$	$\beta = 5/2$	und	$\gamma = 15/2.$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Das Ergebnis lässt sich aus einer Dimensionsanalyse ableiten. Bezeichne mit M, L und T die Dimensionen Masse, Länge und Zeit. Dann besitzen die Größen in der Formel die folgenden Dimensionen:

$$[P] = ML^2T^{-3} \qquad [G] = L^3T^{-2}M^{-1} \qquad [M_\mathrm{P}] = M \qquad [r] = L \qquad [a] = L\,. \tag{5.9}$$

Entsprechend gilt für die Dimensionen in der gegebenen Formel

$$M\,L^2\,T^{-3} = L^5\,L^{3\alpha}\,T^{-2\alpha}\,M^{-\alpha}\,M^\beta\,L^\gamma = M^{\beta-\alpha}\,L^{5+3\alpha+\gamma}\,T^{-2\alpha}\,.$$

Für die Exponenten ergibt sich damit das Gleichungssystem

$$1 = \beta - \alpha \qquad 2 = 5 + 3\alpha + \gamma \qquad -3 = -2\alpha\,. \tag{5.10}$$

Dieses wird gelöst für

$$\boxed{\alpha = 3/2} \qquad \boxed{\beta = 5/2} \qquad \boxed{\gamma = -15/2}\,. \tag{5.11}$$

Korrekte Antwort: *B*

Bemerkung: Für eine alternative Lösung kann man das erwartete physikalische Verhalten der Formel für die Leistung nutzen. Die Heizleistung sollte mit größer werdender Planetenmasse bei ansonsten konstanten Parametern größer werden. Damit muss $\beta > 0$ sein. Umgekehrt sollte die Heizleistung bei größer werdender Halbachse kleiner werden, was $\gamma < 0$ bedingt. Die einzige Antwortoption, die diese beiden Bedingungen erfüllt ist B.

Aufgabe 55 - Zwei Platten im Vakuum (MC-Aufgabe)

(2. Rd. zur IPhO 2021, Aufgabengruppe der PhysikOlympiade - Eugen Dizer)

Zwei leitfähige, parallele Platten mit Fläche A befinden sich im Abstand d im Vakuum. Aufgrund des quantenmechanischen Casimir-Effektes wirkt eine Kraft zwischen den Platten, die von der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum und dem reduzierten Planckschen Wirkungsquantum $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ abhängt.

Welcher der folgenden Ausdrücke könnte einen passenden Ausdruck für die Kraft F darstellen, mit welcher die Platten zusammengedrückt werden?

A $F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^3} A$

B $F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^3} A^2$

C $F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} A$

D $F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} A^2$

Lösung

Rechnungen und Erläuterungen

Für eine korrekte Formel müssen beide Seiten der Gleichung die gleiche physikalische Dimension und damit auch die gleichen SI-Einheiten besitzen. Die Kraft F wird in Newton, also in der Einheit $\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$ angegeben. Dies wird typischerweise durch $[F] = \mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$ ausgedrückt. Die auf der rechten Seite der Gleichung vorkommenden physikalischen Größen besitzen die folgenden SI-Einheiten:

$$[d] = \mathrm{m}\,, \quad [A] = \mathrm{m}^2\,, \quad [c] = \mathrm{m\,s^{-1}}\,, \quad [\hbar] = \mathrm{J\,s} = \mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}\,. \tag{5.12}$$

Ein als korrekt in Frage kommender Ausdruck für F lässt sich nun mit Hilfe eines Dimensionsvergleiches bestimmen. Die Größen c und $\hbar$ sind in allen vier Antwortmoglichkeiten mit gleichen Exponenten vorhanden. Bezeichne mit α und β die Exponenten, mit der die Größen d und A auf der rechten Seite vorkommen. Dann gilt

$$\left[d^\alpha A^\beta c\,\hbar\right] = \mathrm{kg\,m}^{\alpha+2\beta+3}\,\mathrm{s}^{-2} \overset{!}{=} \mathrm{kg\,m\,s^{-2}} = [F]\,. \tag{5.13}$$

Durch Vergleichen des Exponenten für die Masseneinheit in Gleichung (5.13) ergibt sich, dass $\alpha = -2 - 2\beta$ sein muss. Dies ist nur in der Gleichung C mit $\alpha = -4$ und $\beta = 1$ der Fall. Damit kann nur die vorletzte Formel die Kraft F richtig beschreiben.

Korrekte Antwort: *C*