Thermodynamik - Gase

Online-Training für die 2. Runde
der PhysikOlympiade 2027

Johann Wieczorek

06.11.2026

Unser Ablauf

- Innere Energie, Wärme und Arbeit
- Gasgesetz, absolute Temperatur und Dichte
- Energie und Geschwindigkeit der Teilchen
- Zustandsänderungen mit Kurzaufgaben: isochor, isobar, isotherm
- **Pause**
- Adiabatische Zustandsänderung
- Zusammenfassung und offene Fragerunde

Literatur zur Vorbereitung

Tipler/Mosca: Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik

Springer Spektrum, 2019.

Kap. 14.1–14.3 Gasgesetz, Druck und kinetische Gastheorie

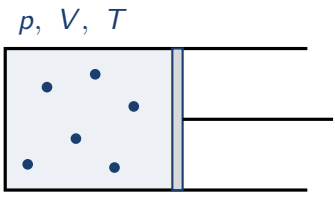
Kap. 15.4–15.9 Erster Hauptsatz, p-V-Diagramme, Wärmekapazitäten und adiabatische Prozesse

Ausführliche Herleitungen und weitere Aufgaben stehen dort. Die Kapitelangaben findet ihr unten auf den Folien.

DOI: 10.1007/978-3-662-58281-7

Aufgaben: IPhO-Auswahlwettbewerb, 2. Runde 2025 und 3. Runde 2011.

System und Zustand



Gas im Zylinder

Unser **System** ist eine bestimmte Gasmenge.

- p: Druck
- V: Volumen
- T: Temperatur
- U: innere Energie in J

Innere Energie, Wärme und Arbeit

Größe	Bezeichnung	Bedeutung
U	Innere Energie	Energie der ungeordneten Teilchenbewegung
Q	Wärme	Energieübertrag aufgrund eines Temperaturunterschieds
W	Arbeit	Energieübertrag bei Expansion oder Kompression des Gases

Wärme und Arbeit beschreiben Vorgänge. U beschreibt den Zustand.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.3–15.5

Der erste Hauptsatz

$$\boxed{\Delta U = Q + W}$$

Wärme

$Q > 0$: dem Gas zuführen
$Q < 0$: vom Gas abführen

Arbeit am Gas

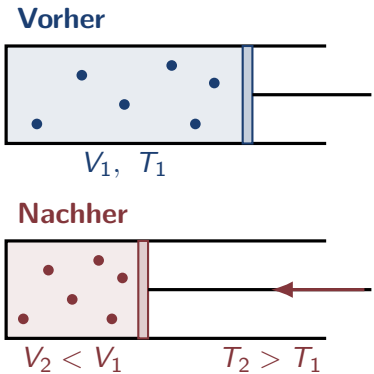
$W > 0$: Gas komprimieren
(Energie wird zugeführt)

$W < 0$: Gas expandiert
(Energie wird abgegeben)

Beispiel: $Q = 100\,\mathrm{J}$, $W = -40\,\mathrm{J}$ ergibt $\Delta U = 60\,\mathrm{J}$.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.4, Gl. 15.8, S. 588

Kompression ohne Wärmeaustausch



Wir drücken den Kolben schnell hinein.

Welches Vorzeichen hat W?
Was ist mit Q?
Wie verändert sich U?

$$W > 0$$

$$Q = 0$$

$$\boxed{\Delta U = W > 0}$$

Das ideale Gasgesetz

$$\boxed{pV = Nk_{\mathrm{B}}T}$$

N: Anzahl der Teilchen

$k_{\mathrm{B}} \approx 1{,}381 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$
Boltzmann-Konstante

p in Pa, V in m^3, T in K

Tipler/Mosca (2019), Kap. 14.1–14.2

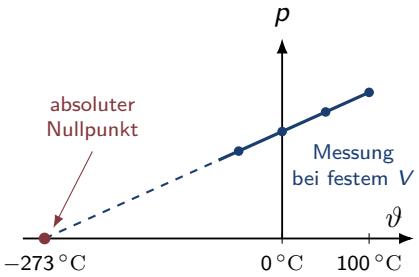
Anschaulich

Mehr Teilchen pro Volumen: mehr Stöße auf die Wand.

Höhere Temperatur: heftigere Stöße.

Modell: verdünntes Gas, die Teilchen wechselwirken nicht miteinander.

Absolute Temperatur



Bei festem V und N gilt $p \propto T$.

Der Druck verschwindet bei $-273{,}15\,^\circ\mathrm{C}$.

$$T\,[\mathrm{K}] = \vartheta\,[^\circ\mathrm{C}] + 273{,}15$$

Starrer Behälter: $20\,^\circ\mathrm{C} \to 40\,^\circ\mathrm{C}$**.**
Verdoppelt sich der Druck?

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{313{,}15\,\mathrm{K}}{293{,}15\,\mathrm{K}} \approx 1{,}068$$

Der Druck steigt nur um 6,8 %.

Teilchen in Mol zählen

Teilchenzahlen sind riesig. Man zählt deshalb in Mol: $N = nN_\mathrm{A}$.

$$pV = Nk_\mathrm{B}T = n \underbrace{N_\mathrm{A}k_\mathrm{B}}_{=R} T \qquad \Longrightarrow \qquad \boxed{pV = nRT}$$

N_A	Avogadro-Konstante	$6{,}022 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$	Teilchen pro Mol
k_B	Boltzmann-Konstante	$1{,}381 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$	pro Teilchen
R	Gaskonstante	$8{,}314\,\mathrm{J/(mol\,K)}$	pro Mol

Stoffmenge aus der Masse: $n = m/M$ (M: molare Masse, Luft $M \approx 29\,\mathrm{g/mol}$)

Tipler/Mosca (2019), Kap. 14.1

Die Dichte eines idealen Gases

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

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

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

Luft bei 1,0 bar und 20 °C:

$$\rho \approx 1{,}19\,\mathrm{kg/m^3}$$

Wird die Dichte beim Erwärmen immer kleiner?

Festes p: $\rho \propto 1/T$.

Festes V und m: $\rho = \mathrm{const}$.

Energie eines einatomigen Gases

Im idealen Gas wechselwirken die Teilchen nicht.
Innere Energie = Bewegungsenergie der Teilchen.

Regel: Jede Raumrichtung trägt pro Teilchen im Mittel $\frac{1}{2}k_\mathrm{B}T$ bei.

$$\langle E_\mathrm{kin}\rangle = \underbrace{\tfrac{1}{2}k_\mathrm{B}T}_{x} + \underbrace{\tfrac{1}{2}k_\mathrm{B}T}_{y} + \underbrace{\tfrac{1}{2}k_\mathrm{B}T}_{z} = \tfrac{3}{2}k_\mathrm{B}T$$

$$U = N \cdot \tfrac{3}{2}k_\mathrm{B}T = \boxed{\tfrac{3}{2}nRT}$$

Temperatur misst die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 14.2–14.3

Wie schnell sind die Teilchen?

Ein Teilchen der Masse m_T hat im Mittel $\frac{3}{2}k_\mathrm{B}T$:

$$\tfrac{1}{2}m_\mathrm{T}\langle v^2\rangle = \tfrac{3}{2}k_\mathrm{B}T$$

$$\boxed{v_\mathrm{rms} = \sqrt{\langle v^2\rangle} = \sqrt{\frac{3k_\mathrm{B}T}{m_\mathrm{T}}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}}$$

Mit $m_\mathrm{T} = M/N_\mathrm{A}$ und $R = N_\mathrm{A}k_\mathrm{B}$.

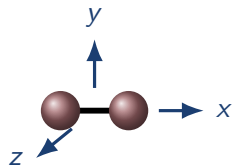
Stickstoff, $300\,\mathrm{K}$ $\quad M = 28\,\mathrm{g/mol}$ $\quad v_\mathrm{rms} \approx 520\,\mathrm{m/s}$

Helium, $300\,\mathrm{K}$ $\quad M = 4\,\mathrm{g/mol}$ $\quad v_\mathrm{rms} \approx 1370\,\mathrm{m/s}$

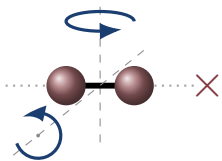
Zum Vergleich: Schall in Luft etwa $340\,\mathrm{m/s}$.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 14.2

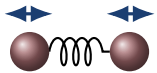
Moleküle: Translation, Rotation, Schwingung



Translation: 3



Rotation: 2



Schwingung (falls sehr heiß)

Gas	f
einatomig (He, Ar)	3
zweiatomig (Raumtemperatur)	$5 = 3 + 2$
zweiatomig (sehr heiß)	5 + Schwingung

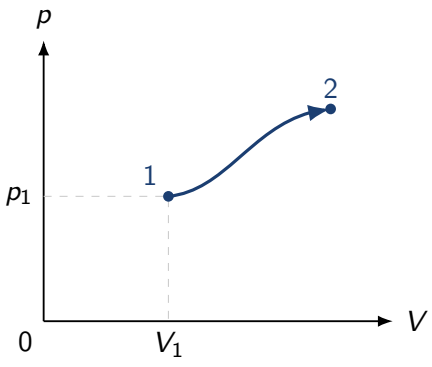
Luft besteht fast nur aus O_2 und N_2, ist also zweiatomig.

f: Anzahl der Freiheitsgrade

$$\boxed{U = \frac{f}{2} nRT}$$

Für v_{rms} zählt trotzdem nur die Translation.

Das p-V-Diagramm



Ein Punkt: ein Gleichgewichtszustand.

Bei festem n bestimmt pV die Temperatur:

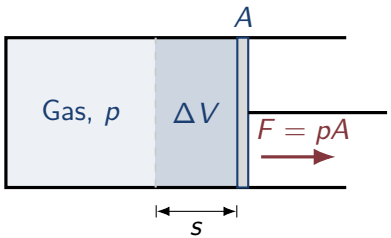
$$T = \frac{pV}{nR}.$$

Ein Weg: die Abfolge der Zustände während eines Prozesses.

Reversibel: ideal umkehrbar, ohne bleibende Änderungen an System und Umgebung.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.6

Volumenarbeit am Kolben



Das Gas drückt mit $F = pA$ auf den Kolben (Fläche A).

Bei konstantem p und Weg s:

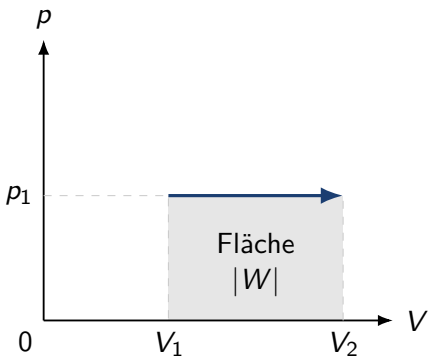
$$|W| = Fs = pAs = p\,|\Delta V|$$

Mit Vorzeichen (Arbeit am Gas):

$$\boxed{W = -p\,\Delta V}$$

Expansion: $\Delta V > 0,\ W < 0$.
Kompression: $\Delta V < 0,\ W > 0$.

Volumenarbeit als Fläche



Konstanter Druck: $|W| = p\,|\Delta V|$ ist die Rechteckfläche.

Ändert sich p unterwegs, gilt allgemein:

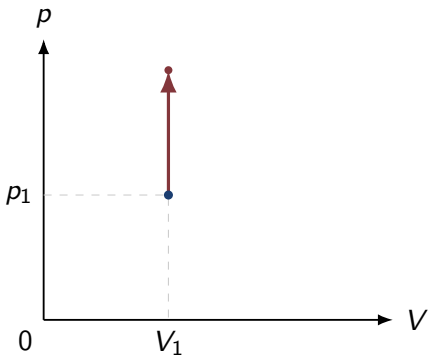
$|W|$ = Fläche unter der Kurve

Schreibweise dafür:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V$$

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.6

Isochor: konstantes Volumen



Starrer Behälter: $V = \text{const.}$

$$p\,V = nR\,T \quad \Rightarrow \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Rot: konstant, wie in allen folgenden Prozessen.

Keine Volumenänderung: $W = 0$.

$$\boxed{Q = \Delta U = \frac{f}{2} nR\,\Delta T}$$

Die gesamte Wärme erhöht die innere Energie.

Kurzaufgabe: Autoreifen

Ein Autoreifen ($V = 25\,\mathrm{L}$) enthält Luft ($f = 5$) bei $p_1 = 3{,}2\,\mathrm{bar}$ (absolut) und $20\,^\circ\mathrm{C}$. Nach einer Fahrt hat die Luft $50\,^\circ\mathrm{C}$. Der Reifen ist starr.

a) Welcher Druck herrscht jetzt?
b) Wie viel Wärme wurde der Luft zugeführt?

$$\text{a)} \quad p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 3{,}2\,\mathrm{bar} \cdot \frac{323{,}15\,\mathrm{K}}{293{,}15\,\mathrm{K}} \approx 3{,}53\,\mathrm{bar}$$

$$\text{b)} \quad Q = \frac{5}{2} nR\,\Delta T, \quad nR = \frac{p_1 V}{T_1} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{5}{2} p_1 V \frac{\Delta T}{T_1} \approx 2{,}0\,\mathrm{kJ}$$

Kurz: $Q = \dfrac{f}{2} V \Delta p$. Die Stoffmenge n braucht man gar nicht.

Wärmekapazität

Wie viel Energie braucht man pro Kelvin Erwärmung?

$$Q = C\,\Delta T \qquad C: \text{ Wärmekapazität in } \mathrm{J/K}$$

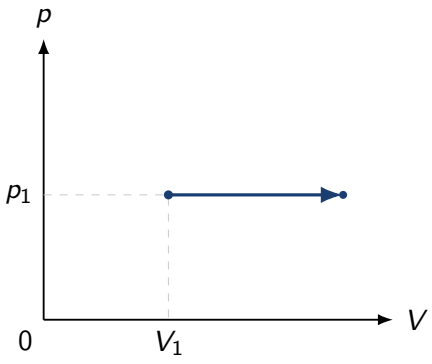
Pro Mol und bei konstantem Volumen: $Q = nC_V\Delta T$ mit

$$\boxed{C_V = \frac{f}{2}R} \qquad \text{Luft: } C_V \approx 20{,}8\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}}$$

Vergleich: Die etwa $95\,\mathrm{g}$ Luft im Reifen brauchen für $30\,\mathrm{K}$ so viel Wärme wie etwa $16\,\mathrm{g}$ Wasser.

Warum „bei konstantem Volumen“? Das zeigt der isobare Prozess.

Isobar: konstanter Druck



Beweglicher Kolben mit konstanter Last.

$$p\,V = nR\,T \quad \Rightarrow \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$W = -p\Delta V = -nR\Delta T$$

$$Q = \Delta U - W = \left(\frac{f}{2} + 1\right) nR\,\Delta T$$

$$\boxed{C_p = C_V + R}$$

Mehr Wärme nötig: Das Gas schiebt die Umgebung weg.

Kurzaufgabe: Luftballon in der Sonne

Ein schwarzer Luftballon ($V_1 = 10\,\mathrm{L}$, $20\,^\circ\mathrm{C}$) erwärmt sich in der Sonne auf $50\,^\circ\mathrm{C}$. Die Gummispannung ist vernachlässigbar, also $p = p_0 = 1{,}0\,\mathrm{bar}$. Luft: $f = 5$.

a) Welches Volumen hat der Ballon am Ende?
b) Wie viel Wärme hat die Luft aufgenommen?

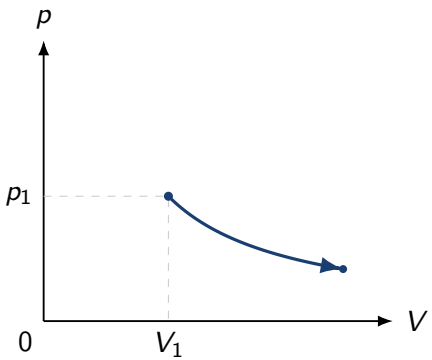
$$\text{a)} \quad V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 10\,\mathrm{L} \cdot \frac{323{,}15\,\mathrm{K}}{293{,}15\,\mathrm{K}} \approx 11{,}0\,\mathrm{L}$$

$$\text{b)} \quad Q = \frac{7}{2} nR\,\Delta T = \frac{7}{2} p_0\,\Delta V \approx 360\,\mathrm{J}$$

Davon $\Delta U \approx 260\,\mathrm{J}$ und $|W| \approx 100\,\mathrm{J}$ an die Atmosphäre.

Isochor: $Q = \frac{f}{2}\, V \Delta p$. Isobar: $Q = \frac{f+2}{2}\, p \Delta V$.

Isotherm: konstante Temperatur



Guter Wärmekontakt mit einer Umgebung bei konstantem T.

$$pV = nRT \quad \Rightarrow \quad p_1 V_1 = p_2 V_2$$

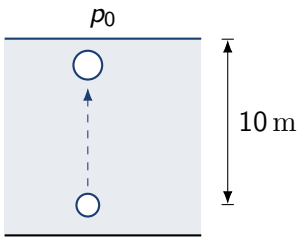
$$\Delta U = 0$$

$$W = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1}, \qquad Q = -W$$

Bei Expansion muss Wärme nachfließen, damit T konstant bleibt.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.6

Kurzaufgabe: Luftblase im See



Eine Luftblase (Volumen V_1) steigt in einem See aus 10 m Tiefe auf. Das Wasser hat überall 4 °C.

Info: Druck in der Tiefe h: $p(h) = p_0 + \rho g h$, mit $p_0 = 1{,}0\,\mathrm{bar}$, $\rho = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$, $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$.

a) Welches Volumen hat die Blase kurz vor der Oberfläche?

b) Fließt dabei Wärme in die Blase hinein oder heraus?

a) $p_1 \approx 1{,}98\,\mathrm{bar}$, also $V_2 = V_1\, p_1/p_0 \approx 2V_1$. Die 4 °C braucht man gar nicht.

b) Expansion: $W < 0$. Mit $\Delta U = 0$ folgt $Q = -W > 0$. **Das Wasser liefert Wärme.**

Fünf Minuten Pause

5 Minuten

Danach: Kurzaufgabe isobar/isotherm, adiabatische Prozesse

$pV = nRT$ $\Delta U = Q + W$ $U = \frac{f}{2}nRT$ $W = -p\Delta V$

Kurzaufgabe: Isobar oder isotherm?

Dieselbe Menge eines idealen Gases expandiert vom **gleichen Anfangszustand** auf das doppelte Volumen.

Gibt das Gas bei isobarer oder bei isothermer Expansion mehr Arbeit an die Umgebung ab?

A Mehr bei isobarer Expansion.

B Mehr bei isothermer Expansion.

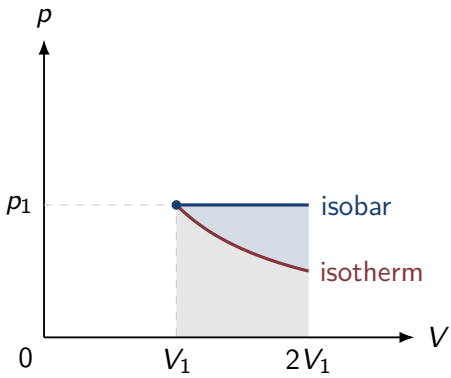
C In beiden Fällen gleich viel.

D Mit den Angaben nicht entscheidbar.

2 Minuten: Antwort wählen und begründen.

PhysikOlympiade, 2. Runde 2025, MC-Aufgabe 43. Formulierung leicht angepasst.

Isobar oder isotherm: Vergleich der Flächen



Antwort A

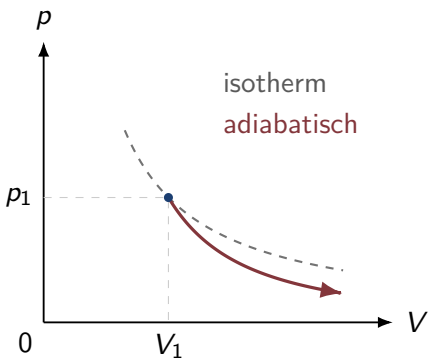
Die blaue Zusatzfläche zeigt die größere abgegebene Arbeit.

$$|W_{\text{isobar}}| = p_1 V_1$$

$$|W_{\text{isotherm}}| = p_1 V_1 \ln 2$$

Da $\ln 2 < 1$, ist die isobare Fläche größer.

Adiabatisch: kein Wärmeaustausch



Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.9

Thermische Isolation oder sehr schneller Vorgang: $Q = 0$.

$$\boxed{\Delta U = W}$$

Expansion: $W < 0$, die Temperatur sinkt.

Kompression: $W > 0$, die Temperatur steigt.

Genau wie bei der Pumpenfrage vom Anfang.

Die Poisson-Gleichungen

Ideales Gas, feste Gasmenge, reversible adiabatische Änderung.

Adiabatenexponent

$$\boxed{\kappa = \frac{C_p}{C_V} = \frac{f+2}{f}}$$

einatomig ($f = 3$): $\kappa = 5/3$

Luft ($f = 5$): $\kappa = 7/5 = 1{,}4$

Drei gleichwertige Formen

$$pV^\kappa = \text{const.}$$

$$TV^{\kappa-1} = \text{const.}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Die Form wählen, in der die gegebenen Größen vorkommen.

Tipler/Mosca (2019), Kap. 15.9, Gl. 15.30–15.32

Kurzaufgabe: Fahrradpumpe

Beim Pumpen wird die Luft im Pumpenzylinder ($p_1 = 1{,}0\,\mathrm{bar}$, $20\,^\circ\mathrm{C}$) schnell auf $p_2 = 3{,}5\,\mathrm{bar}$ (absolut) komprimiert, bevor das Ventil zum Schlauch öffnet. Luft: $\kappa = 1{,}4$.

Welche Temperatur hätte die Luft ohne Wärmeaustausch?

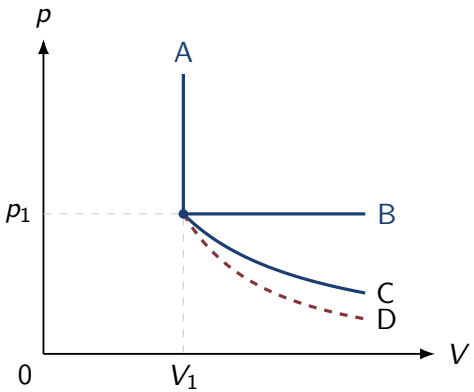
Gegeben sind p und T:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} = 293{,}15\,\mathrm{K} \cdot 3{,}5^{2/7} \approx 419\,\mathrm{K} \approx \boxed{146\,^\circ\mathrm{C}}$$

Warum verbrennt man sich trotzdem nicht?

Die Wände nehmen Wärme auf, der Vorgang ist nicht ganz adiabatisch. Das untere Ende der Pumpe wird aber spürbar warm.

Vier Prozesse im Diagramm



Welche Kurve gehört zu welchem Prozess?

A isochor

B isobar

C isotherm

D adiabatisch

Die Adiabate verläuft am gleichen Zustand steiler als die Isotherme.

Die vier Prozesse im Überblick

Prozess	**konstant**	W	Q	ΔU
isochor	V	0	$\frac{f}{2}nR\Delta T$	$\frac{f}{2}nR\Delta T$
isobar	p	$-p\Delta V$	$\frac{f+2}{2}nR\Delta T$	$\frac{f}{2}nR\Delta T$
isotherm	T	$-nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$	$-W$	0
adiabatisch	–	ΔU	0	$\frac{f}{2}nR\Delta T$

Immer gilt: $\Delta U = Q + W$ und $\Delta U = \frac{f}{2}nR\Delta T$.

Thermodynamik = Shut up and calculate!

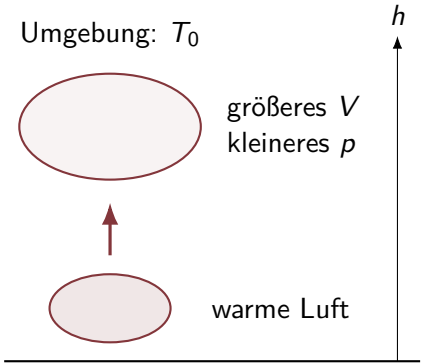
Die Prozessnamen klingen kompliziert. Man braucht aber nicht viele Formeln:

Gasgleichung	Erster Hauptsatz	Innere Energie	Adiabatengleichung
$pV = nRT$	$\Delta U = Q + W$	$U = \frac{f}{2} nRT$	$pV^\kappa = \text{const.}$

Dazu die Prozessbedingung: Was bleibt konstant? Dann einsetzen und konsequent umstellen.

Bonusaufgabe → Bonus überspringen →

Bonus: Aufsteigende Luftmassen



Ein warmes Luftpaket ist zunächst weniger dicht als die Umgebung.

Beim Aufsteigen nimmt der Außendruck ab.

Das Paket expandiert und kühlt ab.

Druck in einer isothermen Atmosphäre

Konstante Umgebungstemperatur T_0, konstantes g, ideales Gas:

$$\boxed{p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT_0}\right)}$$

Mit der Skalenhöhe $H = RT_0/(Mg)$ gilt kürzer:

$$p(h) = p_0 e^{-h/H}.$$

Die Druckformel ist ein sinnvoller Eintrag auf dem eigenen Formelzettel.

Bonusaufgabe: Wie hoch steigt die Luft?

Trockene Luft erwärmt sich am Boden auf T_1 und steigt auf. Die Umgebung hat überall dieselbe Temperatur T_0.

Bei welcher Höhe ist das Luftpaket nicht mehr leichter als seine Umgebung?

p_0	$1{,}0 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa}$
M	$29{,}0\,\mathrm{g/mol}$
κ	$1{,}4$
T_0	$10\,^\circ\mathrm{C}$
T_1	$25\,^\circ\mathrm{C}$

Gegeben für die Umgebung:

$$p(h) = p_0 e^{-Mgh/(RT_0)}$$

$g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$

$R = 8{,}314\,\mathrm{J/(mol\,K)}$

Tipp: Wann ist Luft bei gleichem Druck leichter als ihre Umgebung?

PhysikOlympiade, 3. Runde 2011, Aufgabe 84a. Modellfrage leicht präzisiert.

Leichter heißt wärmer

Das Luftpaket hat denselben Druck $p(h)$ wie seine Umgebung.

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{pM}{RT}$$

Gleiches p, gleiches M:

$$\boxed{\rho_\mathrm{L} < \rho_\mathrm{U} \iff T_\mathrm{L} > T_0}$$

Kräfte auf das Paket

$$F_\mathrm{A} = \rho_\mathrm{U} V g, \qquad F_\mathrm{G} = \rho_\mathrm{L} V g$$

Das Paket steigt, solange es wärmer ist als seine Umgebung.

Temperatur des Pakets und Höhe

Verwendete Formeln

Poisson (adiabatisch):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Umgebungsdruck:

$$p(h) = p_0 e^{-h/H}, \quad H = \frac{RT_0}{Mg}$$

$$T_\mathrm{L}(h) = T_1 \left(\frac{p(h)}{p_0}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} = T_1 \exp\left(-\frac{\kappa-1}{\kappa}\,\frac{h}{H}\right)$$

$$T_\mathrm{L}(h) = T_0: \qquad \ln\frac{T_1}{T_0} = \frac{\kappa-1}{\kappa}\,\frac{h}{H}$$

$$\boxed{h = \frac{RT_0}{Mg}\,\frac{\kappa}{\kappa-1}\,\ln\frac{T_1}{T_0}}$$

Ergebnis und Plausibilität

$$T_0 = 283{,}15\,\mathrm{K}, \quad T_1 = 298{,}15\,\mathrm{K}, \quad M = 0{,}0290\,\mathrm{kg/mol}$$

$$h = \underbrace{\frac{8{,}314 \cdot 283{,}15}{0{,}0290 \cdot 9{,}81}}_{H \approx 8275\,\mathrm{m}} \cdot \frac{1{,}4}{0{,}4} \cdot \ln \frac{298{,}15}{283{,}15}$$

$$\boxed{h \approx 1{,}5\,\mathrm{km}}$$

Dort ist das Paket auf T_0 abgekühlt.

Was ergibt die Formel für $T_1 = T_0$?

$\ln 1 = 0$, also $h = 0$.

Dein Feedback

Danke fürs Mitmachen!

Wie war der Vortrag für dich?

Drei kurze Fragen, etwa 30 Sekunden.

Scanne den QR-Code zur Feedback-Umfrage.



Offene Fragerunde

Welche Fragen habt ihr noch?

Grundlagen, Prozesse oder Kurzaufgaben

Was ist noch unklar? Was möchtet ihr vertiefen?

Formeln zum Nachschlagen

Thermodynamik = Shut up and calculate!

Gas, Teilchen und Energie

$pV = Nk_\mathrm{B}T = nRT$

$N = nN_\mathrm{A}, \quad R = N_\mathrm{A}k_\mathrm{B}, \quad n = m/M$

$\rho = pM/(RT), \quad v_\mathrm{rms} = \sqrt{3RT/M}$

$\Delta U = Q + W, \quad U = \frac{f}{2}nRT$

$C_V = \frac{f}{2}R, \quad C_p = C_V + R$

$\kappa = C_p/C_V = (f+2)/f$

$W = -\int p\,\mathrm{d}V$

Standardprozesse, festes n

V konst.: $W = 0$, $Q = nC_V\Delta T$

p konst.: $W = -p\Delta V$, $Q = nC_p\Delta T$

T konst.: $W = -nRT\ln(V_2/V_1)$, $Q = -W$

$Q = 0$: $pV^\kappa = \mathrm{const.}$

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Druck in Flüssigkeit und Atmosphäre

Tiefe h: $p = p_0 + \rho gh$

Höhe h, T_0 konst.: $p = p_0 e^{-Mgh/(RT_0)}$

f: Freiheitsgrade, einatomig 3, Luft 5. C_V, C_p pro Mol. Konstante Wärmekapazitäten, Prozessbedingungen wie im Vortrag.