



**PHYSICS.  
OLYMPIAD.CH**

PHYSIK-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
OLIMPIADI DELLA FISICA

# Physik-Olympiade

## Zweite Runde

online, 13. Januar 2021

<b>Theorie</b>	:	<b>21 MC Fragen</b>
Dauer	:	60 Minuten
Total	:	21 Punkte ( $21 \times 1$ )
Erlaubte Hilfsmittel	:	Taschenrechner ohne Formelspeicher Schreib- und Zeichenmaterial Ein beidseitig handgeschriebenes A4 Notizblatt

## Viel Erfolg!

Supported by :



## Naturkonstanten

Hyperfeinstruktur- Übergangsfrequenz des Cäsiums	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$	$\text{s}^{-1}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 299\,792\,458$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Elementarladung	$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	$\text{A} \cdot \text{s}$
Boltzmann Konstante	$k_{\text{B}} = 1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Avogadro-Konstante	$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Photometrisches Strahlungsäqui- valent	$K_{\text{cd}} = 683$	$\text{cd} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^3$
Magnetische Konstante	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Elektrische Konstante	$\varepsilon_0 \approx 8.854\,187\,82 \times 10^{-12}$	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
Gaskonstante	$R \approx 8.314\,462\,618$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Stefan-Boltzmann Konstante	$\sigma \approx 5.670\,374\,419 \times 10^{-8}$	$\text{kg} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-3}$
Gravitationskonstante	$G = 6.674\,30(15) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Masse des Elektrons	$m_e = 9.109\,383\,701\,5(28) \times 10^{-31}$	kg
Masse des Neutrons	$m_n = 1.674\,927\,498\,04(95) \times 10^{-27}$	kg
Masse des Protons	$m_p = 1.672\,621\,923\,69(51) \times 10^{-27}$	kg
Normfallbeschleunigung	$g_n = 9.806\,65$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

## Multiple Choice: Antwortblatt

Zeit: 60 Minuten

Maximalpunktzahl: 21 Punkte (1 Punkt pro richtige Antwort)

Du kannst deine Antworten in den dafür vorgesehenen Kästchen auf dieser Seite angeben oder dir die Antworten auf einem separatem Blatt notieren. Mache im zweiten Fall klar zu welcher Frage die Antworten gehören und notiere deinen Namen ebenfalls auf dem Blatt.

- Multiple-Choice-Aufgaben (**MC**) haben mehrere Aussagen, von denen **genau eine** richtig ist. Wenn Du genau die richtige Antwort auf dem Antwortblatt markierst, erhältst Du einen Punkt, sonst null.

- Multiple-True-False-Aufgaben (**MTF**) haben mehrere Aussagen und Du must **für jede Aussage** entscheiden, ob sie wahr oder falsch ist. Hast Du alle Aussagen richtig eingeteilt, erhältst Du einen Punkt. Wenn Du eine Aussage falsch und alle anderen richtig eingeteilt hast, erhältst Du 0.5 Punkte. Bei mehr als einer falsch eingeteilten Aussage erhältst Du keine Punkte.

<b>Name:</b>	<b>Vorname:</b>	<b>Total:</b>
--------------	-----------------	---------------

	A)	B)	C)	D)	E)	F)
Frage 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frage 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frage 14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 21	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

**Frage 1 (MC)**

Wie viele Tonnen Schokolade werden durchschnittlich jedes Jahr in der Schweiz konsumiert? (Einwohner Schweiz: 8.57 Millionen)

- A)  $10^2$  t    B)  $10^3$  t    C)  $10^4$  t    D)  $10^5$  t

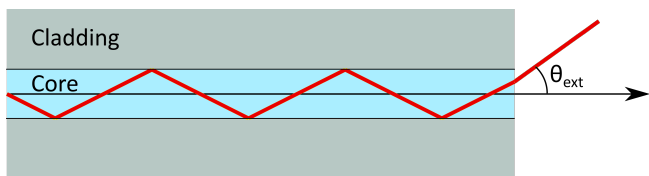
**Frage 2 (MTF)**

Um Experimente zu erklären werden der Einfachheit halber „komplizierte“ Funktionen angenähert. Oft genügt eine lokale lineare Approximation bereits. Welche der folgenden Aussagen sind korrekt? Es gelte  $x \approx 0$  und  $y \approx \frac{\pi}{2}$ .

- A)  $\sin(x) \approx x$                       B)  $\sin(y) \approx 0$   
 C)  $\cos(x) \approx 1$                       D)  $\exp(x) \approx 1 + x$

**Frage 3 (MC)**

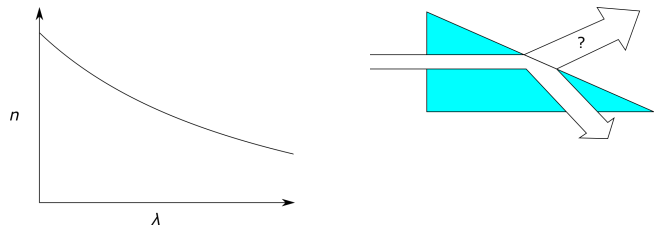
Ein Lichtwellenleiter (eine „Glasfaser“) besteht aus mehreren Teilen. Der Kern (in der Mitte) ist aus Glas ( $n_{\text{core}} = 1.49$ ), und in ihm wird das Licht übertragen. Er ist von einem Mantel ( $n_{\text{cladding}} = 1.47$ ) umhüllt, der wiederum von einer Schutzschicht aus Plastik umhüllt ist. Was kann man über den Winkel  $\theta_{\text{ext}}$  des Lichts beim Ausgang aus dem Leiter sagen?



- A)  $\theta_{\text{ext}} \geq \arcsin\left(\frac{n_{\text{core}}^2}{n_{\text{cladding}}^2}\right)$   
 B)  $\theta_{\text{ext}} \geq \arcsin\left(\sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}\right)$   
 C)  $\theta_{\text{ext}} \geq \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}$   
 D)  $\theta_{\text{ext}} \leq \arcsin\left(\frac{n_{\text{core}}^2}{n_{\text{cladding}}^2}\right)$   
 E)  $\theta_{\text{ext}} \leq \arcsin\left(\sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}\right)$   
 F)  $\theta_{\text{ext}} \leq \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}$

**Frage 4 (MC)**

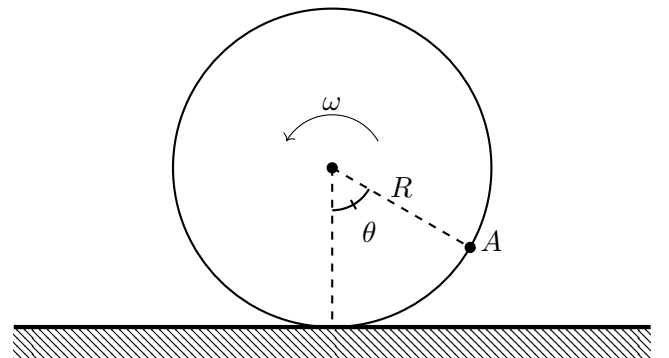
Im Diagramm links ist der Brechungsindex unterschiedlicher Wellenlängen des sichtbaren Lichts für Glas abgebildet. Ein weisser Lichtstrahl wandert durch Glas, trifft auf dessen Oberfläche zur Luft (siehe in der Abbildung rechts), und wird zum grössten Teil totalreflektiert. Welche Farbe hat der Teil des Lichts, der sich durch die Luft weiterverbreitet?



- A) Rot                                      B) Blau  
 C) Schwarz                              D) Weiss  
 E) Pfefferminzgrün

**Frage 5 (MC)**

Ein Rad mit Radius  $R$  rollt ohne zu gleiten mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ .

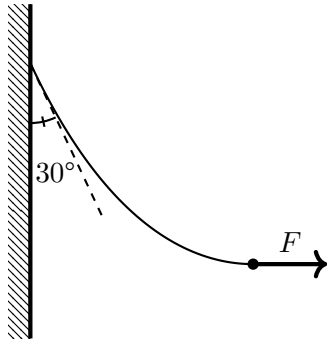


Der Punkt  $A$  auf dem Rad bildet mit der Vertikalen einen Winkel  $\theta$ , wie in der Abbildung gezeigt. Was ist der Betrag der Geschwindigkeit des Punktes  $A$  gegenüber dem Ruhesystem des Bodens?

- A)  $2\omega R |\sin \theta|$                       B)  $\omega R |\sin \theta|$   
 C)  $2\omega R \left| \sin \frac{\theta}{2} \right|$                       D)  $\omega R \left| \sin \frac{\theta}{2} \right|$

**Frage 6 (MC)**

Ein Ende eines Seils ist an einer vertikalen Wand befestigt, auf das andere Ende wirkt die horizontale Kraft  $F$ . Der Winkel zwischen dem Seil und der vertikalen Wand beträgt  $30^\circ$ , wie in der Abbildung gezeigt.

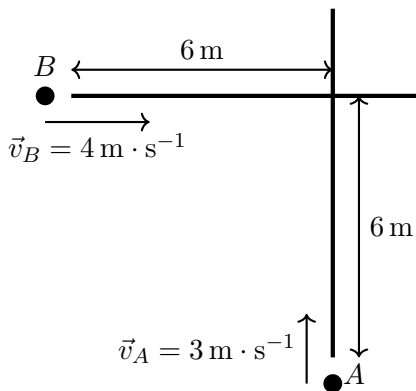


Was ist das Gewicht  $W$  des Seils?

- A)  $W = \frac{\sqrt{3}}{2}F$
- B)  $W = \frac{1}{2}F$
- C)  $W = \frac{1}{\sqrt{3}}F$
- D)  $W = \sqrt{3}F$

**Frage 7 (MC)**

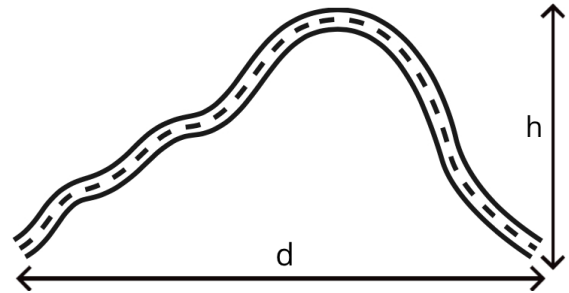
Ein Teilchen  $A$  fliegt mit konstanter Geschwindigkeit  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  nach Norden, während das Teilchen  $B$  mit konstanter Geschwindigkeit  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  nach Osten fliegt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt sind beide Teilchen  $6 \text{ m}$  vom Schnittpunkt ihrer Flugbahnen entfernt, wie in der Abbildung gezeigt. Was ist der kürzeste Abstand zwischen den Teilchen in diesem Aufbau?



- A) 0.8 m
- B) 1 m
- C) 1.2 m
- D) 1.4 m

**Frage 8 (MC)**

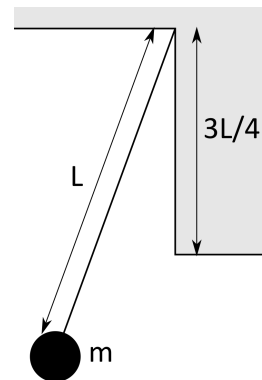
Eine reibungslose Röhre befindet sich in der vertikalen Ebene. Sie ist so geformt, dass die beiden Enden sich auf derselben Höhe befinden (siehe Skizze). Eine Kette mit homogener Masse pro Länge  $\mu$  wird in der Röhre platziert, so dass sie genau die zwei Enden der Röhre erreicht. Die Kette wird dann losgelassen. Welche Kraft wirkt insgesamt auf die Kette?



- A)  $\mu gh$
- B)  $\mu gd$
- C) 0
- D) Nicht genügend Informationen vorhanden.

**Frage 9 (MC)**

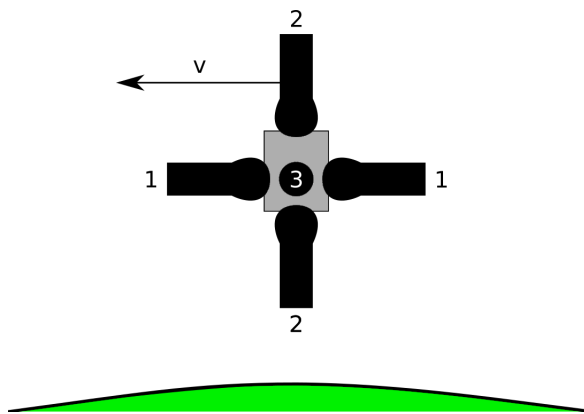
Ein Pendel der Länge  $L$  und der Masse  $m$  ist in einer Ecke befestigt. Welches ist das Verhältnis der Zeit  $T_1$ , die die Masse im linken Teil verbringt, zur Zeit  $T_2$ , die die Masse im rechten Teil verbringt?



- A)  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{4}$
- B)  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{2}$
- C)  $\frac{T_1}{T_2} = 1$
- D)  $\frac{T_1}{T_2} = 2$
- E)  $\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{3}$

**Frage 10 (MC)**

Die Space Force baut einen Satelliten, der von einem Orbit aus Kanonenkugeln auf die Erde schießen soll. Der Satellit besitzt eine Kanone nach vorne, eine nach hinten, eine nach unten, eine nach oben und eine auf jede Seite. Um den Satelliten auf der Bahn zu behalten, werden jeweils die gegenüberliegenden Kanonen gleichzeitig abgeschossen. Welches der Kanonenpaare würde am wenigsten benutzt werden?



- A) 1  
 B) 2  
 C) 3  
 D) Alle Kanonen werden gleich oft benutzt.

**Frage 11 (MC)**

Zwei Asteroiden mit verschiedenen Massen  $m_1 < m_2$  umkreisen sich gemäss den Newton'schen Bewegungsgesetzen. Sei  $v_1$  die Geschwindigkeit, mit welcher der leichtere Asteroid den schwereren Asteroid umkreist. Umgekehrt, sei  $v_2$  die Geschwindigkeit, mit welcher der schwerere Asteroid den leichteren Asteroid umkreist. Wir nehmen an es handle sich um kreisförmige Orbits. Was kann man über die Beziehung zwischen den beiden Geschwindigkeiten aussagen?

- A)  $v_1 < v_2$                       B)  $v_1 > v_2$   
 C)  $v_1 = v_2$                         D) Man weiss es nicht.

**Frage 12 (MC)**

Was ist die maximale Höhe von der man mit einem Strohhalm aus einem Glas Wasser trinken kann?

- A) 0.5 m   B) 1 m   C) 2 m   D) 5 m   E) 10 m

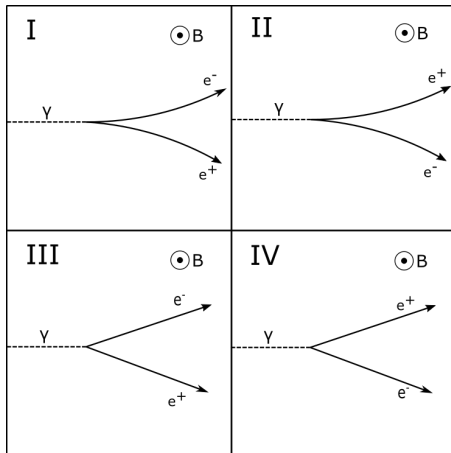
**Frage 13 (MC)**

Newton ist auf dem Turm von Pisa und der Wind bläst in Richtung Norden mit Geschwindigkeit  $v_w$ . Er wirft einen Apfel horizontal in Richtung Westen mit Geschwindigkeit  $v_a$ . Der Luftwiderstand modellieren wir mit Stokes-Reibung (proportionaler Widerstand zur Geschwindigkeit), was einer Endfallgeschwindigkeit von  $-\frac{mg}{\beta}$  entspricht. Der Turm von Pisa ist seeehr hoch, wir können also annehmen kurz vor Aufprall hat der Apfel eine konstante Geschwindigkeit. Welche wäre das?

- A)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten  
 B)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten und  $-\frac{mg}{\beta}$  nach Süden  
 C)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten und  $-\frac{mg}{\beta}$  nach Norden  
 D)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten und  $-\frac{mg}{\beta}$  nach Westen  
 E)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten und  $v_a$  nach Westen  
 F)  $-\frac{mg}{\beta}$  nach unten und  $v_w$  nach Norden

**Frage 14 (MC)**

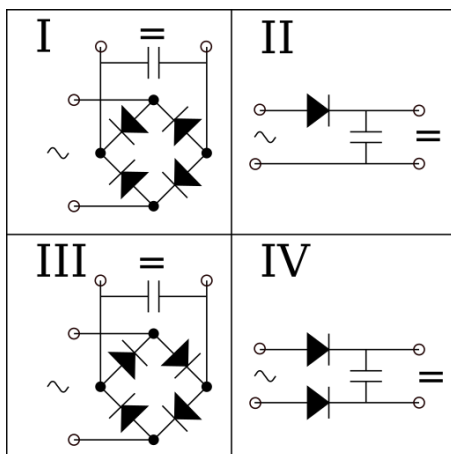
In einem Teilchendetektor wird der Zerfall eines Photons  $\gamma$  in ein Elektron-Positron Paar gemessen. Das Positron hat als Anti-Teilchen vom Elektron eine positive Ladung und dieselbe Masse wie das Elektron. Welche der folgenden Spuren kann im Teilchendetektor gemessen werden? Der Teilchendetektor liegt dabei in einem homogenen Magnetfeld, welches aus der Zeichenebene hinauszeigt.



- A) I      B) II      C) III      D) IV

**Frage 15 (MTF)**

Welche der gezeichneten Schaltungen können zur Gleichrichtung (=) einer Wechselspannung ( $\sim$ ) genutzt werden? Hinweis: Bei den Dioden kann der Strom nur in die Richtung des Pfeiles fließen und der Kondensator dient zur Glättung der Gleichspannung.



- A) I      B) II      C) III      D) IV

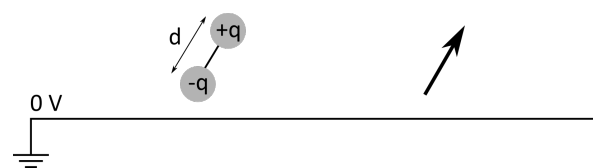
**Frage 16 (MC)**

Emmy hat sich einen Plattenkondensator bestehend aus zwei Metallplatten im Abstand  $d$  gebaut. Nun möchte sie die Kapazität erhöhen. Welche der Möglichkeit führt zur grössten Kapazität?

- A) Eine (dielektische) Kunststoffplatte mit  $\epsilon_r = 2$  und Dicke  $d$  zwischen die Kondensatorplatte schieben.
- B) Eine Metallplatte mit Dicke  $\frac{d}{2}$  zwischen die Kondensatorplatten schieben, sodass sie auf einer Kondensatorplatte liegt.
- C) Eine Metallplatte mit Dicke  $\frac{d}{2}$  zwischen die Kondensatorplatten schieben, sodass sie parallel zu den Kondensatorplatten liegt (und somit keine berührt).
- D) Alle aufgeführten Massnahmen verringern die Kapazität.
- E) Alle aufgeführten Massnahmen erhöhen die Kapazität um gleich viel.

**Frage 17 (MC)**

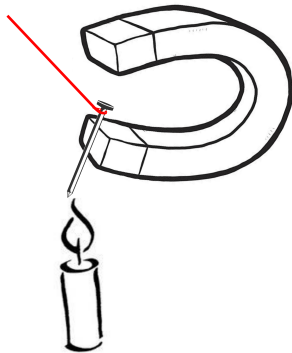
Ein Dipol besteht aus zwei Ladungen  $+q$  und  $-q$  in einer fixen Distanz  $d$  voneinander. Man kann einen Dipol auch durch einen Pfeil darstellen (rechts im Bild unten). Der Dipol ist über einer geerdeten Metallplatte platziert (Null-Potenzial). Was passiert?



- A) Der Dipol dreht sich um sich selbst mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit.
- B) Der Dipol bewegt sich nicht.
- C) Der Dipol dreht sich um sich selbst, bis er parallel zur Metallplatte ist.
- D) Der Dipol dreht sich um sich selbst, bis er senkrecht zur Metallplatte ist.
- E) Der Dipol bewegt sich parallel zur Metallplatte.

**Frage 18 (MC)**

Ein Nagel, der an einer Schnur befestigt ist, wird von einem Magneten angezogen. Eine Kerze ist unter dem Nagel platziert, sodass der Magnet nicht aufgeheizt wird. Des Weiteren ist der Faden nicht direkt über der Kerze an der Decke aufgehängt (siehe Bild). Was passiert?



- A) Nichts.
- B) Der Nagel wird noch stärker vom Magnet angezogen.
- C) Der Nagel löst sich vom Magneten.
- D) Der Nagel oszilliert zwischen einer Phase am Magneten und einer losgelösten Phase.

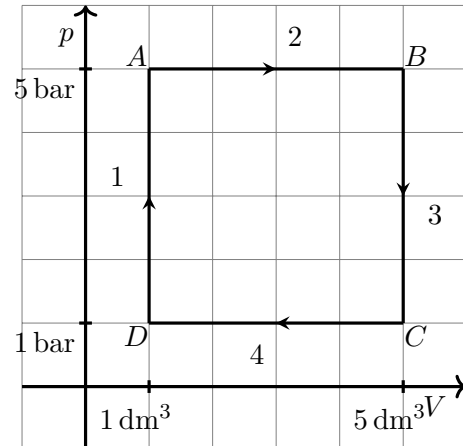
**Frage 19 (MC)**

An einem sonnigen Sommertag, bei angenehmen 25 °C, will Lea eine Fahrradtour unternehmen. Gewissenhaft überprüft sie zuerst den Luftdruck im Reifen und stellt fest, dass es im Vorderreifen nur 2 bar anstatt den optimalen 4 bar sind. Um den Reifen zu pumpen benutzt sie eine einfache Handpumpe, welche Umgebungsluft ansaugt. Wie viel Mal muss sie pumpen, bis sie den optimalen Luftdruck erreicht hat? Der Veloreifen und die Pumpe haben ein Volumen von 2800 cm<sup>3</sup> respektive 700 cm<sup>3</sup>.

- A) 2      B) 4      C) 6      D) 8      E) 10

**Frage 20 (MTF)**

Eine Maschine, gefüllt mit einem idealen Gas, durchläuft den folgenden zyklischen Prozess. Welche Aussagen stimmen?



- A) Die netto verrichtete Arbeit ist 800 J.
- B) Die innere Energie des idealen Gas ist nach einem Zyklus gleich gross wie zuvor.
- C) Die Entropie des idealen Gas hat nach einem Zyklus zugenommen.
- D) Während des Teilprozesses 1 findet kein Wärmeaustausch statt.
- E) Am Punkt D wird die tiefste Temperatur erreicht.

**Frage 21 (MC)**

Wie gross ist der Luftdruck  $p_c$  am Boden im Zentrum eines tropischen Wirbelsturms? Dabei sei  $v_m$  die maximale tangentielle Geschwindigkeit des Wirbelsturms,  $p_m$  der Luftdruck am Boden dort, wo der Wirbelsturm in der Höhe die Geschwindigkeit  $v_m$  aufweist,  $R_d = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  die Gaskonstante von trockener Luft und  $T_b$  die Temperatur an der Wolkenuntergrenze des Wirbelsturms.

- A)  $p_c = p_m \exp\left(-\frac{v_m}{2R_d T_b}\right)$     B)  $p_c = p_m \exp\left(-\frac{v_m^2}{2R_d T_b}\right)$
- C)  $p_c = p_m \exp\left(-\frac{v_m^2}{2R_d T_b^3}\right)$     D)  $p_c = p_m \exp\left(-\frac{v_m}{2R_d T_b^3}\right)$





**PHYSICS.  
OLYMPIAD.CH**  
PHYSIK-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
OLIMPIADI DELLA FISICA

# Physik-Olympiade

## Zweite Runde

online, 13. Januar 2021

<b>Theorie</b>	:	<b>3 Aufgaben</b>
Dauer	:	120 Minuten
Total	:	48 Punkte (15 + 17 + 16)
Erlaubte Hilfsmittel	:	Taschenrechner ohne Formelspeicher Schreib- und Zeichenmaterial Ein beidseitig handgeschriebenes A4 Notizblatt

## Viel Erfolg!

Supported by :



## Theoretische Probleme

Zeit: 120 Minuten

Maximalpunktzahl: 48 Punkte

Beginne jede Aufgabe auf einem neuen Blatt, um das Korrigieren zu erleichtern. Beschrifte die Blätter mit deinem Namen und der Aufgabennummer. Nummeriere zudem deine Lösungsblätter.

*Allgemeiner Hinweis: Die Aufgaben bestehen aus zum Teil unabhängigen Teilaufgaben, falls Du stecken bleibst lohnt es sich weiter zu lesen und bei einer einfacheren Teilaufgabe wieder einzusteigen.*

## Naturkonstanten

Hyperfeinstruktur- Übergangsfrequenz des Cäsiums	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$	$\text{s}^{-1}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 299\,792\,458$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Elementarladung	$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	$\text{A} \cdot \text{s}$
Boltzmann Konstante	$k_{\text{B}} = 1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Avogadro-Konstante	$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Photometrisches Strahlungsäqui- valent	$K_{\text{cd}} = 683$	$\text{cd} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^3$
Magnetische Konstante	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Elektrische Konstante	$\varepsilon_0 \approx 8.854\,187\,82 \times 10^{-12}$	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
Gaskonstante	$R \approx 8.314\,462\,618$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Stefan-Boltzmann Konstante	$\sigma \approx 5.670\,374\,419 \times 10^{-8}$	$\text{kg} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-3}$
Gravitationskonstante	$G = 6.674\,30(15) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Masse des Elektrons	$m_{\text{e}} = 9.109\,383\,701\,5(28) \times 10^{-31}$	kg
Masse des Neutrons	$m_{\text{n}} = 1.674\,927\,498\,04(95) \times 10^{-27}$	kg
Masse des Protons	$m_{\text{p}} = 1.672\,621\,923\,69(51) \times 10^{-27}$	kg
Normfallbeschleunigung	$g_{\text{n}} = 9.806\,65$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

**Aufgabe 1.1: Rotierender Tisch (15 Punkte)**

In dieser Aufgabe betrachten wir einen runden Tisch mit einer masselosen Schiene. Die Schiene ist auf dem Tisch fixiert und eine Masse  $m$  kann sich reibungslos entlang der Schiene bewegen. Die Masse wird dabei durch eine Feder mit Federkonstante  $k$  und Ruhelänge  $l_0$  mit der Mitte des Tisches verbunden.

**Teil A. Entlang des Durchmessers (4 Punkte)**

Die Schiene ist entlang des Durchmessers auf dem Tisch fixiert, wie in Abbildung 1.1.1 dargestellt. Die Distanz  $x$  bezeichnet die Auslenkung der Masse  $m$  von der Ruhelage der Feder.

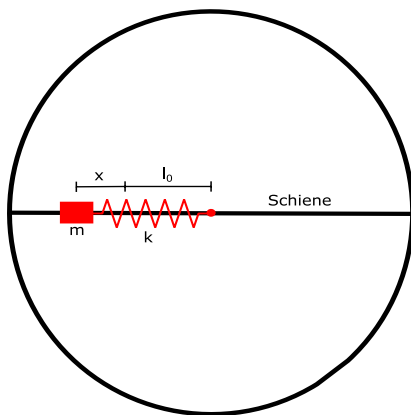


Abbildung 1.1.1: Tisch mit Feder

**i. (1 pt.)** Wie gross ist die Kreisfrequenz der Schwingung, wenn der Tisch nicht rotiert?

Wir positionieren die Masse  $m$  in Ruhe eine Distanz  $l_0$  von der Mitte des Tisches entfernt, damit die Feder entspannt ist. Der Tisch wird nun angestossen, sodass er mit einer festen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  rotiert.

**ii. (1 pt.)** Was passiert, falls die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  sehr gross ist?

**iii. (1 pt.)** Was ist der maximale Wert von  $\omega_0$ , sodass die Masse  $m$  oszilliert?

**iv. (1 pt.)** Ist die Kreisfrequenz der Oszillation in diesem Fall grösser oder kleiner als wenn der Tisch nicht rotiert?

**Teil B. Entlang der Sehne (4 Punkte)**

Der Tisch wird wieder angehalten und die Schiene neu so fixiert, dass sie eine Sehne des Tisches darstellt, wie in Abbildung 1.1.2. Die Entfernung der Schiene zum Mittelpunkt soll  $l_0$  betragen. Dies garantiert, dass die Feder in eine Ruhelage zurückkehren kann, in welcher sie nicht

gespannt ist. In den weiteren Teilaufgaben bezeichnen wir mit  $x$  die Auslenkung der Masse  $m$  vom Mittelpunkt der Schiene, mit  $d$  die Distanz der Masse zum Mittelpunkt des Tisches und mit  $\theta$  den Winkel zwischen Feder und der Verbindung vom Mittelpunkt des Tisches zum Mittelpunkt der Schiene.

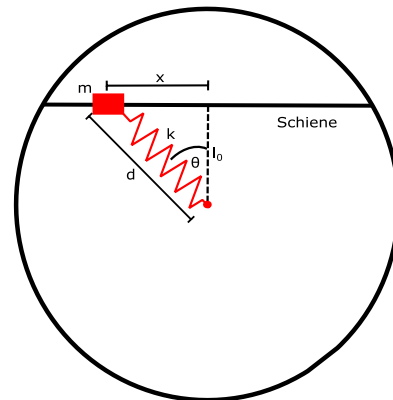


Abbildung 1.1.2: Tisch mit Schiene entlang der Sehne

**i. (2 pt.)** Wie gross ist die Kraft, welche die Masse zur Ruhelage zurücktreibt? Gib das Resultat in Abhängigkeit der Auslenkung  $x$  und der Ruhelänge  $l_0$  an.

**ii. (2 pt.)** Berechne die Energie, welche in der Feder steckt, in Abhängigkeit von  $x$  und  $l_0$ .

**Teil C. Gleichgewichtslagen (7 Punkte)**

Wir beginnen den Tisch nun wieder mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega_T$  zu drehen.

**i. (2 pt.)** Zeichne ein Schema mit allen Kräften, welche auf die Masse  $m$  wirken, falls die Masse nicht in einer Gleichgewichtslage ist. Welche Bedingung muss für die Kräfte in einer Gleichgewichtslage gelten?

**ii. (1 pt.)** Finde einen Ausdruck für die totale Kraft auf die Masse  $m$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  und dem Winkel  $\theta$ .

**iii. (2 pt.)** Wie viele Gleichgewichtslagen gibt es? Berechne ihre Distanz zum Mittelpunkt des Tisches in Abhängigkeit von  $k$ ,  $\omega_T$  und  $l_0$ .

**iv. (2 pt.)** Gib ohne Begründung an, ob es sich bei den Gleichgewichtslagen um stabile oder instabile Gleichgewichte handelt.

## Aufgabe 1.2: Thermische Konvektion (17 Punkte)

Thermische Konvektion beschreibt das Phänomen, dass aufgrund von Temperaturunterschieden eine Strömung in einem Gas entsteht. Das bekannteste Beispiel für thermische Konvektion ist das Aufsteigen von warmer Luft in der Erdatmosphäre. In dieser Aufgabe werden wir dieses Phänomen anhand des idealen Gasmodells genauer untersuchen.

Für die folgenden Aufgaben nehmen wir immer an, dass es sich bei der Atmosphäre um ein zweiatomiges ideales Gas handelt mit einer molaren Masse  $M$ , bestehend aus einer einzelnen Atomsorte.

### Teil A. Ideales Gas (3.5 Punkte)

**i. (0.5 pt.)** Nenne eine Annahme, welche für das ideale Gas auf Teilchenebene gilt.

**ii. (1.5 pt.)** Finde einen allgemeinen Ausdruck für die Dichte  $\rho$  des idealen Gases in Abhängigkeit von  $p$ ,  $T$  und  $M$ .

**iii. (0.5 pt.)** Wie viele Freiheitsgrade hat ein zwei-atomiges ideales Gas?

*Tipp: Die Vibrationsfreiheitsgrade sind eingefroren und tragen keine Energie bei.*

**iv. (1 pt.)** Folgere daraus den numerischen Wert des Adiabatenkoeffizient  $\gamma$  für ein zwei-atomiges Gas.

*Hinweis: Falls du den Wert nicht findest, verwende für die numerischen Teilaufgaben den Wert  $4/3$ .*

### Teil B. Adiabatischer Aufstieg (3 Punkte)

Um eine Bedingung herzuleiten wann Konvektion vorkommen kann, betrachten wir ein kleines Luftpaket in der Atmosphäre bei der Temperatur  $T_0$  und Druck  $p_0$ . Das Luftpaket soll nun adiabatisch, das heisst ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, um die Strecke  $\Delta r$  aufsteigen.

**i. (1.5 pt.)** Gib die Temperatur  $T$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  in Abhängigkeit von  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\gamma$  und dem Druck  $p$  nach dem Aufstieg an.

**ii. (1.5 pt.)** Angenommen die Strecke  $\Delta r$  ist sehr klein, sodass sich der Druck  $\Delta p$  nur sehr

wenig ändert. Was ist die Temperaturänderung  $\Delta T$  in Abhängigkeit von  $\Delta p$ ?

*Tipp: Nutze die Näherung  $(1+x)^\alpha \approx 1+\alpha x$  für  $x \ll 1$ .*

### Teil C. Konvektionsbedingung (4.5 Punkte)

Wir nehmen nun an unser Luftpaket sei zu Beginn im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft, das heisst die Umgebungsluft und das Luftpaket haben dieselbe Temperatur  $T_0$ , denselben Druck  $p_0$  und dieselbe Dichte  $\rho_0 = \rho'_0$ . Die Umgebungsluft habe zudem einen fixen Temperaturgradient  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'}$  und Druckgradient  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'}$ . Aufgrund einer Störung, steigt das Luftpaket adiabatisch um eine sehr kleine Strecke  $\Delta r$  auf, wobei jeweils ein Druckgleichgewicht mit der Umgebungsluft herrscht.

**i. (1 pt.)** Welche Bedingung muss für die Dichten  $\rho'$  und  $\rho$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  gelten, damit das Luftpaket weiter aufsteigen kann und eine Konvektionsströmung entsteht?

**ii. (1.5 pt.)** Folgere daraus eine Bedingung für  $\Delta T$  und  $\Delta T'$ . Begründe deine Antwort.

**iii. (1 pt.)** Folgere daraus die Konvektionsbedingung

$$\frac{\Delta T'}{\Delta r'} < \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T_0}{p_0} \frac{\Delta p'}{\Delta r'} \quad (1.2.1)$$

wobei  $\gamma$  der Adiabatenkoeffizient ist.

**iv. (1 pt.)** Angenommen auf der Erdoberfläche haben wir Normalbedingungen. Gib an, ob für folgende Gradienten  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'} = -0.1 \text{ bar} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'} = -5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$  eine Konvektionsströmung zu erwarten ist.

### Teil D. Temperaturverlauf (6 Punkte)

Wir wollen nun einen Temperaturverlauf der Atmosphäre herausfinden, sodass Konvektion fortwährend möglich ist.

**i. (1 pt.)** Angenommen wir haben eine Luftsäule der Höhe  $h$ , wobei die Dichte  $\rho$  der Luft in der Säule konstant ist. Wie gross ist der hydrostatische Druck am Boden der Luftsäule?

**ii. (1 pt.)** In der Atmosphäre nimmt die Dichte  $\rho(h)$  der Luft mit zunehmender Atmosphärenhöhe  $h$  ab, deshalb betrachten wir nur eine sehr

kleine Luftsäule der Länge  $\Delta r$ . Wie gross ist der Druckgradient  $\frac{\Delta p}{\Delta r}$  auf der Höhe  $h$ ?

Für die folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass in der Konvektionsbedingung (1.2.2) Gleichheit gilt.

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{p} \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (1.2.2)$$

**iii. (1 pt.)** Angenommen wir haben einen so grossen Temperaturgradienten, dass die Ungleichheit in Gleichung (1.2.1) gilt. Beschreibe den Prozess in der Atmosphäre, der dazu führt, dass Gleichung (1.2.2) nach einer gewissen Zeit approximativ gilt.

**iv. (2 pt.)** Mit dieser zusätzlichen Annahme können wir den Temperaturverlauf in der Atmosphäre bestimmen. Finde einen Ausdruck für die Temperatur auf der Höhe  $h$  in Abhängigkeit von  $g$ ,  $\gamma$ ,  $R$  und der Temperatur  $T_0$  auf der Erdoberfläche.

*Tipp: Verwende die Gleichung (1.2.2) und die Resultate von den Teilaufgaben D ii. und A ii.*

**v. (1 pt.)** Nehme an die Temperatur ausserhalb der Erdatmosphäre sei 0 K. Die Temperatur an der Erdoberfläche sei 298.15 K. Berechne damit die Höhe der Erdatmosphäre. Verwende für die molare Masse  $M$  der Luft  $28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

**Aufgabe 1.3: Feuerwerk (16 Punkte)**

Wenn man gegenüber eines Gebäudes mit einer Wellblechfassade steht, kann man während eines Feuerwerks folgendes Phänomen beobachten (s. Abb. 1.3.1): Kurz nach dem Knall eines detonierenden Feuerwerkskörpers  $K$  hört eine Person  $P$  von einer gegenüberliegenden Wand mit Wellblechfassade  $W$  einen kurzen, sirrenden Ton. Ziel dieser Aufgabe ist es, dieses Phänomen zu untersuchen und Ausdrücke für die beobachtete Frequenz des Sirrens herzuleiten.

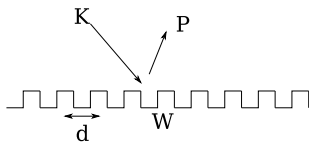


Abbildung 1.3.1: Situation mit Wellblechfassade.

**Teil A. Der Knall (1.5 Punkte)**

**i. (1.5 pt.)** Worin unterscheidet sich die Ausbreitung der Druckwelle des Knalles nach dem Auftreffen auf das Wellblech von der Reflexion an einer ebenen Wand?

Um die Rechnung zu vereinfachen, untersuchen wir das Phänomen mit einem einfacheren Modell: Wir ersetzen das Wellblech durch periodisch angeordnete, sehr dünne Stäbe, siehe Abb. 1.3.2.

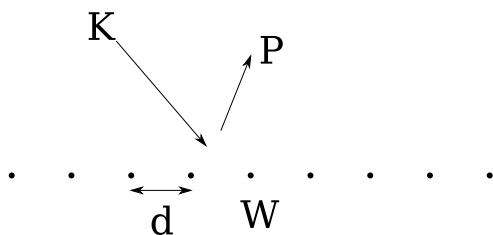


Abbildung 1.3.2: Vereinfachtes Modell mit Stäben.

In den folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass der Abstand vom Feuerwerkskörper  $K$  zur Wand  $W$  sowie der Abstand von der Wand  $W$  zur Person  $P$  gross sind (gross gegenüber der Abmessung der Wand  $W$ ).

Im Folgenden wollen wir das Phänomen mit zwei verschiedenen Ansätzen betrachten.

**Teil B. Die Puls-kaskade (6.5 Punkte)**

In diesem Teil betrachten wir den Knall des Feuerwerkskörpers als eine Druckwelle von sehr kurzer zeitlicher Dauer.

**i. (2 pt.)** Zuerst betrachten wir eine spezielle Konfiguration in der der Feuerwerkskörper in der Verlängerung der Wand explodiert, siehe Abb. 1.3.3. Die Druckwelle des Knalls wird an jedem Stab gestreut. Wie gross ist die jeweilige Zeitdifferenz  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  und  $\Delta t_3$  zwischen den gestreuten Wellen zweier benachbarter Stäbe für die drei Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ?

**ii. (1 pt.)** Wie kommt der sirrende Ton zustande?

**iii. (1.5 pt.)** Welche Frequenzen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  hat das Sirren für die Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ? Begründe Deine Antwort ohne Gleichung (1.3.4) zu nutzen.

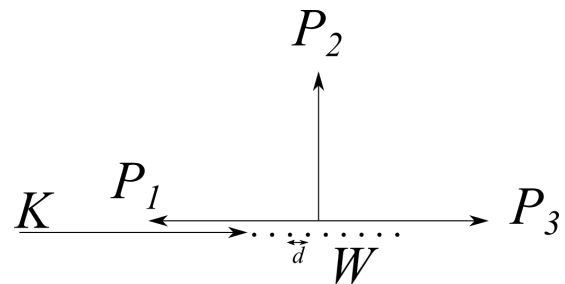


Abbildung 1.3.3: Spezielle Konfiguration mit 3 Personen.

**iv. (2 pt.)** Für allgemeine Einfall- und Ausfallrichtungen  $\alpha$  und  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört man bei  $P$  die Frequenz

$$f(\alpha, \beta) = \frac{f_d}{\cos(\alpha) + \cos(\beta)}. \quad (1.3.4)$$

Leite diese Gleichung her und berechne  $f_d$ .

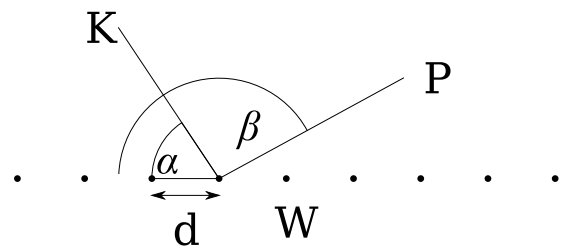


Abbildung 1.3.5: Allgemeine Konfiguration.

**Teil C. Die Wellen (4 Punkte)**

Ein Knall kann auch als eine Überlagerung von vielen ebenen Wellen mit verschiedenen Frequenzen beschrieben werden. In dieser Teilaufgabe betrachten wir nun eine ebene Welle mit einer bestimmten Frequenz  $f$  aus dem Spektrum des Knalles, welche an den Stäben gestreut wird. Insbesondere betrachten wir nicht mehr explizit einen Knall.

- i. (1 pt.)** Welche Bedingung muss erfüllt sein, damit eine Person  $P$  die Frequenz  $f$  hört? Was kann man über den Gangunterschied aussagen?
- ii. (2 pt.)** Unter welchem Ausfallwinkel  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört eine Person diese Frequenz  $f$ ? Berechne sie für einen allgemeinen Einfallswinkel  $\alpha$ .
- iii. (1 pt.)** Vergleiche Dein Resultat mit der Gleichung (1.3.4).

**Teil D. Die Schallgeschwindigkeit (4 Punkte)**

- i. (4 pt.)** In diesem Teil wollen wir ausgehend vom Phänomen aus Teil A die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Sei dazu der Einfallswinkel

$\alpha = 45^\circ$  (siehe Abb. 1.3.5) und der Abstand der Stäbe sei  $d = 20$  cm. Für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$  wird die Frequenz gemessen und in Tab. 1.3.6 aufgelistet. Plote die Messungen in einem geeigneten Graphen und bestimme mit Hilfe dieser Messungen die Schallgeschwindigkeit  $c$ .

*Hinweis: Du darfst die Gleichung (1.3.4) verwenden und falls Du  $f_d$  nicht berechnet hast, verwende  $f_d = \pi \frac{c}{d}$ .*

$\beta/^\circ$	$f/\text{Hz}$
0	930
30	1150
60	1390
90	2410
120	7450

Tabelle 1.3.6: Messungen der Frequenz  $f$  für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$ .

## Multiple Choice: Lösungen

	A)	B)	C)	D)	E)	F)
Frage 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Frage 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Frage 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frage 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Frage 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 11	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Frage 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Frage 14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Frage 16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Frage 17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Frage 19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Frage 20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Frage 21	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		





**PHYSICS.  
OLYMPIAD.CH**

PHYSIK-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE PHYSIQUE  
OLIMPIADI DELLA FISICA

# Physik-Olympiade

## Zweite Runde

online, 13. Januar 2021

<b>Theorie</b>	:	<b>3 Aufgaben</b>
Dauer	:	120 Minuten
Total	:	48 Punkte (15 + 17 + 16)
Erlaubte Hilfsmittel	:	Taschenrechner ohne Formelspeicher Schreib- und Zeichenmaterial Ein beidseitig handgeschriebenes A4 Notizblatt

## Viel Erfolg!

Supported by :



## Theoretische Probleme

Zeit: 120 Minuten

Maximalpunktzahl: 48 Punkte

Beginne jede Aufgabe auf einem neuen Blatt, um das Korrigieren zu erleichtern. Beschrifte die Blätter mit deinem Namen und der Aufgabennummer. Nummeriere zudem deine Lösungsblätter.

*Allgemeiner Hinweis: Die Aufgaben bestehen aus zum Teil unabhängigen Teilaufgaben, falls Du stecken bleibst lohnt es sich weiter zu lesen und bei einer einfacheren Teilaufgabe wieder einzusteigen.*

## Naturkonstanten

Hyperfeinstruktur- Übergangsfrequenz des Cäsiums	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$	$\text{s}^{-1}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 299\,792\,458$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Elementarladung	$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	$\text{A} \cdot \text{s}$
Boltzmann Konstante	$k_{\text{B}} = 1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Avogadro-Konstante	$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
Photometrisches Strahlungsäqui- valent	$K_{\text{cd}} = 683$	$\text{cd} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^3$
Magnetische Konstante	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Elektrische Konstante	$\varepsilon_0 \approx 8.854\,187\,82 \times 10^{-12}$	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
Gaskonstante	$R \approx 8.314\,462\,618$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Stefan-Boltzmann Konstante	$\sigma \approx 5.670\,374\,419 \times 10^{-8}$	$\text{kg} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-3}$
Gravitationskonstante	$G = 6.674\,30(15) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Masse des Elektrons	$m_{\text{e}} = 9.109\,383\,701\,5(28) \times 10^{-31}$	kg
Masse des Neutrons	$m_{\text{n}} = 1.674\,927\,498\,04(95) \times 10^{-27}$	kg
Masse des Protons	$m_{\text{p}} = 1.672\,621\,923\,69(51) \times 10^{-27}$	kg
Normfallbeschleunigung	$g_{\text{n}} = 9.806\,65$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

**Aufgabe 1.1: Rotierender Tisch (15 Punkte)**

In dieser Aufgabe betrachten wir einen runden Tisch mit einer masselosen Schiene. Die Schiene ist auf dem Tisch fixiert und eine Masse  $m$  kann sich reibungslos entlang der Schiene bewegen. Die Masse wird dabei durch eine Feder mit Federkonstante  $k$  und Ruhelänge  $l_0$  mit der Mitte des Tisches verbunden.

**Teil A. Entlang des Durchmessers (4 Punkte)**

Die Schiene ist entlang des Durchmessers auf dem Tisch fixiert, wie in Abbildung 1.1.1 dargestellt. Die Distanz  $x$  bezeichnet die Auslenkung der Masse  $m$  von der Ruhelage der Feder.

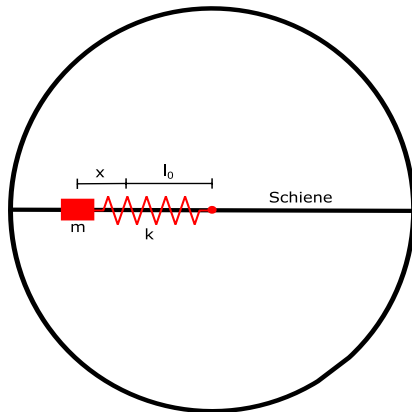


Abbildung 1.1.1: Tisch mit Feder

**i. (1 pt.)** Wie gross ist die Kreisfrequenz der Schwingung, wenn der Tisch nicht rotiert?

Wir positionieren die Masse  $m$  in Ruhe eine Distanz  $l_0$  von der Mitte des Tisches entfernt, damit die Feder entspannt ist. Der Tisch wird nun angestossen, sodass er mit einer festen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  rotiert.

**ii. (1 pt.)** Was passiert, falls die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  sehr gross ist?

**iii. (1 pt.)** Was ist der maximale Wert von  $\omega_0$ , sodass die Masse  $m$  oszilliert?

**iv. (1 pt.)** Ist die Kreisfrequenz der Oszillation in diesem Fall grösser oder kleiner als wenn der Tisch nicht rotiert?

**Teil B. Entlang der Sehne (4 Punkte)**

Der Tisch wird wieder angehalten und die Schiene neu so fixiert, dass sie eine Sehne des Tisches darstellt, wie in Abbildung 1.1.2. Die Entfernung der Schiene zum Mittelpunkt soll  $l_0$  betragen. Dies garantiert, dass die Feder in eine Ruhelage zurückkehren kann, in welcher sie nicht

gespannt ist. In den weiteren Teilaufgaben bezeichnen wir mit  $x$  die Auslenkung der Masse  $m$  vom Mittelpunkt der Schiene, mit  $d$  die Distanz der Masse zum Mittelpunkt des Tisches und mit  $\theta$  den Winkel zwischen Feder und der Verbindung vom Mittelpunkt des Tisches zum Mittelpunkt der Schiene.

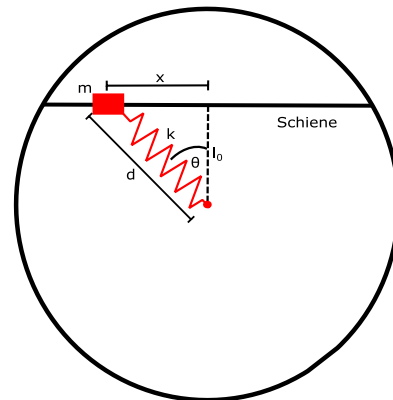


Abbildung 1.1.2: Tisch mit Schiene entlang der Sehne

**i. (2 pt.)** Wie gross ist die Kraft, welche die Masse zur Ruhelage zurücktreibt? Gib das Resultat in Abhängigkeit der Auslenkung  $x$  und der Ruhelänge  $l_0$  an.

**ii. (2 pt.)** Berechne die Energie, welche in der Feder steckt, in Abhängigkeit von  $x$  und  $l_0$ .

**Teil C. Gleichgewichtslagen (7 Punkte)**

Wir beginnen den Tisch nun wieder mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega_T$  zu drehen.

**i. (2 pt.)** Zeichne ein Schema mit allen Kräften, welche auf die Masse  $m$  wirken, falls die Masse nicht in einer Gleichgewichtslage ist. Welche Bedingung muss für die Kräfte in einer Gleichgewichtslage gelten?

**ii. (1 pt.)** Finde einen Ausdruck für die totale Kraft auf die Masse  $m$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  und dem Winkel  $\theta$ .

**iii. (2 pt.)** Wie viele Gleichgewichtslagen gibt es? Berechne ihre Distanz zum Mittelpunkt des Tisches in Abhängigkeit von  $k$ ,  $\omega_T$  und  $l_0$ .

**iv. (2 pt.)** Gib ohne Begründung an, ob es sich bei den Gleichgewichtslagen um stabile oder instabile Gleichgewichte handelt.

## Aufgabe 1.2: Thermische Konvektion (17 Punkte)

Thermische Konvektion beschreibt das Phänomen, dass aufgrund von Temperaturunterschieden eine Strömung in einem Gas entsteht. Das bekannteste Beispiel für thermische Konvektion ist das Aufsteigen von warmer Luft in der Erdatmosphäre. In dieser Aufgabe werden wir dieses Phänomen anhand des idealen Gasmodells genauer untersuchen.

Für die folgenden Aufgaben nehmen wir immer an, dass es sich bei der Atmosphäre um ein zweiatomiges ideales Gas handelt mit einer molaren Masse  $M$ , bestehend aus einer einzelnen Atomsorte.

### Teil A. Ideales Gas (3.5 Punkte)

**i. (0.5 pt.)** Nenne eine Annahme, welche für das ideale Gas auf Teilchenebene gilt.

**ii. (1.5 pt.)** Finde einen allgemeinen Ausdruck für die Dichte  $\rho$  des idealen Gases in Abhängigkeit von  $p$ ,  $T$  und  $M$ .

**iii. (0.5 pt.)** Wie viele Freiheitsgrade hat ein zwei-atomiges ideales Gas?

*Tipp: Die Vibrationsfreiheitsgrade sind eingefroren und tragen keine Energie bei.*

**iv. (1 pt.)** Folgere daraus den numerischen Wert des Adiabatenkoeffizient  $\gamma$  für ein zwei-atomiges Gas.

*Hinweis: Falls du den Wert nicht findest, verwende für die numerischen Teilaufgaben den Wert  $4/3$ .*

### Teil B. Adiabatischer Aufstieg (3 Punkte)

Um eine Bedingung herzuleiten wann Konvektion vorkommen kann, betrachten wir ein kleines Luftpaket in der Atmosphäre bei der Temperatur  $T_0$  und Druck  $p_0$ . Das Luftpaket soll nun adiabatisch, das heisst ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, um die Strecke  $\Delta r$  aufsteigen.

**i. (1.5 pt.)** Gib die Temperatur  $T$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  in Abhängigkeit von  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\gamma$  und dem Druck  $p$  nach dem Aufstieg an.

**ii. (1.5 pt.)** Angenommen die Strecke  $\Delta r$  ist sehr klein, sodass sich der Druck  $\Delta p$  nur sehr

wenig ändert. Was ist die Temperaturänderung  $\Delta T$  in Abhängigkeit von  $\Delta p$ ?

*Tipp: Nutze die Näherung  $(1+x)^\alpha \approx 1+\alpha x$  für  $x \ll 1$ .*

### Teil C. Konvektionsbedingung (4.5 Punkte)

Wir nehmen nun an unser Luftpaket sei zu Beginn im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft, das heisst die Umgebungsluft und das Luftpaket haben dieselbe Temperatur  $T_0$ , denselben Druck  $p_0$  und dieselbe Dichte  $\rho_0 = \rho'_0$ . Die Umgebungsluft habe zudem einen fixen Temperaturgradient  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'}$  und Druckgradient  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'}$ . Aufgrund einer Störung, steigt das Luftpaket adiabatisch um eine sehr kleine Strecke  $\Delta r$  auf, wobei jeweils ein Druckgleichgewicht mit der Umgebungsluft herrscht.

**i. (1 pt.)** Welche Bedingung muss für die Dichten  $\rho'$  und  $\rho$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  gelten, damit das Luftpaket weiter aufsteigen kann und eine Konvektionsströmung entsteht?

**ii. (1.5 pt.)** Folgere daraus eine Bedingung für  $\Delta T$  und  $\Delta T'$ . Begründe deine Antwort.

**iii. (1 pt.)** Folgere daraus die Konvektionsbedingung

$$\frac{\Delta T'}{\Delta r'} < \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T_0}{p_0} \frac{\Delta p'}{\Delta r'} \quad (1.2.1)$$

wobei  $\gamma$  der Adiabatenkoeffizient ist.

**iv. (1 pt.)** Angenommen auf der Erdoberfläche haben wir Normalbedingungen. Gib an, ob für folgende Gradienten  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'} = -0.1 \text{ bar} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'} = -5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$  eine Konvektionsströmung zu erwarten ist.

### Teil D. Temperaturverlauf (6 Punkte)

Wir wollen nun einen Temperaturverlauf der Atmosphäre herausfinden, sodass Konvektion fortwährend möglich ist.

**i. (1 pt.)** Angenommen wir haben eine Luftsäule der Höhe  $h$ , wobei die Dichte  $\rho$  der Luft in der Säule konstant ist. Wie gross ist der hydrostatische Druck am Boden der Luftsäule?

**ii. (1 pt.)** In der Atmosphäre nimmt die Dichte  $\rho(h)$  der Luft mit zunehmender Atmosphärenhöhe  $h$  ab, deshalb betrachten wir nur eine sehr

kleine Luftsäule der Länge  $\Delta r$ . Wie gross ist der Druckgradient  $\frac{\Delta p}{\Delta r}$  auf der Höhe  $h$ ?

Für die folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass in der Konvektionsbedingung (1.2.2) Gleichheit gilt.

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{p} \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (1.2.2)$$

**iii. (1 pt.)** Angenommen wir haben einen so grossen Temperaturgradienten, dass die Ungleichheit in Gleichung (1.2.1) gilt. Beschreibe den Prozess in der Atmosphäre, der dazu führt, dass Gleichung (1.2.2) nach einer gewissen Zeit approximativ gilt.

**iv. (2 pt.)** Mit dieser zusätzlichen Annahme können wir den Temperaturverlauf in der Atmosphäre bestimmen. Finde einen Ausdruck für die Temperatur auf der Höhe  $h$  in Abhängigkeit von  $g$ ,  $\gamma$ ,  $R$  und der Temperatur  $T_0$  auf der Erdoberfläche.

*Tipp: Verwende die Gleichung (1.2.2) und die Resultate von den Teilaufgaben D ii. und A ii.*

**v. (1 pt.)** Nehme an die Temperatur ausserhalb der Erdatmosphäre sei 0 K. Die Temperatur an der Erdoberfläche sei 298.15 K. Berechne damit die Höhe der Erdatmosphäre. Verwende für die molare Masse  $M$  der Luft  $28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

**Aufgabe 1.3: Feuerwerk (16 Punkte)**

Wenn man gegenüber eines Gebäudes mit einer Wellblechfassade steht, kann man während eines Feuerwerks folgendes Phänomen beobachten (s. Abb. 1.3.1): Kurz nach dem Knall eines detonierenden Feuerwerkskörpers  $K$  hört eine Person  $P$  von einer gegenüberliegenden Wand mit Wellblechfassade  $W$  einen kurzen, sirrenden Ton. Ziel dieser Aufgabe ist es, dieses Phänomen zu untersuchen und Ausdrücke für die beobachtete Frequenz des Sirrens herzuleiten.

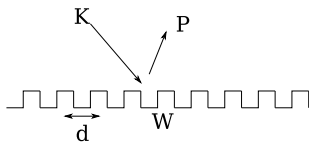


Abbildung 1.3.1: Situation mit Wellblechfassade.

**Teil A. Der Knall (1.5 Punkte)**

**i. (1.5 pt.)** Worin unterscheidet sich die Ausbreitung der Druckwelle des Knalles nach dem Auftreffen auf das Wellblech von der Reflexion an einer ebenen Wand?

Um die Rechnung zu vereinfachen, untersuchen wir das Phänomen mit einem einfacheren Modell: Wir ersetzen das Wellblech durch periodisch angeordnete, sehr dünne Stäbe, siehe Abb. 1.3.2.

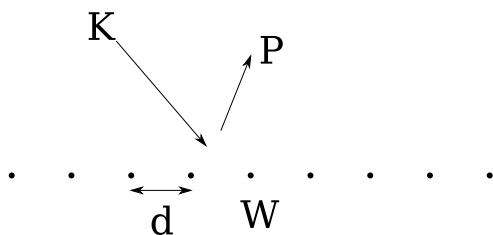


Abbildung 1.3.2: Vereinfachtes Modell mit Stäben.

In den folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass der Abstand vom Feuerwerkskörper  $K$  zur Wand  $W$  sowie der Abstand von der Wand  $W$  zur Person  $P$  gross sind (gross gegenüber der Abmessung der Wand  $W$ ).

Im Folgenden wollen wir das Phänomen mit zwei verschiedenen Ansätzen betrachten.

**Teil B. Die Puls-kaskade (6.5 Punkte)**

In diesem Teil betrachten wir den Knall des Feuerwerkskörpers als eine Druckwelle von sehr kurzer zeitlicher Dauer.

**i. (2 pt.)** Zuerst betrachten wir eine spezielle Konfiguration in der der Feuerwerkskörper in der Verlängerung der Wand explodiert, siehe Abb. 1.3.3. Die Druckwelle des Knalls wird an jedem Stab gestreut. Wie gross ist die jeweilige Zeitdifferenz  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  und  $\Delta t_3$  zwischen den gestreuten Wellen zweier benachbarter Stäbe für die drei Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ?

**ii. (1 pt.)** Wie kommt der sirrende Ton zustande?

**iii. (1.5 pt.)** Welche Frequenzen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  hat das Sirren für die Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ? Begründe Deine Antwort ohne Gleichung (1.3.4) zu nutzen.

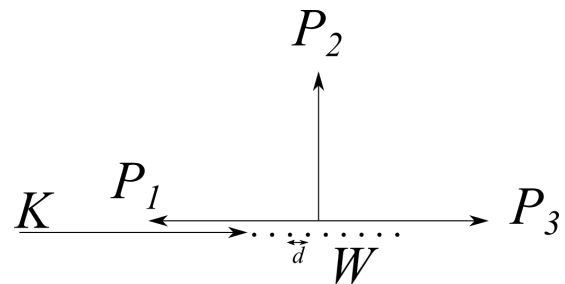


Abbildung 1.3.3: Spezielle Konfiguration mit 3 Personen.

**iv. (2 pt.)** Für allgemeine Einfall- und Ausfallrichtungen  $\alpha$  und  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört man bei  $P$  die Frequenz

$$f(\alpha, \beta) = \frac{f_d}{\cos(\alpha) + \cos(\beta)} \tag{1.3.4}$$

Leite diese Gleichung her und berechne  $f_d$ .

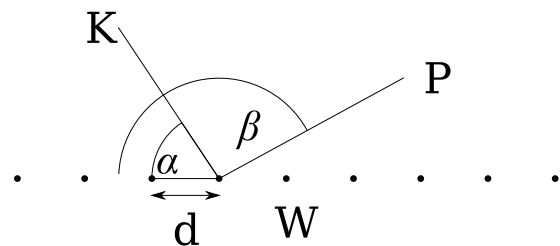


Abbildung 1.3.5: Allgemeine Konfiguration.

**Teil C. Die Wellen (4 Punkte)**

Ein Knall kann auch als eine Überlagerung von vielen ebenen Wellen mit verschiedenen Frequenzen beschrieben werden. In dieser Teilaufgabe betrachten wir nun eine ebene Welle mit einer bestimmten Frequenz  $f$  aus dem Spektrum des Knalles, welche an den Stäben gestreut wird. Insbesondere betrachten wir nicht mehr explizit einen Knall.

- i. (1 pt.)** Welche Bedingung muss erfüllt sein, damit eine Person  $P$  die Frequenz  $f$  hört? Was kann man über den Gangunterschied aussagen?
- ii. (2 pt.)** Unter welchem Ausfallwinkel  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört eine Person diese Frequenz  $f$ ? Berechne sie für einen allgemeinen Einfallswinkel  $\alpha$ .
- iii. (1 pt.)** Vergleiche Dein Resultat mit der Gleichung (1.3.4).

**Teil D. Die Schallgeschwindigkeit (4 Punkte)**

- i. (4 pt.)** In diesem Teil wollen wir ausgehend vom Phänomen aus Teil A die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Sei dazu der Einfallswinkel

$\alpha = 45^\circ$  (siehe Abb. 1.3.5) und der Abstand der Stäbe sei  $d = 20$  cm. Für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$  wird die Frequenz gemessen und in Tab. 1.3.6 aufgelistet. Plote die Messungen in einem geeigneten Graphen und bestimme mit Hilfe dieser Messungen die Schallgeschwindigkeit  $c$ .

*Hinweis: Du darfst die Gleichung (1.3.4) verwenden und falls Du  $f_d$  nicht berechnet hast, verwende  $f_d = \pi \frac{c}{d}$ .*

$\beta/^\circ$	$f/\text{Hz}$
0	930
30	1150
60	1390
90	2410
120	7450

Tabelle 1.3.6: Messungen der Frequenz  $f$  für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$ .

## Theoretische Probleme: Lösungen

### Aufgabe 1.1: Rotierender Tisch

In dieser Aufgabe betrachten wir einen runden Tisch mit einer masselosen Schiene. Die Schiene ist auf dem Tisch fixiert und eine Masse  $m$  kann sich reibungslos entlang der Schiene bewegen. Die Masse wird dabei durch eine Feder mit Federkonstante  $k$  und Ruhelänge  $l_0$  mit der Mitte des Tisches verbunden.

15 pt.

#### Teil A. Entlang des Durchmessers

Die Schiene ist entlang des Durchmessers auf dem Tisch fixiert, wie in Abbildung 1.1.1 dargestellt. Die Distanz  $x$  bezeichnet die Auslenkung der Masse  $m$  von der Ruhelage der Feder.

4 pt.

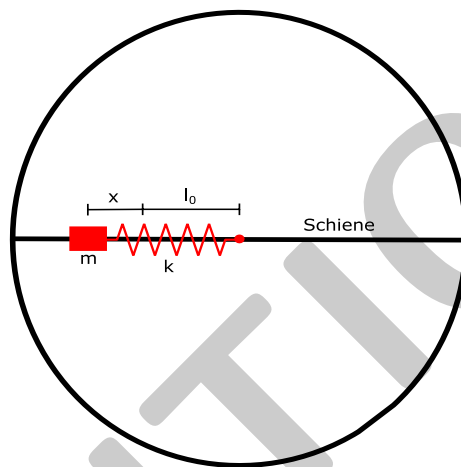


Abbildung 1.1.1: Tisch mit Feder

i. Wie gross ist die Kreisfrequenz der Schwingung, wenn der Tisch nicht rotiert?

1 pt.

$$\omega_{\text{spring}} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

1 pt.

Give 0.5 points if the frequency

$$f_{\text{spring}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

instead of the angular frequency is given as a solution.

Wir positionieren die Masse  $m$  in Ruhe eine Distanz  $l_0$  von der Mitte des Tisches entfernt, damit die Feder entspannt ist. Der Tisch wird nun angestossen, sodass er mit einer festen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  rotiert.

ii. Was passiert, falls die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  sehr gross ist?

1 pt.

If the angular speed is very high the centrifugal force will always be larger than the spring force, because it is increasing linearly with the distance  $x$  as well. Therefore, the mass will move outwards with increasing speed and eventually fall over the edge of the table.

1 pt.

One could also argue that the spring force is smaller than the centripetal force for very high  $\omega_0$ . In this case also all the points are given.



iii. Was ist der maximale Wert von  $\omega_0$ , sodass die Masse  $m$  oszilliert?

1 pt.

At the beginning when  $x = 0$ , the centrifugal force will always be larger than the spring force, which is zero. The magnitude of both forces increases linearly in distance  $x$  with proportionality constants  $k$  and  $m\omega_0^2$ . We have an oscillation in case the spring force will become larger than the centrifugal force at some distance  $x$ . Which means we need to have  $k > m\omega_0^2$ . This leads to

$$\omega_0 < \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_{\text{spring}}$$

1 pt.

*This condition can also be found by arguing with the centripetal force. All points are given if the conclusion is correct.*

iv. Ist die Kreisfrequenz der Oszillation in diesem Fall grösser oder kleiner als wenn der Tisch nicht rotiert?

1 pt.

The centrifugal force is acting against the spring force, which effectively can be described as if the spring had a smaller spring constant  $k' < k$ . This means that the new angular frequency  $\omega$  is smaller than  $\omega_{\text{spring}}$ .

1 pt.

*Similarly one can argue that part of the spring force is needed for the centripetal force. Therefore we have an effective spring constant  $k' < k$  and we come to the same conclusion as above.*

**Teil B. Entlang der Sehne**

4 pt.

Der Tisch wird wieder angehalten und die Schiene neu so fixiert, dass sie eine Sehne des Tisches darstellt, wie in Abbildung 1.1.2. Die Entfernung der Schiene zum Mittelpunkt soll  $l_0$  betragen. Dies garantiert, dass die Feder in eine Ruhelage zurückkehren kann, in welcher sie nicht gespannt ist. In den weiteren Teilaufgaben bezeichnen wir mit  $x$  die Auslenkung der Masse  $m$  vom Mittelpunkt der Schiene, mit  $d$  die Distanz der Masse zum Mittelpunkt des Tisches und mit  $\theta$  den Winkel zwischen Feder und der Verbindung vom Mittelpunkt des Tisches zum Mittelpunkt der Schiene.

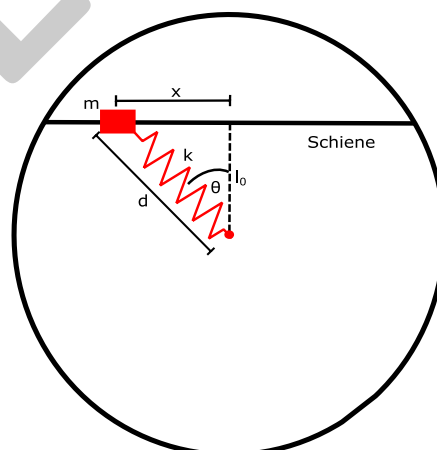


Abbildung 1.1.2: Tisch mit Schiene entlang der Sehne

i. Wie gross ist die Kraft, welche die Masse zur Ruhelage zurücktreibt? Gib das Resultat in Abhängigkeit der Auslenkung  $x$  und der Ruhelänge  $l_0$  an.

2 pt.

The total force from the spring on the mass is

$$F_{\text{tot}} = -k \left( \sqrt{x^2 + l_0^2} - l_0 \right)$$

0.5 pt.

Since the mass is fixed on the rail only the component parallel to the rail contributes

$$F = -k \left( \sqrt{x^2 + l_0^2} - l_0 \right) \sin(\theta)$$

0.5 pt.

Expressed in term of  $x$ ,  $l_0$  the sine is

$$\sin(\theta) = \frac{x}{\sqrt{l_0^2 + x^2}}$$

0.5 pt.

Combining the the two equations gives

$$F = -kx \left( 1 - \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + x^2}} \right)$$

0.5 pt.

**ii. Berechne die Energie, welche in der Feder steckt, in Abhängigkeit von  $x$  und  $l_0$ .**

**2 pt.**

The energy in the spring is

$$E = \frac{1}{2} k (d - l_0)^2$$

0.5 pt.

Expanding the bracket gives

$$E = \frac{1}{2} k (d^2 - 2l_0d + l_0^2)$$

0.5 pt.

We can use Pythagoras to substitute the distance  $d$

$$d = \sqrt{x^2 + l_0^2}$$

0.5 pt.

In the end we get

$$E = \frac{1}{2} kx^2 - \left( \frac{\sqrt{l_0^2 + x^2}}{l_0} - 1 \right) kl_0^2$$

0.5 pt.

*Alternative solution:*

The energy in the spring is

$$E = - \int_0^x F(s) ds$$

By evaluating the integral we get the same solution

$$E = \int_0^x ks \left( 1 - \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + s^2}} \right) ds = \frac{1}{2} kx^2 - \left( \frac{\sqrt{l_0^2 + x^2}}{l_0} - 1 \right) kl_0^2$$

(0.5 pt)

(1.5 pt)

**Teil C. Gleichgewichtslagen**

7 pt.

Wir beginnen den Tisch nun wieder mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega_T$  zu drehen.

i. Zeichne ein Schema mit allen Kräften, welche auf die Masse  $m$  wirken, falls die Masse nicht in einer Gleichgewichtslage ist. Welche Bedingung muss für die Kräfte in einer Gleichgewichtslage gelten?

2 pt.

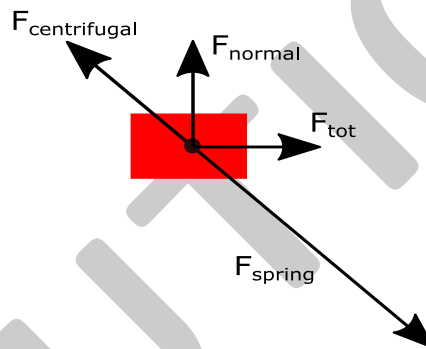


Abbildung 1.1.3: Force diagram

The force of the spring.

0.5 pt.

The normal force from the rail on the mass. If the spring force is smaller than the centrifugal force the normal force points in a different direction as shown in sketch 1.1.3.

0.5 pt.

The centrifugal force from the rotation.

0.5 pt.

In equilibrium the sum of all the forces is zero.

0.5 pt.

*In case this question is solved with the centripetal force, the 0.5 points from the centrifugal force and the 0.5 points from the equilibrium condition are given if one mentions that in equilibrium the total force is equal to the centripetal force.*

ii. Finde einen Ausdruck für die totale Kraft auf die Masse  $m$  in Abhängigkeit der Distanz  $d$  und dem Winkel  $\theta$ .

1 pt.

The total force on the mass is

$$F_{tot} = m\omega_T^2 d \sin(\theta) - k(d - l_0) \sin(\theta)$$

For the centrifugal force.

0.5 pt.

For the spring force.

0.5 pt.

In case the problem is solved with the centripetal force, full points are given for

$$F_{tot} = -k(d - l_0) \sin(\theta)$$

**iii. Wie viele Gleichgewichtslagen gibt es? Berechne ihre Distanz zum Mittelpunkt des Tisches in Abhängigkeit von  $k$ ,  $\omega_T$  und  $l_0$ .**

2 pt.

In equilibrium the total force is zero, which means that either  $\sin(\theta) = 0$  or the centrifugal force is equal to the spring force

$$m\omega_T^2 d = k(d - l_0)$$

where  $d$  is the distance between the mass and the center of the circle.

0.5 pt.

The same condition is found in case if one says the centripetal force is equal to spring force.

Solving for  $d$  gives

$$d = l_0 \frac{k}{k - m\omega_T^2}$$

0.5 pt.

This solution only makes sense in the case  $m\omega_T^2 < k$ , which means in this case there are three equilibrium points, two at distances  $d$  and one at distance  $l_0$ .

0.5 pt.

In the case  $m\omega_T^2 > k$ , there is only the equilibrium point in the middle at distance  $l_0$ .

0.5 pt.

**iv. Gib ohne Begründung an, ob es sich bei den Gleichgewichtslagen um stabile oder instabile Gleichgewichte handelt.**

2 pt.

First we look at the equilibrium point in the middle ( $d = l_0$ ). At  $x = 0$  the total force of the spring is 0 but the centrifugal force is  $m\omega_T^2 l_0 > 0$ . Therefore for small deviations  $\delta x$  the mass will be pushed away from the equilibrium point. This means the point is unstable.

1 pt.

For the other two points we first note that the spring force and the centrifugal force are both linearly increasing in  $d$  but just in opposite directions. The proportionality constants are  $m\omega_T^2$  and  $k$ . In these two equilibrium points both forces are equal in magnitude and we know  $m\omega_T^2 < k$ . This means for distances  $d$  further from the center the spring force becomes dominant which pushes the mass back to equilibrium. The opposite happens for distances  $d$  closer to center than the equilibrium, where the centrifugal is dominant, which pushes the mass out to the equilibrium. Thereby these two equilibrium points are stable.

1 pt.

**Aufgabe 1.2: Thermische Konvektion**

Thermische Konvektion beschreibt das Phänomen, dass aufgrund von Temperaturunterschieden eine Strömung in einem Gas entsteht. Das bekannteste Beispiel für thermische Konvektion ist das Aufsteigen von warmer Luft in der Erdatmosphäre. In dieser Aufgabe werden wir dieses Phänomen anhand des idealen Gasmodells genauer untersuchen.

Für die folgenden Aufgaben nehmen wir immer an, dass es sich bei der Atmosphäre um ein zwei-atomiges ideales Gas handelt mit einer molaren Masse  $M$ , bestehend aus einer einzelnen Atomsorte.

**Teil A. Ideales Gas**

i. Nenne eine Annahme, welche für das ideale Gas auf Teilchenebene gilt.

Points are given for one of the following statements:

- There isn't any attraction between the molecules.
- The collisions between the molecules are elastic.
- The collisions between the molecules and the wall are elastic.
- The atoms in the gas molecules are point like.

ii. Finde einen allgemeinen Ausdruck für die Dichte  $\rho$  des idealen Gases in Abhängigkeit von  $p$ ,  $T$  und  $M$ .

In the ideal gas law

$$pV = nRT$$

We can substitute the number of gas molecules  $n$  by the density

$$n = \frac{\rho V}{M}$$

After some algebraic transformation we get

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

iii. Wie viele Freiheitsgrade hat ein zwei-atomiges ideales Gas?

*Tipp: Die Vibrationsfreiheitsgrade sind eingefroren und tragen keine Energie bei.*

We have 3 translational degrees of freedom and 2 rotational degrees of freedom. In total we therefore have 5.

iv. Folgere daraus den numerischen Wert des Adiabatenkoeffizient  $\gamma$  für ein zwei-atomiges Gas.

**Hinweis:** Falls du den Wert nicht findest, verwende für die numerischen Teilaufgaben den Wert  $4/3$ .

1 pt.

We have  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  with  $c_p = \frac{f+2}{2}R$  and  $c_v = \frac{f}{2}R$ , where  $f$  are the degree of freedoms.

0.5 pt.

Plugging in the values gives  $\gamma = 1.4$ .

0.5 pt.

*Note:* If the adiabatic coefficient is stated directly without reasoning only 0.5 points are given.

### Teil B. Adiabatischer Aufstieg

3 pt.

Um eine Bedingung herzuleiten wann Konvektion vorkommen kann, betrachten wir ein kleines Luftpaket in der Atmosphäre bei der Temperatur  $T_0$  und Druck  $p_0$ . Das Luftpaket soll nun adiabatisch, das heisst ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, um die Strecke  $\Delta r$  aufsteigen.

i. Gib die Temperatur  $T$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  in Abhängigkeit von  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\gamma$  und dem Druck  $p$  nach dem Aufstieg an.

1.5 pt.

From the adiabatic equation in  $p$ ,  $T$  we get

$$p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T = p_0^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_0$$

1 pt.

Rearranging the terms gives

$$T = \frac{p_0^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_0}{p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}$$

0.5 pt.

*Note:* The adiabatic equation in  $p$ ,  $T$  can be derived from the standard adiabatic equation in  $p$ ,  $V$ :  $pV^\gamma = \text{const.}$

$$pV^\gamma = \text{const.} \implies p^{\frac{1}{\gamma}} V = \text{const.}$$

By the ideal gas law we get

$$p^{\frac{1}{\gamma}-1} T n r = \text{const.} \implies p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T = \text{const.}$$

ii. Angenommen die Strecke  $\Delta r$  ist sehr klein, sodass sich der Druck  $\Delta p$  nur sehr wenig ändert. Was ist die Temperaturänderung  $\Delta T$  in Abhängigkeit von  $\Delta p$ ?

**Tipp:** Nutze die Näherung  $(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$  für  $x \ll 1$ .

1.5 pt.

From the solution above we have

$$T_0 + \Delta T = p_0^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_0 (p_0 + \Delta p)^{-\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_0 \left(1 + \frac{\Delta p}{p_0}\right)^{-\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

0.5 pt.

Using the approximation given in the hint

$$T_0 + \Delta T = T_0 - \frac{1-\gamma}{\gamma} \Delta p \frac{T_0}{p_0}$$

0.5 pt.

We conclude

$$\Delta T = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \Delta p \frac{T_0}{p_0}$$

0.5 pt.

### Teil C. Konvektionsbedingung

4.5 pt.

Wir nehmen nun an unser Luftpaket sei zu Beginn im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft, das heisst die Umgebungsluft und das Luftpaket haben dieselbe Temperatur  $T_0$ , denselben Druck  $p_0$  und dieselbe Dichte  $\rho_0 = \rho'_0$ . Die Umgebungsluft habe zudem einen fixen Temperaturgradient  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'}$  und Druckgradient  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'}$ . Aufgrund einer Störung, steigt das Luftpaket adiabatisch um eine sehr kleine Strecke  $\Delta r$  auf, wobei jeweils ein Druckgleichgewicht mit der Umgebungsluft herrscht.

i. Welche Bedingung muss für die Dichten  $\rho'$  und  $\rho$  nach dem Aufstieg um  $\Delta r$  gelten, damit das Luftpaket weiter aufsteigen kann und eine Konvektionsströmung entsteht?

1 pt.

The buoyancy force needs to be higher than the gravitational force, so that the air continues to rise.

0.5 pt.

Mathematically this conditions reads as

$$\rho < \rho'$$

0.5 pt.

Note: Full points are also given if the solution is stated directly.

ii. Folgere daraus eine Bedingung für  $\Delta T$  und  $\Delta T'$ . Begründe deine Antwort.

1.5 pt.

We use the formula derived for the density of the ideal gas in A ii.

$$\frac{M(p_0 + \Delta p)}{R(T_0 + \Delta T)} = \rho < \rho' = \frac{M(p'_0 + \Delta p')}{R(T'_0 + \Delta T')}$$

0.5 pt.

Since the pressure is in equilibrium  $\Delta p' = \Delta p$  and  $p_0 = p'_0$ ,  $T_0 = T'_0$  we get

$$\frac{1}{T_0 + \Delta T} < \frac{1}{T_0 + \Delta T'}$$

0.5 pt.

We conclude

$$\Delta T > \Delta T'$$

0.5 pt.

Note: If the condition is stated directly without reasoning only 0.5 points are given.

iii. Folgere daraus die Konvektionsbedingung

$$\frac{\Delta T'}{\Delta r'} < \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T_0}{p_0} \frac{\Delta p'}{\Delta r'} \quad (1.2.1)$$

wobei  $\gamma$  der Adiabatenkoeffizient ist.

1 pt.

We can use the expression for  $\Delta T$  derived before

$$\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T_0}{p_0} \Delta p = \Delta T < \Delta T'$$

0.5 pt.

Since the pressure is in equilibrium we get  $\Delta p = \Delta p'$ . Rearranging the terms and dividing by  $\Delta r'$  we get the convection condition

$$\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T_0}{p_0} \frac{\Delta p'}{\Delta r'} > \frac{\Delta T'}{\Delta r'}$$

0.5 pt.

**iv. Angenommen auf der Erdoberfläche haben wir Normalbedingungen. Gib an, ob für folgende Gradienten  $\frac{\Delta p'}{\Delta r'} = -0.1 \text{ bar} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\frac{\Delta T'}{\Delta r'} = -5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$  eine Konvektionsströmung zu erwarten ist.**

1 pt.

Normal conditions mean  $p_0 = 1 \text{ bar}$  and  $T_0 = 273.15 \text{ K}$  (or  $293.15 \text{ K}$  depending on the exact definition of the normal conditions).

0.5 pt.

For both values of the adiabatic coefficient (1.4 and 4/3) the convection condition is not fulfilled and no convection occurs.

0.5 pt.

*For convection to occur, one needs a temperature gradient of about  $-10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ .*

#### Teil D. Temperaturverlauf

6 pt.

**Wir wollen nun einen Temperaturverlauf der Atmosphäre herausfinden, sodass Konvektion fortwährend möglich ist.**

**i. Angenommen wir haben eine Luftsäule der Höhe  $h$ , wobei die Dichte  $\rho$  der Luft in der Säule konstant ist. Wie gross ist der hydrostatische Druck am Boden der Luftsäule?**

1 pt.

The hydrostatic pressure is

$$p = \rho gh$$

1 pt.

**ii. In der Atmosphäre nimmt die Dichte  $\rho(h)$  der Luft mit zunehmender Atmosphärenhöhe  $h$  ab, deshalb betrachten wir nur eine sehr kleine Luftsäule der Länge  $\Delta r$ . Wie gross ist der Druckgradient  $\frac{\Delta p}{\Delta r}$  auf der Höhe  $h$ ?**

1 pt.

For a small air package we can assume that the density is constant. So the pressure difference throughout the air package is  $\Delta p = -g\rho\Delta r$ . Therefore we get

$$\frac{\Delta p}{\Delta r} = -g\rho(h)$$

1 pt.

**Für die folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass in der Konvektionsbedingung (1.2.2) Gleichheit gilt.**

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{p} \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (1.2.2)$$



iii. Angenommen wir haben einen so grossen Temperaturgradienten, dass die Ungleichheit in Gleichung (1.2.1) gilt. Beschreibe den Prozess in der Atmosphäre, der dazu führt, dass Gleichung (1.2.2) nach einer gewissen Zeit approximativ gilt.

1 pt.

In case the temperature drops that rapidly, so that the convection condition is fulfilled, the warm air at the ground starts to rise. Since the warm air is rising the temperature gradient will decrease until we have an equality in the convection condition.

1 pt.

iv. Mit dieser zusätzlichen Annahme können wir den Temperaturverlauf in der Atmosphäre bestimmen. Finde einen Ausdruck für die Temperatur auf der Höhe  $h$  in Abhängigkeit von  $g$ ,  $\gamma$ ,  $R$  und der Temperatur  $T_0$  auf der Erdoberfläche.

*Tipp: Verwende die Gleichung (1.2.2) und die Resultate von den Teilaufgaben D ii. und A ii.*

2 pt.

We use equation (1.2.2) and the expression for the pressure gradient to get a differential equation for the temperature gradient

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = - \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{p} g \rho$$

0.5 pt.

With the solution from question A ii. this can be simplified to

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} = - \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) g \frac{M}{R}$$

0.5 pt.

We see that the temperature gradient is a constant independent of the height  $h$ . Therefore we get

$$T(h) = T_0 - \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) g \frac{M}{R} h = T_0 - Ah$$

1 pt.

v. Nehme an die Temperatur ausserhalb der Erdatmosphäre sei 0 K. Die Temperatur an der Erdoberfläche sei 298.15 K. Berechne damit die Höhe der Erdatmosphäre. Verwende für die molare Masse  $M$  der Luft  $28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

1 pt.

Let  $h_a$  be the height of the atmosphere. Therefore we have  $0 = -Ah_a + T_0$ . This means

$$h_a = \frac{T_0}{A}$$

0.5 pt.

We get a numerical value of 32 km.

0.5 pt.

The value of the constant is

$$A = 9.44 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$$

In case  $\gamma = 4/3$  the numerical values are

$$A = 8.26 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1} \text{ and } h_a = 36 \text{ km}$$

**Aufgabe 1.3: Feuerwerk**

16 pt.

Wenn man gegenüber eines Gebäudes mit einer Wellblechfassade steht, kann man während eines Feuerwerks folgendes Phänomen beobachten (s. Abb. 1.3.1): Kurz nach dem Knall eines detonierenden Feuerwerkskörpers  $K$  hört eine Person  $P$  von einer gegenüberliegenden Wand mit Wellblechfassade  $W$  einen kurzen, sirrenden Ton.

Ziel dieser Aufgabe ist es, dieses Phänomen zu untersuchen und Ausdrücke für die beobachtete Frequenz des Sirrens herzuleiten.

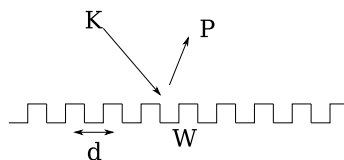


Abbildung 1.3.1: Situation mit Wellblechfassade.

**Teil A. Der Knall**

1.5 pt.

i. Worin unterscheidet sich die Ausbreitung der Druckwelle des Knalles nach dem Auftreffen auf das Wellblech von der Reflexion an einer ebenen Wand?

1.5 pt.

In case of a corrugated iron, the sound wave gets scattered at each front plate.

0.5 pt.

The outgoing waves are cylindrical waves.

0.5 pt.

In case of a plane wall, the reflected sound wave is rather a plane wave.

0.5 pt.

Um die Rechnung zu vereinfachen, untersuchen wir das Phänomen mit einem einfacheren Modell: Wir ersetzen das Wellblech durch periodisch angeordnete, sehr dünne Stäbe, siehe Abb. 1.3.2.

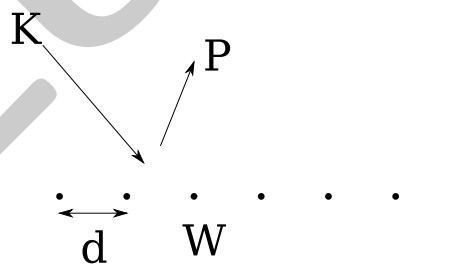


Abbildung 1.3.2: Vereinfachtes Modell mit Stäben.

In den folgenden Teilaufgaben nehmen wir an, dass der Abstand vom Feuerwerkskörper  $K$  zur Wand  $W$  sowie der Abstand von der Wand  $W$  zur Person  $P$  gross sind (gross gegenüber der Abmessung der Wand  $W$ ).

Im Folgenden wollen wir das Phänomen mit zwei verschiedenen Ansätzen betrachten.

**Teil B. Die Pulsaskade**

6.5 pt.

In diesem Teil betrachten wir den Knall des Feuerwerkskörper als eine Druckwelle von sehr kurzer zeitlicher Dauer.

i. Zuerst betrachten wir eine spezielle Konfiguration in der der Feuerwerkskörper in der Verlängerung der Wand explodiert, siehe Abb. 1.3.3. Die Druckwelle des Knalls wird an

jedem Stab gestreut. Wie gross ist die jeweilige Zeitdifferenz  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  und  $\Delta t_3$  zwischen den gestreuten Wellen zweier benachbarter Stäbe für die drei Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ? 2 pt.

In all cases: Two successive bangs origin from the scattering of neighbouring bars. Therefore it suffices to compute the additional propagation distance between neighbouring bars (give these points also in case it is not implicitly mentioned but the following computation correct). 0.5 pt.

For  $P_1$ : Consider one bar. To reach the right sided neighbouring bar, the bang needs to travel a distance of  $d$ . Then to return to the considered bar, the scattered bang travels another distance  $d$ . The additional distance is  $2d$ , hence the  $\Delta t_1 = \frac{2d}{c}$ . 0.5 pt.

For  $P_2$ : The bang needs again to travel a distance  $d$  to reach the next right sided neighbouring bar. Since the scattered bangs travel perpendicular to the corrugated iron to reach  $P_2$  (and  $P_2$  is far away), there is no additional distance. The total path difference is only  $d$ , hence the  $\Delta t_1 = \frac{d}{c}$ . 0.5 pt.

For  $P_3$ : In this case, the bang getting scattered at a bar overlaps with the original bang. Therefore all the scattered bangs arrive simultaneously, hence  $\Delta t = 0$ . 0.5 pt.

ii. Wie kommt der sirrende Ton zustande? 1 pt.

The buzzing sound origins from the cascading of the scattered bangs. 1 pt.

iii. Welche Frequenzen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  hat das Sirren für die Personen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ ? Begründe Deine Antwort ohne Gleichung (1.3.4) zu nutzen.

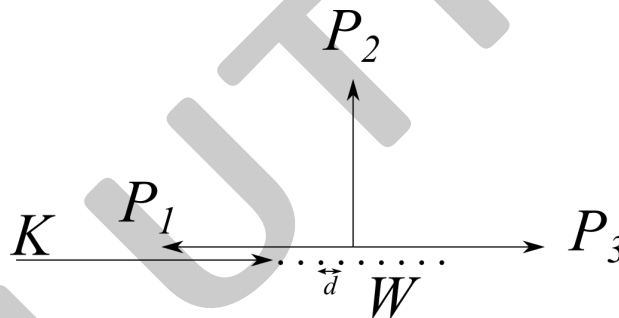


Abbildung 1.3.3: Spezielle Konfiguration mit 3 Personen.

Note: If the equation (1.3.4) is used or of the result is given without explanation, give 0 points! Exception: The general equation (1.3.4) is derived correctly and it is explained how to use it (i.e. what values of  $\alpha$  and  $\beta$  inserted). 1.5 pt.

The frequency is given by  $f = \frac{1}{T}$  where  $T$  is the period.

For  $P_1$  we get  $f = \frac{c}{2d}$ . 0.5 pt.

For  $P_2$  we get  $f = \frac{c}{d}$ . 0.5 pt.

For  $P_3$  we have to be careful: We hear a single bang, because all the scattered bang arrive at the same time. So no particular frequency can be attributed. 0.5 pt.

iv. Für allgemeine Einfall- und Ausfallrichtungen  $\alpha$  und  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört man bei  $P$  die Frequenz

$$f(\alpha, \beta) = \frac{f_d}{\cos(\alpha) + \cos(\beta)}. \tag{1.3.4}$$

Leite diese Gleichung her und berechne  $f_d$ .

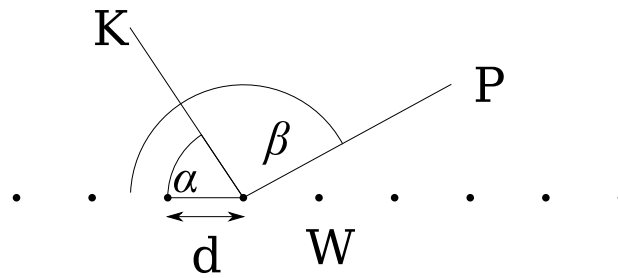


Abbildung 1.3.5: Allgemeine Konfiguration.

Note: If the equation (1.3.4) is used or if the result is given without explanation, give 0 points! Exception: The general equation (1.3.4) is derived correctly and it is explained how to use it (i.e. what values of  $\alpha$  and  $\beta$  inserted).

2 pt.

The frequency is given by  $f = \frac{1}{T}$  where  $T$  is the period.

Consider again a bar. The additional path length for the bang to reach the right handed neighbour is  $\cos(\alpha)d$ .

0.5 pt.

The additional path length from the right handed neighbour to  $P$  is  $\cos(\beta)d$ .

0.5 pt.

The total temporal delay is therefore  $\Delta t = \frac{d(\cos(\alpha)+\cos(\beta))}{c}$  (0.25 points are given for dividing by  $c$  and 0.25 points for adding the two path length).

0.5 pt.

We get the frequency by taking the reciprocal value  $f = \frac{1}{\Delta t}$ .

Therefore we have  $f_d = \frac{c}{d}$  (these points are given for the right result even if there is no or a wrong explanation).

0.5 pt.

Teil C. Die Wellen

4 pt.

Ein Knall kann auch als eine Überlagerung von vielen ebenen Wellen mit verschiedenen Frequenzen beschrieben werden. In dieser Teilaufgabe betrachten wir nun eine ebene Welle mit einer bestimmten Frequenz  $f$  aus dem Spektrum des Knalles, welche an den Stäben gestreut wird. Insbesondere betrachten wir nicht mehr explizit einen Knall.

i. Welche Bedingung muss erfüllt sein, damit eine Person  $P$  die Frequenz  $f$  hört? Was kann man über den Gangunterschied aussagen?

1 pt.

The scattered waves from the different bars must interfere constructively.

0.5 pt.

Therefore the difference of the path length of the different scattered waves must be a multiple of the wavelength  $\Delta l = m\lambda$ ,  $m \in \mathbb{N}$  (these points are also given if the multiple path length is mentioned in the next task).

0.5 pt.

ii. Unter welchem Ausfallwinkel  $\beta$  (siehe Abb. 1.3.5) hört eine Person diese Frequenz  $f$ ? Berechne sie für einen allgemeinen Einfallswinkel  $\alpha$ .

2 pt.

For the frequency  $f$  we have a wavelength  $\lambda = \frac{c}{f}$  (give these points also if it is mentioned in the previous task).

0.5 pt.

The additional path length is  $\Delta l = d(\cos(\alpha) + \cos(\beta))$ .

0.5 pt.

Equating the additional path length with a multiple of  $\lambda$ .

0.5 pt.

Final result:  $\beta = \arccos\left(\frac{m\lambda}{d} - \cos(\alpha)\right)$ .

0.5 pt.

If only the first order  $m = 1$  or  $m = -1$  is used, punishment of -0.25 points.

**iii. Vergleiche Dein Resultat mit der Gleichung (1.3.4).**

1 pt.

For  $m = 1$  (give these points only if the computation above is also done with a general  $m \in \mathbb{N}$  and don't if  $m \pm 1$ ),

0.5 pt.

and solving for  $f = \frac{c}{\lambda}$  we get the same result (give these points even if nothing else in this part C is done but the student realizes that the two approaches are the same).

0.5 pt.

**Teil D. Die Schallgeschwindigkeit**

4 pt.

**i. In diesem Teil wollen wir ausgehend vom Phänomen aus Teil A die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Sei dazu der Einfallswinkel  $\alpha = 45^\circ$  (siehe Abb. 1.3.5) und der Abstand der Stäbe sei  $d = 20$  cm. Für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$  wird die Frequenz gemessen und in Tab. 1.3.6 aufgelistet. Plote die Messungen in einem geeigneten Graphen und bestimme mit Hilfe dieser Messungen die Schallgeschwindigkeit  $c$ .**

**Hinweis:** Du darfst die Gleichung (1.3.4) verwenden und falls Du  $f_d$  nicht berechnet hast, verwende  $f_d = \pi \frac{c}{d}$ .

$\beta/^\circ$	$f/\text{Hz}$
0	930
30	1150
60	1390
90	2410
120	7450

Tabelle 1.3.6: Messungen der Frequenz  $f$  für verschiedene Ausfallwinkel  $\beta$ .

Concerning the plot (total 2 points): It does not matter what plot a student draws (i.e. whether it is a  $\beta$ - $f$  plot or a  $\beta$ - $c$  plot. Distribute the points as follows:

4 pt.

Axis labelled (0.25 points for  $x$  and  $y$  each).

0.5 pt.

Scale of axis visible and reasonable (0.25 points for  $x$  and  $y$  each).

0.5 pt.

Both axis drawn with ruler (i.e. straight line).

0.25 pt.

Big enough plot.

0.25 pt.

Data points correctly drawn (only 0.25 points if one point is clearly wrong and 0 points if two or more are wrong).

0.5 pt.

Punishment of 0.5 points if the data points are connected with a line (no matter whether straight or curved line) but trend line is ok.

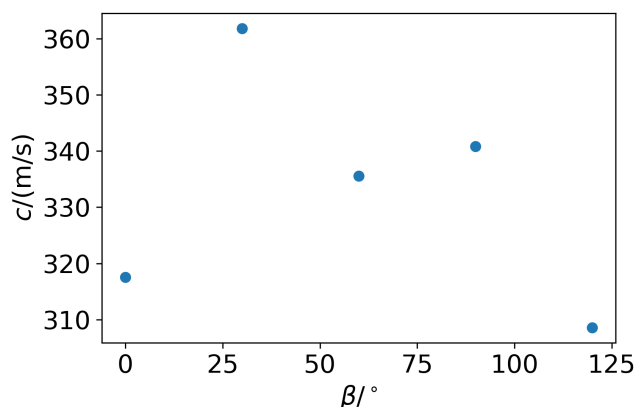


Abbildung 1.3.7: Computed speed of sound.

Concerning the data evaluation (2 points): There is no punishment if  $f_d = \pi \frac{c}{d}$  is used, but the result is simply smaller by a factor of  $\pi$ .

Computation of the speed of sound correctly:  $c = df (\cos(\alpha) + \cos(\beta))$ .

Reasonable method to evaluate the data (for example compute for each data point the speed of sound and take the average or guess the average by inserting a trend line in the  $\beta$ - $c$  plot).

Get the correct value of  $333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (give points in between the interval  $328 - 338 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

0.5 pt.

1 pt.

0.5 pt.

SOLUTIONS