Klausurprüfung in Physik (Experimentalphysik A) Herbst 2024

Elektrotechnik & Informationstechnik

1. Newtonsche Gesetze und Kreisbewegung
   a) Wie lauten die drei Newtonschen Axiome?
   b) Wie groß ist (i) der Impuls p, (ii) der Drehimpuls L, (iii) die kinetische Energie E_{kin} und (iv) die Winkelgeschwindigkeit ω eines Massenpunktes der Masse m, der sich mit der Geschwindigkeit v_0 auf einer Kreisbahn mit dem Radius r bewegt?
   c) Welches Drehmoment wird hier benötigt, um eine Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$ zu erzielen?
   d) Wie lautet die vektorielle Gleichung zur Berechnung des Drehmoments aus der wirkenden Kraft? Erläutern Sie die Gleichung anhand einer Skizze, in der alle beteiligten Vektoren eingezeichnet sind.

2. Die Wassersäule des Springbrunnens „Jet d'eau" in Genf hat eine Höhe von h = 100 m. Das Strahlrohr hat einen Durchmesser von d = 0,20 m. Reibung werde vernachlässigt.
   a) Wie groß ist die Ausflussgeschwindigkeit v?
   b) Wie groß ist die Aufenthaltszeit T des Wassers in der Luft?
   c) Welche Masse m an Wasser befindet sich dauernd in der Luft? (Dichte von Wasser: $1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3)
   d) Welcher Impuls p wird je Sekunde auf das vorher als ruhend angenommene Wasser übertragen? Welche Kraft F wirkt dadurch auf die Halterung der Austrittsdüse?

3. 1,0 Liter Wasser wird mittels eines Zerstäubers vollständig in Tröpfchen mit 0,10 mm Durchmesser zerstäubt.
   a) Wie viele Wassertröpfchen werden dabei erzeugt?
   b) Wie viele Mol und wie viele Moleküle Wasser enthält ein solches Tröpfchen?
   c) Wie ist die Oberflächenspannung σ definiert? Geben Sie eine Formel an und benennen Sie alle darin vorkommenden Größen.
   d) Wie groß ist die beim Zerstäuben gegen die Oberflächenspannung zu verrichtende Arbeit? Hinweis: Die Oberflächenenergie vor dem Zerstäuben ist vernachlässigbar.
   e) Wie groß ist der Überdruck in den Wassertröpfchen im Vergleich zur umgebenden Luft? Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Überdruck eines in Wasser befindlichen Luftbläschens gleicher Größe.

   Zahlenwerte: σ_{Wasser} = 0,074 N/m; $m_{molar,\ Wasser}$ = 18 g/mol; ρ_{Wasser} = $1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3.

4. Schwingungen und Wellen
   a) Was ist der Unterschied zwischen einer Schwingung und einer Welle? Geben Sie je eine Funktion an, die (i) eine harmonische Schwingung und (ii) eine ebene Welle beschreibt und benennen Sie alle darin auftretenden Größen.
   b) Wie lautet die eindimensionale Wellengleichung? Benennen Sie alle darin auftretenden Größen.
   c) In einer mit Luft gefüllten Orgelpfeife (Länge der Luftsäule: 1,4 m) bildet sich eine stehende Welle aus. Zeichnen Sie maßstabsgetreu im Maßstab 1:10 die Wellenbäuche und Knoten der Auslenkung für die Grundschwingung und für die erste Oberschwingung ein für den Fall, dass die Orgelpfeife beidseitig offen ist.
   d) Zeichnen Sie in der in c) genannten Orgelpfeife in einer neuen Zeichnung maßstabsgetreu im Maßstab 1:10 die Wellenbäuche und Knoten für die Grundschwingung und für die erste Oberschwingung ein für den Fall, dass die Orgelpfeife nun nur auf einer Seite offen und am anderen Ende geschlossen ist.
   e) Zeichnen Sie maßstabsgetreu im Maßstab 1:10 in einer weiteren Zeichnung die Wellenbäuche und Knoten der Auslenkung für die Grundschwingung und für die erste Oberschwingung ein für eine schwingende Luftsäule in einem 1,4 m langen, geraden Rohr, bei dem beide Enden geschlossen sind.
   f) Welche Frequenzen haben jeweils die Grundschwingung bzw. die erste Oberschwingung aus den Teilaufgaben c), d) und e).
   g) Was versteht man unter dem Huygensschen Prinzip? Erläutern Sie dies mit Hilfe einer Skizze.

   Zahlenwert: Schallgeschwindigkeit in Luft: $c_{Schall,\ Luft}$ = 340 m/s.

5. In einer Druckgasflasche mit dem Volumen V ist bei der Temperatur T molekularer Wasserstoff H_2 der Masse m eingeschlossen.
   a) Welcher Druck p wirkt auf die Flaschenwand?
   b) Wie viele H_2-Moleküle sind in der Flasche und wie groß ist die im Gas gespeicherte Wärmeenergie?
   c) Welche mittlere Geschwindigkeit v_{rms} haben die Moleküle?

   Zahlenwerte: $V = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ m³; $T = 290$ K; $m = 10$ g; Molmasse von H_2: $m_{\text{molar, } H_2} = 2{,}0$ g/mol.

6. Thermodynamik
   a) Wie lautet die Zustandsgleichung idealer Gase? Schreiben Sie die Gleichung nieder und benennen Sie alle darin auftretenden Größen.
   b) Wie lautet die van-der-Waals'sche Zustandsgleichung realer Gase und wie heißen die beiden Terme, die im Vergleich zur Zustandsgleichung idealer Gase hinzukommen?
   c) Beschreiben Sie anhand einer beschrifteten Skizze die Funktion eines Kühlschrankes mit allen wesentlichen Funktionselementen und benennen und erläutern Sie das physikalische Prinzip, nach dem er funktioniert.
   d) Was versteht man unter dem Joule-Thomson-Effekt realer Gase?
   e) Beschreiben Sie anhand einer beschrifteten Skizze, wie das Linde-Verfahren funktioniert. Wozu wird das Linde-Verfahren verwendet?
   f) Wie funktioniert eine Kältemaschine, die auf der Basis des Carnot-Prozesses beruht? Erklären Sie die Funktion anhand eines p-V-Diagrammes und zeichnen Sie den Umlaufsinn ein.
   g) Wie ist der Wirkungsgrad einer Kältemaschine auf Basis des Carnotprozesses als Funktion der beteiligten Energien und Wärmemengen definiert? Wie lässt er sich durch die beiden für den Carnot-Prozess charakteristischen Temperaturen T_1 und T_2 ausdrücken?
   h) Zeichnen Sie in einem beschrifteten p-V-Diagramm eine Isobare und eine Isochore.
   i) Zeichnen Sie in einem weiteren beschrifteten p-V-Diagramm eine Isotherme und eine Adiabate. Welche physikalische Größe ist bei einer Isothermen und welche bei einer Adiabaten konstant?
   j) Welche der beiden Kurven in Aufgabe i) verläuft steiler und warum? Wie lautet die Adiabatengleichung?

Erdbeschleunigung	g	=	9,81 m/s²
Avogadro-Konstante	N_A	=	$6{,}02 \cdot 10^{23}$/mol
Universelle Gaskonstante	R	=	8,31 J/(mol·K)
Boltzmann-Konstante	k_B	=	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Aufgabe	1	2	3	4	5	6
Punkte	6	6	6	8	4	10

Lösungsvorschlag zur Klausurprüfung in Experimentalphysik A

Elektrotechnik & Informationstechnik

Aufgabe 1: Newtonsche Axiome und Kreisbewegung

a) **Newtonsche Axiome**

1. **Trägheitsprinzip**: Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig, geradlinigen Bewegung, solange keine resultierende Kraft $\vec{F}$ auf ihn einwirkt.
2. **Aktionsprinzip**: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ (allgemeiner: $\vec{F} = \dot{\vec{p}}$): Die Beschleunigung eines Körpers ist umgekehrt proportional zu seiner Masse und direkt proportional zur resultierenden Kraft, die auf ihn wirkt.
3. **Reaktionsprinzip**: **actio = reactio**: Übt ein Körper A eine Kraft auf Körper B aus, so übt Körper B eine betragsmäßig gleiche, aber entgegengesetzte Kraft auf A aus (Kräfte treten immer paarweise auf).

b) (i) $\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad \Rightarrow \quad p = m \cdot v_0$

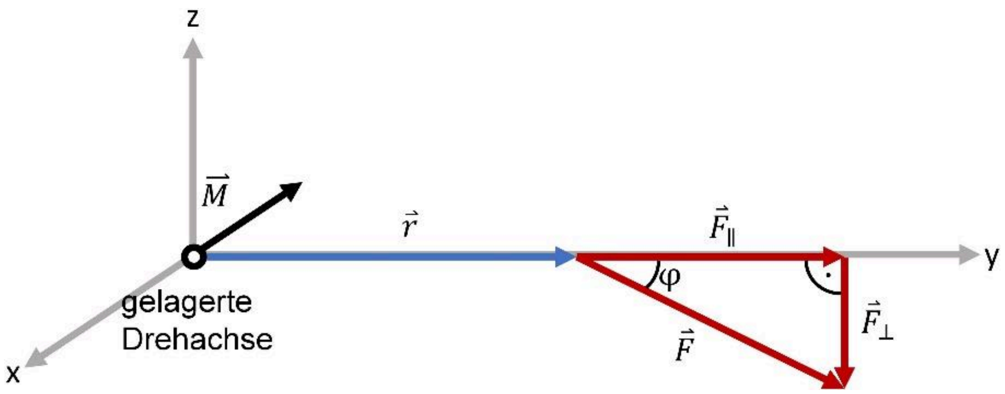
(ii) $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad \Rightarrow \quad L = r \cdot p = m \cdot r \cdot v_0$

(iii) $E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v_0^2$

(iv) $\omega = \frac{v_0}{r}$

c) $M = \dot{L} = \frac{d}{dt}(m \cdot r \cdot v_0) = \frac{d}{dt}(m \cdot r^2 \cdot \omega) = m \cdot r^2 \cdot \dot{\omega}$

d) $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$



Nur die Kraftkomponente $\vec{F}_{\perp}$ senkrecht zum Verbindungsvektor $\vec{r}$ zwischen Drehachse und Angriffspunkt der Kraft bewirkt eine Drehung ($\left|\vec{F}_{\perp}\right| = \left|\vec{F}\right| \cdot \sin\varphi$). Der Drehmomentvektor $\vec{M}$ steht senkrecht auf der durch die Vektoren $\vec{r}$ und $\vec{F}_{\perp}$ aufgespannten Ebene und entspricht der Richtung der Drehachse. Die Orientierung des Drehmomentvektors $\vec{M}$ lässt sich mit der Drei-Finger-Regel der rechten Hand bestimmen. In der Skizze zeigt $\vec{M}$ in die Zeichenebene hinein.

Aufgabe 2: Springbrunnen

a) Energieerhaltung: $\frac{m}{2} \cdot v_0^2 = m \cdot g \cdot h \;\Rightarrow\; v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

Einsetzen: $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 100\ \mathrm{m}} = 44\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

b) Freier Fall aus der Höhe *h*: $h = \frac{g}{2} \cdot t^2 \;\Rightarrow\; t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}$;

Gesamtzeit in der Luft: $T = 2 \cdot t = \sqrt{\frac{8 \cdot h}{g}}$

Einsetzen: $T = \sqrt{\frac{8 \cdot 100\ \mathrm{m}}{9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}} = 9{,}0\ \mathrm{s}$

c) Die Masse des Wassers in der Luft entspricht der Masse, die während *T* ausströmt.

$$m = V \cdot \rho = A \cdot l \cdot \rho = r^2 \cdot \pi \cdot v_0 \cdot T \cdot \rho$$

Einsetzen: $m = \left(\frac{0{,}2}{2}\right)^2 \mathrm{m}^2 \cdot \pi \cdot 44\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 9{,}0\ \mathrm{s} \cdot 1{,}0 \cdot 10^3\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 12 \cdot 10^3\ \mathrm{kg}$

d) Die Wassermasse pro Sekunde beträgt somit (nach c)): $m = 1{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{kg}$

Impulsübertrag pro Sekunde: $p = m \cdot v_0 = 1{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{kg} \cdot 44\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 61 \cdot 10^3\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Kraft auf Halterung: $F = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$ und actio = reactio $\Rightarrow F = 61 \cdot 10^3\ \mathrm{N}$

Aufgabe 3: Oberflächenspannung

a) $V_{\text{Tröpfchen}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{Tröpfchen}}}{2}\right)^3$

$V_{\text{Gesamt}} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$

$$N_{\text{Tröpfchen}} = \frac{V_{\text{Gesamt}}}{V_{\text{Tröpfchen}}} = \frac{V_{\text{Gesamt}}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{Tröpfchen}}}{2}\right)^3} = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-3}\text{m}^3}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{1{,}0 \cdot 10^{-4}\text{m}}{2}\right)^3} = 1{,}9 \cdot 10^9$$

b) $$N_{\text{Mol}} = \frac{m_{\text{Tröpfchen}}}{m_{\text{molar, H}_2\text{O}}} = \frac{V_{\text{Tröpfchen}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{molar, H}_2\text{O}}} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{Tröpfchen}}}{2}\right)^3 \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{molar, H}_2\text{O}}} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{1{,}0 \cdot 10^{-4}\text{m}}{2}\right)^3 \cdot 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{m^3}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 2{,}9 \cdot 10^{-8}\text{mol}$$

$N_{\text{Moleküle}} = N_{\text{Mol}} \cdot N_{\text{A}} = 2{,}9 \cdot 10^{-8}\text{mol} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} = 1{,}7 \cdot 10^{16}$

c) Aufgrund von anziehenden Kräften zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit benötigt man die Energie dW, um eine Oberfläche um dA zu vergrößern.

Definition: $\text{d}W = \sigma \cdot \text{d}A$

σ: Oberflächenspannung, $\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2}\right], \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right], \left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$

$\text{d}W$: verrichtete Arbeit, $[\text{J}]$

$\text{d}A$: gewonnene Oberfläche, $[\text{m}^2]$

d) $\text{d}W = \sigma \cdot \text{d}A$ bzw.

$$\Delta W = \sigma \cdot \Delta A = \sigma \cdot N_{\text{Tröpfchen}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \sigma \cdot \frac{V_{\text{Gesamt}}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3} 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \sigma \cdot \frac{3 \cdot V_{\text{Gesamt}}}{r} = \frac{6 \cdot V_{\text{Gesamt}}}{d} \cdot \sigma$$

$$\Delta W = \frac{6 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-3}\text{m}^3}{1{,}0 \cdot 10^{-4}\text{m}} \cdot 0{,}074 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 4{,}4\ \text{J}$$

Hinweis: Die Oberflächenenergie vor dem Zerstäuben ist vernachlässigbar:

$\Delta A = \frac{6 \cdot V}{d} = 60\ \text{m}^2$; $A_{\text{i}} \approx 10^{-1}\ \text{m}^2 \;\Rightarrow\; A_{\text{i}} << \Delta A$

e) $\Delta p = \frac{2 \cdot \sigma}{r} = \frac{2 \cdot 0{,}074 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}}{5 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m}} = 3{,}0\ \mathrm{kPa}$

Herleitung: $\Delta p = -\frac{F_{\mathrm{r}}}{A} = -\frac{-\frac{dW}{dr}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{\sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot r}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$ mit: $W(\mathrm{r}) = \sigma \cdot A = \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2$

Für den Überdruck eines Luftbläschen unter Wasser erhält man den gleichen Wert, da es allein auf die Grenzflächenenergie Luft/Wasser und deren Veränderung mit dem Radius ankommt und nicht darauf, ob die Luft außen und das Wasser innen ist oder umgekehrt. Die Größe der Grenzfläche Luft/Wasser ist in beiden Fällen gleich, nämlich $4 \cdot \pi \cdot r^2$.

Aufgabe 4: Schwingungen und Wellen

a) Während Schwingungen nur lokal stattfinden, breiten sich Wellen aus. Schwingungen hängen nur von der Zeit, Wellen von Ort und Zeit.

Harmonische Schwingung $u(t) = A\cos(\omega t + \phi)$

$u(t)$: Auslenkung zur Zeit t
A : Amplitude
ω : Kreisfrequenz der Schwingung, $\omega = 2\pi f$ (f : Frequenz)
t : Zeit
ϕ : Phasenverschiebung

Ebene Welle $u(x,t) = u_0 \sin(\omega t - kx)$
mit
$u(x,t)$: Auslenkung am Ort x zur Zeit t
u_0 : Amplitude
ω : Kreisfrequenz
k : Wellenzahl
$(\omega t - k\vec{r})$: Phase

b) Die eindimensionale Wellengleichung ist die Differentialgleichung:

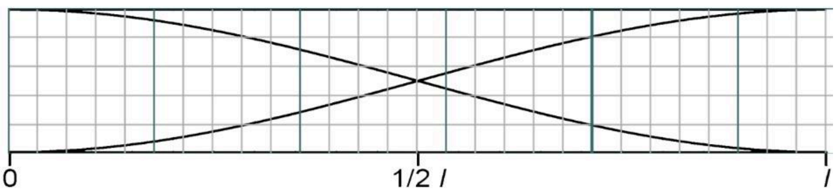
$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

mit
$u(x,t)$: Auslenkung am Ort x zur Zeit t
c : Ausbreitungsgeschwindigkeit

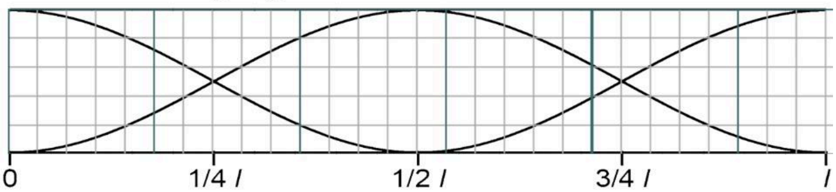
Lösung der Wellengleichung ist die Wellenfunktion.

c) Beide Enden offen:

Grundschwingung: $l = 1/2\,\lambda$

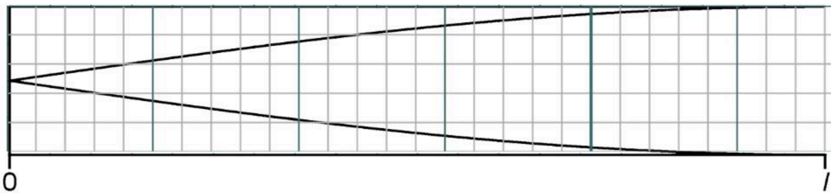


1. Oberschwingung: $l = \lambda$

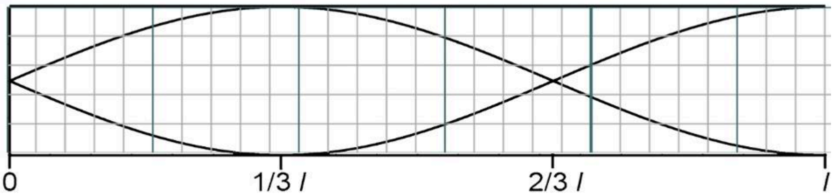


d) Ein Ende offen:

Grundschwingung: $l = 1/4\,\lambda$

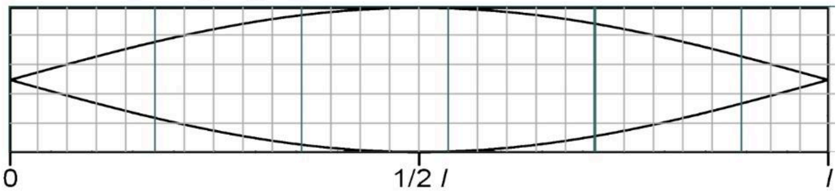


1. Oberschwingung: $l = 3/4\,\lambda$

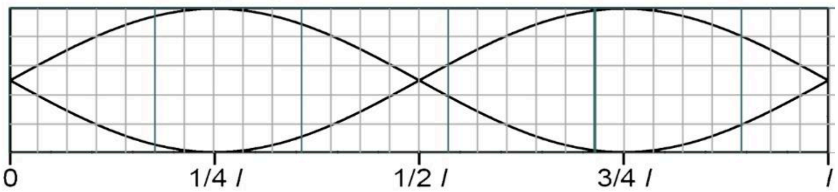


e) Beidseitig geschlossen:

Grundschwingung: $l = 1/2\,\lambda$



1. Oberschwingung: $l = \lambda$



f) $f = \dfrac{c_{\text{Schall, Luft}}}{\lambda}$

für c) und e):

$$\text{Grundschwingung:}\quad \lambda = 2l \Rightarrow \underline{f = \frac{c_{\text{Schall, Luft}}}{2l}} = \frac{340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 1{,}4\text{m}} = \underline{121\text{Hz}}$$

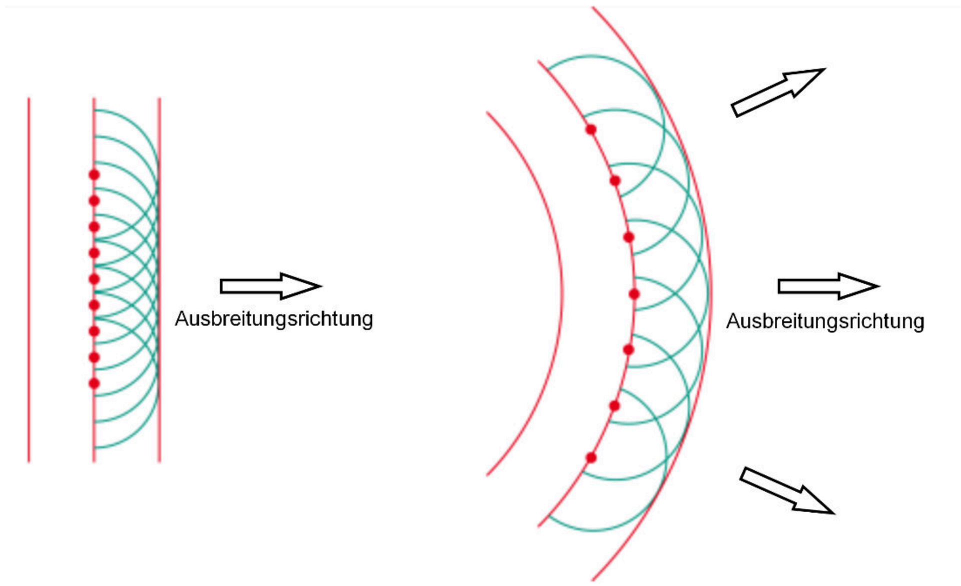
$$\text{1. Oberschwingung:}\quad \lambda = l \Rightarrow \underline{f = \frac{c_{\text{Schall, Luft}}}{l}} = \frac{340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}4\text{m}} = \underline{243\text{Hz}}$$

für d):

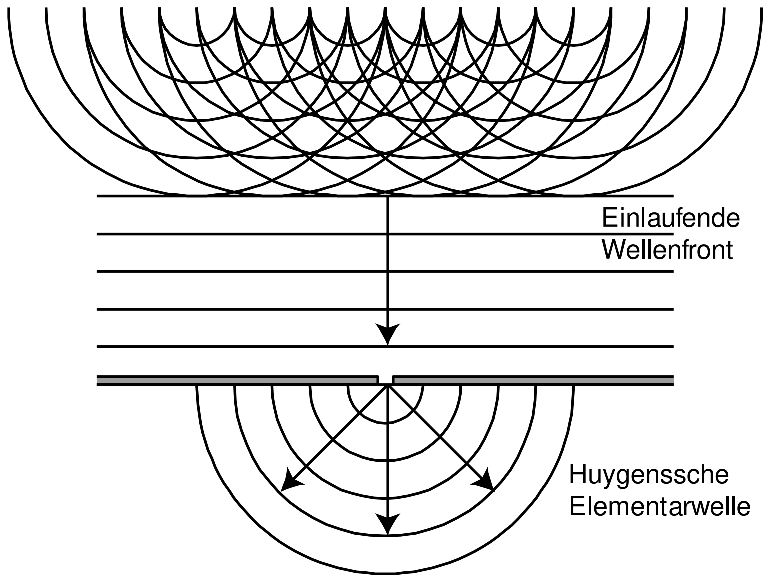
$$\text{Grundschwingung:}\quad \lambda = 4l \Rightarrow f = \underline{\frac{c_{\text{Schall, Luft}}}{4l}} = \frac{340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4 \cdot 1{,}4\text{m}} = \underline{60{,}7\text{Hz}}$$

$$\text{1. Oberschwingung:}\quad \lambda = \frac{4}{3}l \Rightarrow f = \underline{\frac{c_{\text{Schall, Luft}}}{\frac{4}{3}l}} = \frac{340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{4}{3} \cdot 1{,}4\text{m}} = \underline{182\text{Hz}}$$

g) Huygenssches Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer Kugelwelle mit derselben Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit betrachtet werden (sog. Huygenssche Elementarwelle). Die Summe über diese Kugelwellen ergibt die neue Wellenfront.



Skizze: Das Huygenssche Prinzip am Beispiel einer ebenen Welle (links) und einer Kreiswelle (rechts).



Skizze: Das Huygenssche Prinzip am Beispiel eines Einzelspalts. Aufgrund des Huygensschen Prinzips gelangt eine Schallwelle „um die Ecke“ (sogenannte Beugung).

Aufgabe 5: Druckflasche

a) $p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \Rightarrow \quad p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} = \frac{m}{m_{\text{molar, H}_2}} \cdot \frac{R \cdot T}{V}$

Einsetzen: $p = \frac{10\text{ g}}{2{,}0\,\frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{8{,}31\,\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 290\text{ K}}{5{,}0 \cdot 10^{-3} m^3} = 2{,}4 \cdot 10^6\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ (24 bar)

Alternative mit abgeleiteter Formel: $p = \frac{\rho}{3} \cdot v_{\text{rms}}^2 = \frac{m}{3 \cdot V} \cdot \frac{3 \cdot R \cdot T}{m_{\text{molar, H}_2}}$

b) $n = \frac{m}{m_{\text{molar, H}_2}}$

$N = n \cdot N_\text{A} = \frac{m}{m_{\text{molar, H}_2}} \cdot N_\text{A}$

Einsetzen: $N = \frac{10\text{ g}}{2{,}0\,\frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\text{mol}^{-1} = 3{,}0 \cdot 10^{24}$

$U = E_{\text{trans}} + E_{\text{rot}} = N \cdot \left(\frac{f_{\text{trans}}}{2} \cdot k_\text{B} \cdot T + \frac{f_{\text{rot}}}{2} \cdot k_\text{B} \cdot T\right) = N \cdot \frac{f}{2} \cdot k_\text{B} \cdot T$

Für zweiatomiges Molekül gilt: 5 relevante Freiheitsgrade f – drei Freiheitsgrade der Translation und zwei Freiheitsgrade der Rotation.

Einsetzen: $U = 3{,}0 \cdot 10^{24} \cdot \frac{5}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 290\text{ K} = 30\text{ kJ}$

c) Drei Freiheitsgrade der Translation:

$\frac{m_{\text{H}_2\text{-Molekül}}}{2} \cdot v_{\text{rms}}^2 \stackrel{!}{=} \frac{3}{2} \cdot k_\text{B} \cdot T \quad |\cdot N_\text{A}$

$\frac{N_\text{A} \cdot m_{\text{H}_2\text{-Molekül}}}{2} \cdot v_{\text{rms}}^2 = \frac{m_{\text{molar, H}_2}}{2} \cdot v_{\text{rms}}^2 \stackrel{!}{=} \frac{3}{2} \cdot N_\text{A} \cdot k_\text{B} \cdot T = \frac{3}{2} \cdot R \cdot T$

$\Rightarrow v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{m_{\text{molar, H}_2}}}$

Einsetzen: $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8{,}31\,\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 290\text{ K}}{0{,}002\,\frac{\text{kg}}{\text{mol}}}} = 1{,}9 \cdot 10^3\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 6{,}8 \cdot 10^3\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$

Aufgabe 6: Thermodynamik

a) Die Zustandsgleichung für ein ideales Gas lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k_B \cdot T = n \cdot N_A \cdot k_B \cdot T,$$

mit

p	=	Druck
V	=	Volumen
n	=	Stoffmenge
R	=	Universelle Gaskonstante
T	=	Temperatur
N	=	Anzahl der Teilchen
k_B	=	Boltzmann-Konstante
T	=	Temperatur
N_A	=	Avogardro-Konstante

b) Die van-der-Waals'sche Zustandsgleichung für reale Gase lautet:

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{V^2}\right) \cdot (V - b \cdot n) = n \cdot R \cdot T,$$

wobei

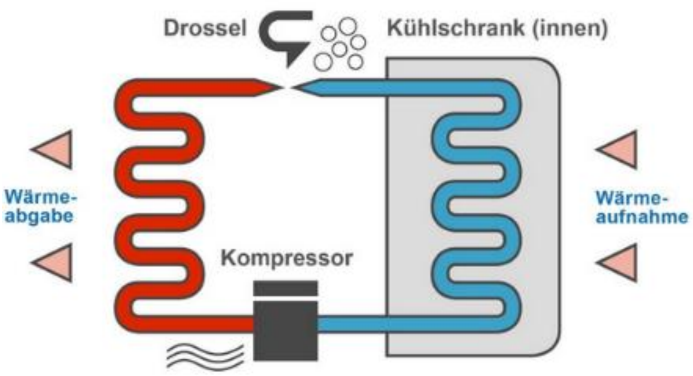
$\frac{a \cdot n^2}{V^2}$ als Binnendruck bezeichnet wird und

$b \cdot n$ als Kovolumen.

Somit kann die van-der-Waals'sche Zustandsgleichung für reale Gase auch geschrieben werden als

$$(p + \text{Binnendruck}) \cdot (V - \text{Kovlumen}) = n \cdot R \cdot T.$$

c) Funktion Kühlschrank:



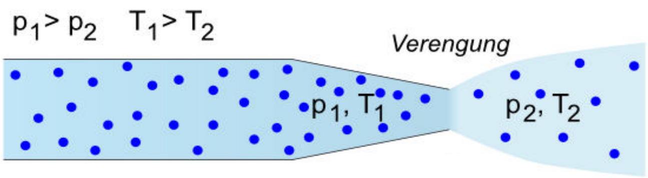
Ein gasförmiges Kältemittel wird durch einen Kompressor adiabatisch verdichtet, wodurch es sich erwärmt. Im Verflüssiger, der aus an der Außenseite angebrachte Kühlschlangen besteht, wird die Wärme an die Umgebung abgegeben, wodurch das Kältemittel kondensiert. Danach strömt es zur Druckabsenkung durch eine Drossel – z. B. ein Expansionsventil oder ein Kapillarrohr – und dann weiter in den Verdampfer im Inneren des Kühlschranks. Hier entnimmt das verdampfende Kältemittel die notwendige Verdampfungsenergie und kühlt dadurch das Innere des Kühlschranks. Es strömt als Gas wieder zum außen liegenden Kompressor.

Die Funktion eines Kühlschranks basiert auf die Nutzung **latenter Wärme** bei Verdampfung und Kondensation. Als latente Wärme bezeichnet man die bei einem Phasenübergang aufgenommene oder abgegebene thermische Energie.

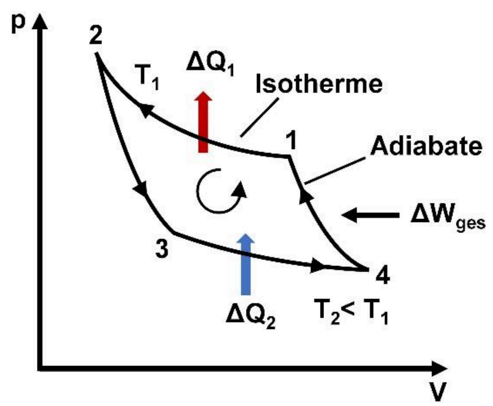
Beispiel: Phasenübergang flüssig/gasförmig beim Verdampfen von Wasser bei 100°C: Durch Zufuhr thermischer Energie erhitzt sich Wasser bis zum Siedepunkt. Bei weiterer Energiezufuhr wird das Wasser nicht heißer (isothermer Prozess), sondern verdampft unter erheblicher Volumenzunahme. Das Wasser enthält als Dampf mehr Energie als in flüssiger Form, obwohl der Dampf nicht heißer ist. Bei der Kondensation wird die Energie bei konstant bleibender Temperatur und abnehmendem Volumen wieder frei.

d) Der Joule-Thomson-Effekt realer Gase beschreibt, dass unterhalb einer sogenannten Inversionstemperatur reale Gase beim Expandieren abkühlen, weil sie Arbeit gegen die zwischenmolekularen Anziehungskräfte verrichten müssen. Die erforderliche Energie wird der Wärmebewegung der Gasmoleküle entzogen.

e) Das Linde-Verfahren nutzt den Joule-Thomson-Effekt zur Verflüssigung von Gasen (z.B. Luft). Wesentlicher Bestandteil des ursprünglichen Linde-Verfahrens ist ein Drosselventil, das den Druck des durchfließenden Mediums vermindert und damit eine Expansion bewirkt.



f) Hierbei handelt es sich um eine rückwärts laufende Carnot-Maschine. Es handelt sich um einen Prozess aus zwei Isothermen und zwei Adiabaten.



1 → 2: Isotherme Kompression bei hoher Temperatur $T = T_1 = const$

2 → 3: Adiabatische Expansion: $\Delta Q = 0$

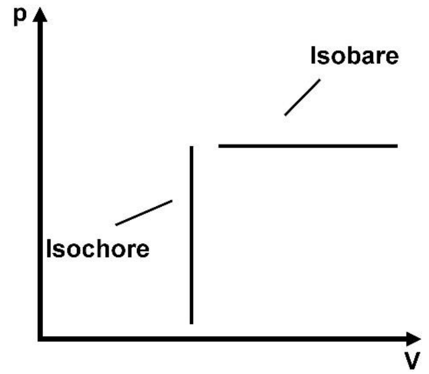
3 → 4: Isotherme Expansion bei tiefer Temperatur $T = T_2 = const$

4 → 1: Adiabatische Kompression: $\Delta Q = 0$

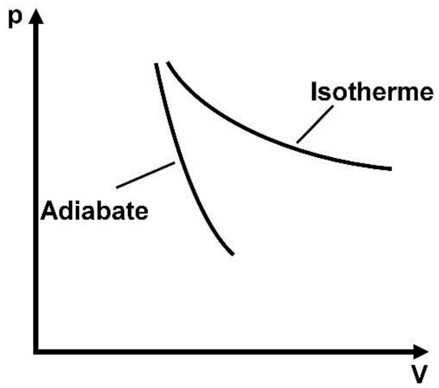
Unter Verrichtung von mechanischer Arbeit wird Wärmeenergie ΔQ dem kälteren Reservoir entzogen (Nutzen bei Kältemaschine) und in das wärmere Reservoir gepumpt.

g) $\eta_{\mathrm{KM}} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta W_{\mathrm{gesamt}}} = \frac{n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}}{n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

h)



i)



Bei einer Isothermen ist die Temperatur T konstant, und bei einer Adiabaten ist die Wärmeenergie Q konstant (kein Austausch von Wärme mit der Umgebung).

j) Adiabaten verlaufen im p-V-Diagramm steiler als Isotherme. Während bei einer isothermen Kompression / Expansion ein perfekter Wärmeaustausch vorliegt ($T = \mathrm{const}$), kommt es bei einer adiabatischen Kompression / Expansion zu einer Erwärmung / Abkühlung, wodurch sich der Druck stärker erhöht / reduziert.

Dies lässt sich auch anhand der Adiabatengleichung ableiten, für die gilt:

$p \cdot V^{\kappa} = \mathrm{const}$ mit $\kappa = \frac{c_{\mathrm{p}}}{c_{\mathrm{V}}} > 1$

Für Isothermen Prozess gilt: $p \cdot V^1 = \mathrm{const}$

Adiabaten verlaufen somit im p-V-Diagramm steiler als Isotherme, weil $\kappa > 1$.