

Termodinamika I.

Farzan Ruszlán
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

2006. szeptember 29.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Bevezetés



Bevezetés

- **Bevezetés**

- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Bevezetés

Egy termodinamikai rendszer állapotát termodinamikai változók jellemezik.

Extenzív változók: a rendszer anyagmennyiségének változásával arányosan változnak, pl. V , m , n .

Intenzív mennyiségek: az anyagmennyiségtől függetlenek; pl. T , p .



Bevezetés

● Bevezetés

- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Bevezetés

Egy termodinamikai rendszer állapotát termodinamikai változók jellemezik.

Extenzív változók: a rendszer anyagmennyiségének változásával arányosan változnak, pl. V , m , n .

Intenzív mennyiségek: az anyagmennyiségtől függetlenek; pl. T , p .

Állapotegyenlet:

$$f(p, V, T, n) = 0. \quad (1)$$



Bevezetés

- Bevezetés
- **Hőmérséklet**
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Hőmérséklet

Mindennapi életünkben a hőmérséklet mérésére a **Celsius-féle skálát** használjuk, ahol 0°C felel meg az olvadó jég hőmérsékletének, 100°C pedig normális légnyomás mellett a forró víz gőzének.



Bevezetés

- Bevezetés
- **Hőmérséklet**
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Hőmérséklet

Mindennapi életünkben a hőmérséklet mérésére a **Celsius-féle skálát** használjuk, ahol 0°C felel meg az olvadó jég hőmérsékletének, 100°C pedig normális légnyomás mellett a forró víz gőzének.

A tudományban a **Kelvin-féle (abszolút) skálát** használják.

A Kelvin-féle hőmérsékleti értéket a Celsius-féle értékből úgy kapjuk meg, hogy a Celsius-féle értékhez hozzáadunk 273,15 fokot:

$$T_K = T_C + 273,15.$$

Vagyis, 0°C megfelel 273,15 K -nek. Tehát a Celsius és a Kelvin skála fokbeosztása azonos, csak a nullapontjuk különbözik.

A továbbiakban a Kelvin-féle hőmérsékletet T betűvel, index nélkül jelöljük.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- **Hőkapacitás**
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Hőkapacitás

A hőkapacitás. Ha a hőmennyiséget Q -val jelöljük, akkor a C hőkapacitás

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (2)$$

Tehát C számértékileg az a hőmennyiség, amelyre a hőmérséklet 1 fokkal való növekedéséhez szükség van. A hőkapacitás mértékegysége J/K.

A C hőkapacitás függ a test, vagy a rendszer nagyságától. Ezért C helyett gyakran használják a fajhőt vagy mólhőt.

Fajhő c : az 1 kg tömegű mennyiségre vonatkozó hőkapacitás. Így, $C = m \cdot c$.

Mólhő c' : az 1 mol mennyiségre vonatkozó hőkapacitás.

Megkülönböztetünk állandó nyomás mellett vett c_p , és állandó térfogaton vett c_V fajhőt.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- **Termodinamika I. főtétele**
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Termodinamika I. főtétele

A belső energia a testet (rendszert) alkotó részecskék - atomok, molekulák - rendezetlen mozgásának, u.n. hőmozgásának energiája.

A termodinamikában **az I. főtétel** tartalmazza **az energiamegmaradás törvényét**:

A belső energia változása ΔE megegyezik a rendszernek (testnek) átadott hőmennyiség Q és a testen a külső erők (a környezet) által végzett munka W_k összegével:

$$\Delta E = Q + W_k. \quad (3)$$

Itt Q lehet mind pozitív, mind negatív. Az utóbbi pd. ha a hő a rendszerből áramlik a környezetbe.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

W_k is lehet mind pozitív, mind negatív. Ha W_k a külső erők (a környezet) által végzett munka, és W_b a rendszer által végzett munka, akkor

$$W_k = -W_b. \quad (4)$$



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- **Termodinamika I. főtétele**
- Állapotfüggvény

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

W_k is lehet mind pozitív, mind negatív. Ha W_k a külső erők (a környezet) által végzett munka, és W_b a rendszer által végzett munka, akkor

$$W_k = -W_b. \quad (4)$$

Az I. főtételből következik az, hogy *nem létezik elsőfajú „perpetuum mobile”* (örökmozgó), vagyis olyan gép, ami „semmiből” termelne energiát vagy munkát.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- **Állapotfüggvény**

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Állapotfüggvény

Elemi munka δW_b , amelyet a rendszer p nyomás esetén a térfogat dV elemi változásakor végez:

$$\delta W_b = pdV. \quad (5)$$

Ha a belső erők munkájának eredménye a térfogat növekedése ($\Delta V > 0$), akkor ez az elemi munka pozitív.

Az elemi munka nem teljes differenciál, és függ attól, hogy milyen módon ment át a rendszer az egyik állapotból a másikba.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- **Állapotfüggvény**

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

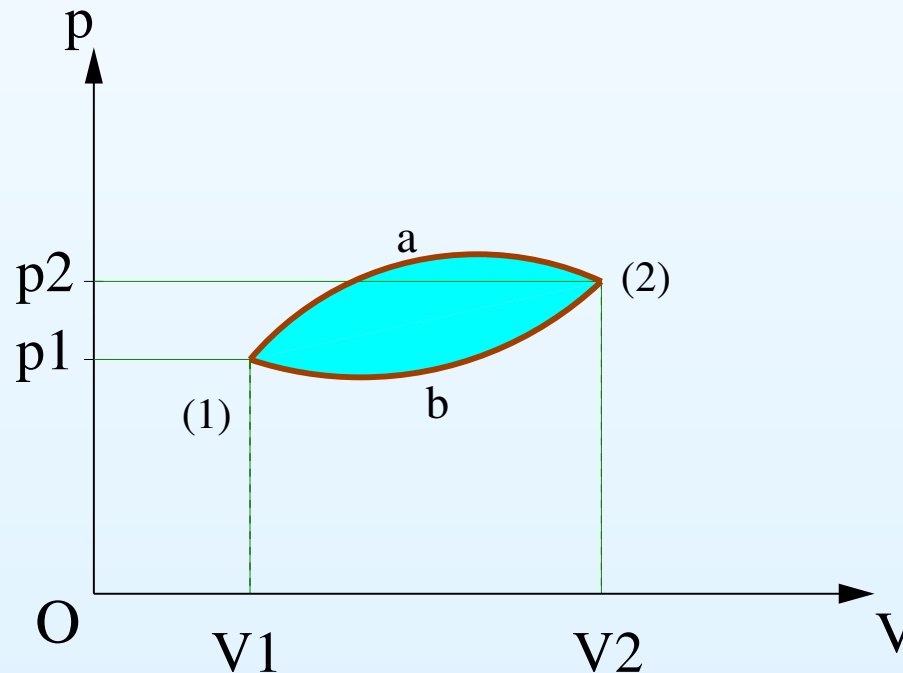
Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

A nyomás $V_1 \rightarrow V_2$ folyamán végzett munkája, a belső erők munkája a következő integrállal fejezhető ki:

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (6)$$





Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- **Állapotfüggvény**

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az a és b görbék két különböző $p = p(V)$ függvényt ábrázolnak. A végzett munkának a görbe alatti terület felel meg. Ez a terület függ attól, hogy milyen módon, a vagy b görbén jutott át a rendszer az (1) állapotból a (2) állapotba.



Bevezetés

- Bevezetés
- Hőmérséklet
- Hőkapacitás
- Termodinamika I. főtétele
- **Állapotfüggvény**

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az a és b görbék két különböző $p = p(V)$ függvényt ábrázolnak. A végzett munkának a görbe alatti terület felel meg. Ez a terület függ attól, hogy milyen módon, a vagy b görbén jutott át a rendszer az (1) állapotból a (2) állapotba.

A belső energia az állapotot jellemzi, és ilyen értelemben állapothatározóinak egyértékű függvénye. $E_2 - E_1$ nem függ attól, hogy a rendszer milyen módon került az (1) állapotból a (2) állapotba.

Az olyan függvényt, amely az adott állapotot jellemezi, **állapotfüggvénynek** nevezzük. A belső energia az egyik állapotfüggvény.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az ideális gázok termodinamikája



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete

- Maxwell-féle eloszlási függvény

- Az ekvipartíció tétele

- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az ideális gázok állapotegyenlete

Az ideális gázok állapotegyenlete:

$$pV = nRT, \quad (7)$$

ahol n - a mólszámmal mért gázmennyiség, $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ - az univerzális gázállandó.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete

- Maxwell-féle eloszlási függvény

- Az ekvipartíció tétele

- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Kőrfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az ideális gázok állapotegyenlete

Az ideális gázok állapotegyenlete:

$$pV = nRT, \quad (7)$$

ahol n - a mólszámmal mért gázmennyiség, $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ - az univerzális gázállandó.

Ha a gáz mennyiségét a részecskék számával N mérjük, akkor

$$pV = NkT, \quad k = R/N_0 = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}, \quad (8)$$

ahol k a Boltzmann-állandó.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- **Maxwell-féle eloszlási függvény**
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Maxwell-féle eloszlási függvény

Az állapothatározók p, V, T az u.n. **makro- (vagy fenomenológiai) paraméterek**. A **mikroparaméterek** a részecskék átlagos sebessége, ütközési gyakorisága, a két ütközés között eltelt átlagos idő és távolság.

Egy részecske sebességét nem lehet megfigyelni, megállapítani. Ezért használják pl. az átlagos sebességet, stb.

A molekulák (atomok) sebesség szerinti eloszlása Maxwell-féle statisztikának felel meg.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Maxwell-féle statisztika kifejezése:

Azon molekulák (atomok) száma, amelyeknek sebesség-komponensei v_x és $v_x + dv_x$, v_y és $v_y + dv_y$, v_z és $v_z + dv_z$ között vannak:

$$dN = N \cdot A \cdot e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}} dv_x dv_y dv_z = N \cdot f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z, \quad (9)$$

ahol N - az összes részecské száma, m a részecske (molekula, atom) tömege. Itt $f(v_x, v_y, v_z)$ az eloszlási függvény, és

$$A = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2}. \quad (10)$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

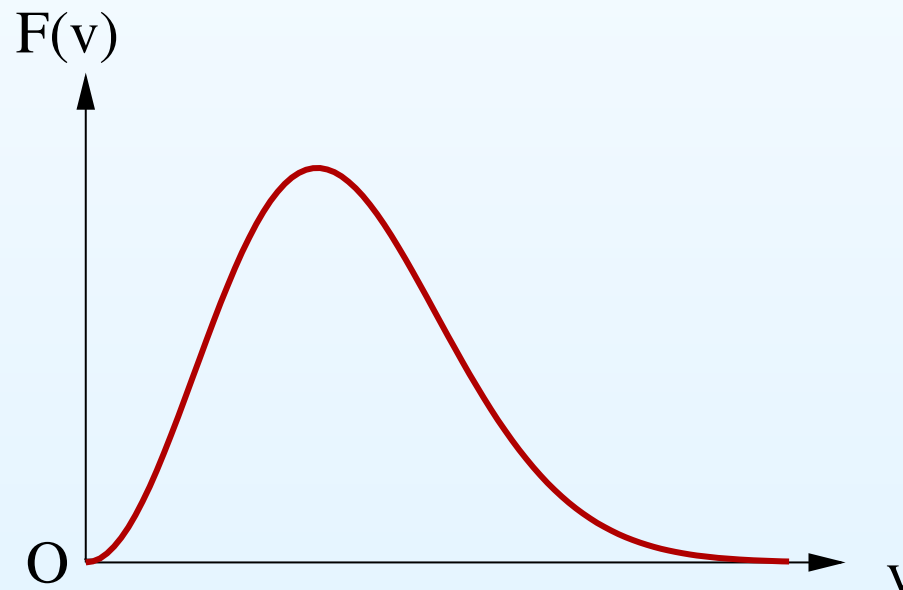
Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Gyakran szükségünk van a molekulák sebesség-abszolút értéke $v = |\underline{v}|$ szerinti eloszlására: hány részecskénél esik a sebesség abszolút értéke a v és $v + dv$ közötti intervallumba. Ez a szám

$$dN = N \cdot 4\pi A e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv = N \cdot 4\pi f(v) \cdot v^2 dv = N \cdot F(v) dv. \quad (11)$$





Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

A (9). képlet lehetőséget ad a molekulák átlagos sebességének kiszámítására, így $\overline{v_x^2}$ -ra:

$$\overline{v_x^2} = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} f(v_x, v_y, v_z) v_x^2 dv_x dv_y dv_z = \frac{kT}{m}.$$

Ebből következik, hogy

$$\frac{m\overline{v_x^2}}{2} = \frac{1}{2}kT. \quad \text{és} \quad \frac{m\overline{v_y^2}}{2} = \frac{m\overline{v_z^2}}{2} = \frac{1}{2}kT.$$

Így egy részecske átlagos transzlációs energiája:

$$\overline{E_1} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT. \quad (12)$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az N részecskéből álló gázmennyiség translációs energiája

$$E = N \frac{m}{2} \overline{v^2} = \frac{3}{2} N k T. \quad (13)$$

Ebből megkapható az átlagos kvadratikus sebesség:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{3kT/m}.$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- **Az ekvipartíció tétele**
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az ekvipartíció tétele

A haladó (transzlációs) mozgás energiája:

$$E_{tr} = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{mv_y^2}{2} + \frac{mv_z^2}{2}. \quad (14)$$

Forgási energia

$$E_r = \frac{1}{2}\theta_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}\theta_2\omega_2^2 + \frac{1}{2}\theta_3\omega_3^2, \quad (15)$$

ahol θ_j ($j = 1,2,3$) a három fő tengelyre vonatkozó tehetetlenségi nyomaték, ω_j pedig a szögsebességvektor három komponense.

A gáz részecskéinek átlagos energiája

$$\overline{E}_1 = \frac{m\overline{v_x^2}}{2} + \frac{m\overline{v_y^2}}{2} + \frac{m\overline{v_z^2}}{2} + \frac{\theta_1\overline{\omega^2_1}}{2} + \frac{\theta_2\overline{\omega^2_2}}{2} + \frac{\theta_3\overline{\omega^2_3}}{2}. \quad (16)$$

Így egy molekulának 6 szabadsági fok van.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- **Az ekvipartíció tétele**
- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Ha f a szabadsági fokok száma, akkor

$$\bar{E}_1 = f \frac{kT}{2}. \quad (17)$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény

• Az ekvipartíció tétele

- Az ideális gázok hőkapacitása

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Ha f a szabadsági fokok száma, akkor

$$\bar{E}_1 = f \frac{kT}{2}. \quad (17)$$

Az ekvipartíció tétele: az egy szabadsági foknak megfelelő átlagos energia egyenlő $kT/2$ -vel.

Az N részecskéből álló gázmennyiség energiája

$$E = N \frac{f}{2} kT = \frac{f}{2} nRT, \quad (18)$$

ahol n – a mólban megadott gázmennyiség (mólszám).

Ha a gáz kétatomos molekulákból áll, a részecske szabadsági fokszáma 5, mivel a forgás két tengely körül zajlik.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- **Az ideális gázok hőkapacitása**

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az ideális gázok hőkapacitása

Állandó térfogat esetén az elemi belső munka (ld. (5).)

$$\delta W_b = p dV = 0, \text{ és}$$

$$C_V = \frac{dQ}{dT} = \frac{dE}{dT}. \quad (19)$$

Az ideális gázban $E = (f/2)NkT = (f/2)nRT$, így

$$C_V = (f/2)nR,$$

és az állandó térfogaton vett mólhő ($n = 1$):

$$c'_V = \frac{f}{2} R. \quad (20)$$

A belső energia változása:

$$dE = c'_V dT, \quad E - E_0 = c'_V (T - T_0). \quad (21)$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

- Az ideális gázok állapotegyenlete
- Maxwell-féle eloszlási függvény
- Az ekvipartíció tétele
- **Az ideális gázok hőkapacitása**

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Az állandó nyomás mellett a munka $W_b = p(V_2 - V_1)$, és a differenciálás után **az állandó nyomás mellett vett mólhő**:

$$c'_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dE}{dT} + \frac{d(RT)}{dT} = \frac{f}{2}R + R = \frac{f+2}{2}R. \quad (22)$$

Így $c'_p = c'_V + R$.

A két mólhő (és, általában, a hőkapacitás) aránya az ideális gázok esetén

$$\kappa = \frac{c'_p}{c'_V} = \frac{f+2}{f}. \quad (23)$$

A levegő esetén $\kappa = 7/5 = 1,4$.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

- Hőtagulás
- Szilárdtestek
hőkapacitása

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

• **Hőtágulás**

• Szilárdtestek
hőkapacitása

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Hőtágulás

A szilárdtestek térfogata a hőmérséklettel növekszik, de sokkal kisebb mértékben, mint gáz. Ez a **hőtágulás**.

Legyen a test hosszúsága T_0 hőmérsékleten l_0 , T_1 hőmérsékleten l_1 , az α **lineáris hőtágulási együttható**. A hosszváltozása

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \Delta T, \quad \text{ahol} \quad \Delta l = l_1 - l_0, \quad \Delta T = T_1 - T_0. \quad (24)$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

• **Hőtágulás**

• Szilárdtestek
hőkapacitása

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Hőtágulás

A szilárdtestek térfogata a hőmérséklettel növekszik, de sokal kisebb mértékben, mint gáz. Ez a **hőtágulás**.

Legyen a test hosszúsága T_0 hőmérsékleten l_0 , T_1 hőmérsékleten l_1 , az α **lineáris hőtágulási együttható**. A hosszváltozása

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \Delta T, \quad \text{ahol} \quad \Delta l = l_1 - l_0, \quad \Delta T = T_1 - T_0. \quad (24)$$

A térfogat változása:

$$\Delta V = V_0 \cdot \beta \Delta T, \quad \Delta V = V_1 - V_0, \quad \beta = 3\alpha, \quad (25)$$

ahol β -t **térfogati hőtágulási együtthatónak** nevezik.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

- Hőtagulás
- Szilárdtestek
hőkapacitása

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

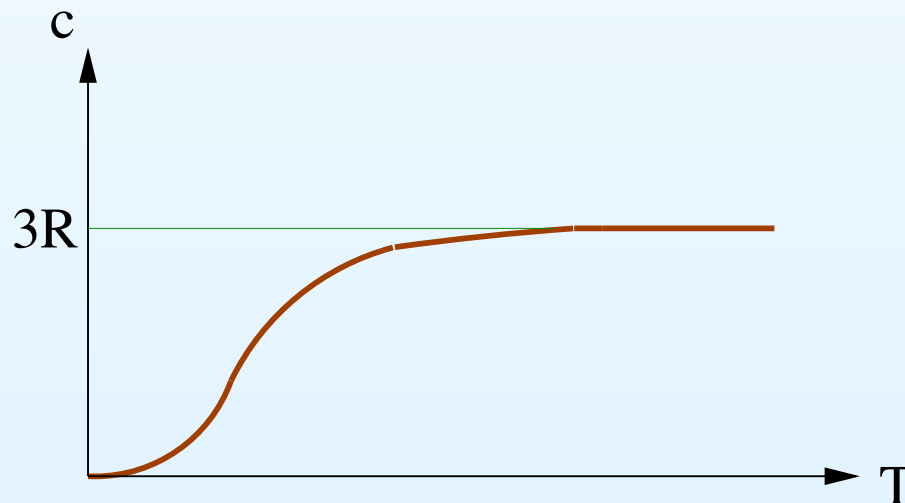
Valódi gázok
termodinamikája

Szilárdtestek hőkapacitása

A szilárdtestek atomjai állandó rezgőmozgásban vannak az egyensúlyi pont körül. Ez a rezgőmozgás háromdimenziós. A test összes energiája

$$E_v = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{mv_y^2}{2} + \frac{mv_z^2}{2} + \frac{Dx^2}{2} + \frac{Dy^2}{2} + \frac{Dz^2}{2}.$$

A szilárd testek atomjainál a szabadsági fokok száma $f = 6$. A mólhő $c' = f/2R = 3R$. Ez a **Dulong-Petit-szabály**.





Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

- Fő termodinamikai folyamatok
- Körfolyamatok, hatásfok
- Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Körfolyamat



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai
folyamatok

● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

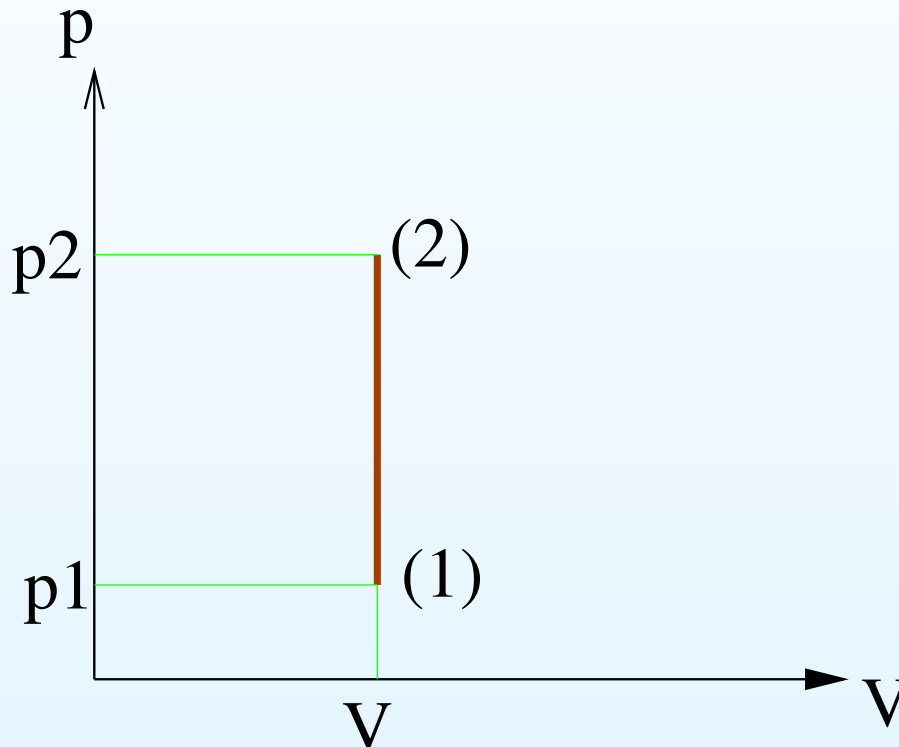
A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Fő termodinamikai folyamatok

Néhány tipikus termodinamikai folyamat, amely gyakran szerepel a körfolyamatokban.

1. **Izochor állapotváltozás, $V = const.$**



Az elemi munka $\delta W_b = p dV = 0.$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai
folyamatok

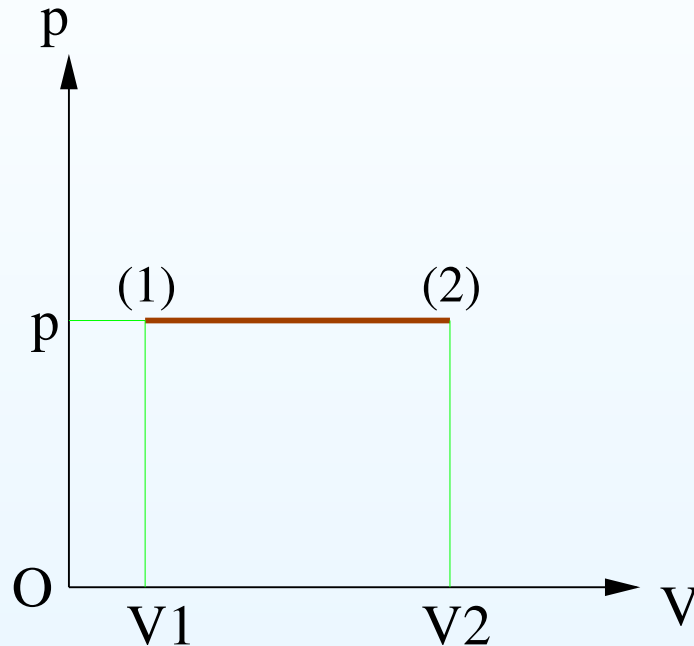
● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

2. Izobár állapotváltozás, $p = \text{const.}$



A munka W_b és a folyamathoz szükséges hőmennyiség Q :

$$W_b = \int_{(1)}^{(2)} p dV = p(V_2 - V_1), \quad Q = \Delta E + W_b = c'_p(T_2 - T_1).$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai
folyamatok

● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

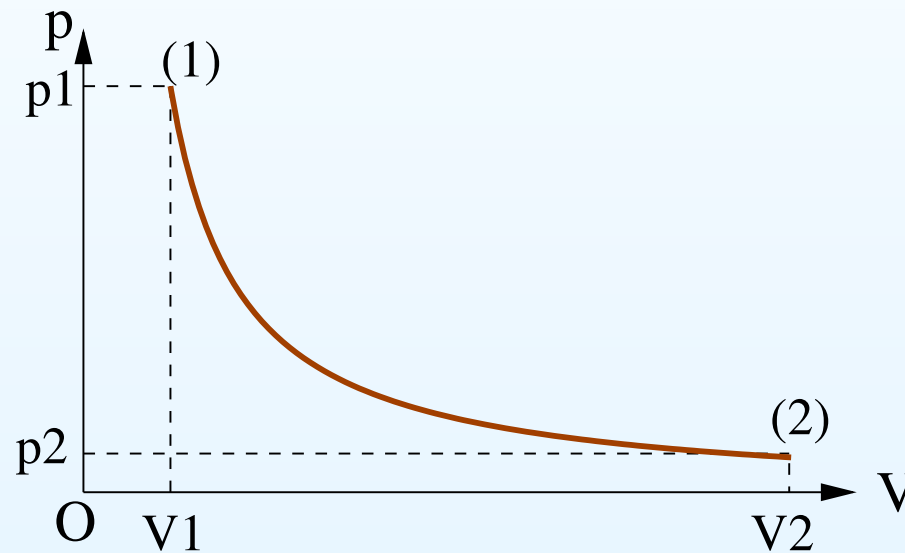
A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

3. Izotermikus állapotváltozás, $T = const.$

A $p - V$ diagramban a p és V kapcsolatot egy parabola szemlélteti:

$$p = RT/V, \quad T = const.$$





Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● **Fő termodinamikai
folyamatok**

● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

A munka

$$W_b = \int_{(1)}^{(2)} p dV = RT \int_{(1)}^{(2)} \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (26)$$

Mivel a belső energia nem változik:

$$\Delta E = c'_V \Delta T = 0,$$

ezért $Q = W_b$, vagyis a környezetből nyert hőmennyiség egészében a belső erők munkájának elvégzésére megy.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai
folyamatok

● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

4. Adiabaticus állapotváltozás, $Q = 0$. a rendszer el van szigetelve a környezettől.

A termodinamika I. főtételéből következik, hogy

$$dE = -\delta W_b, \quad (27)$$

vagyis a rendszer munkát csak a belső energia csökkenése árán végezhet. A folyamatban

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa = \frac{p_1}{p_2}, \quad \text{ahonnan } pV^\kappa = \text{const}, \quad \kappa = c_p / c_v. \quad (28)$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai
folyamatok

● Körfolyamatok,
hatásfok

● Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

4. Adiabaticus állapotváltozás, $Q = 0$. a rendszer el van szigetelve a környezettől.

A termodinamika I. főtételéből következik, hogy

$$dE = -\delta W_b, \quad (27)$$

vagyis a rendszer munkát csak a belső energia csökkenése árán végezhet. A folyamatban

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa = \frac{p_1}{p_2}, \quad \text{ahonnan } pV^\kappa = \text{const}, \quad \kappa = c_p / c_v. \quad (28)$$

A belső munka

$$W_b = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right). \quad (29)$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

● Fő termodinamikai folyamatok

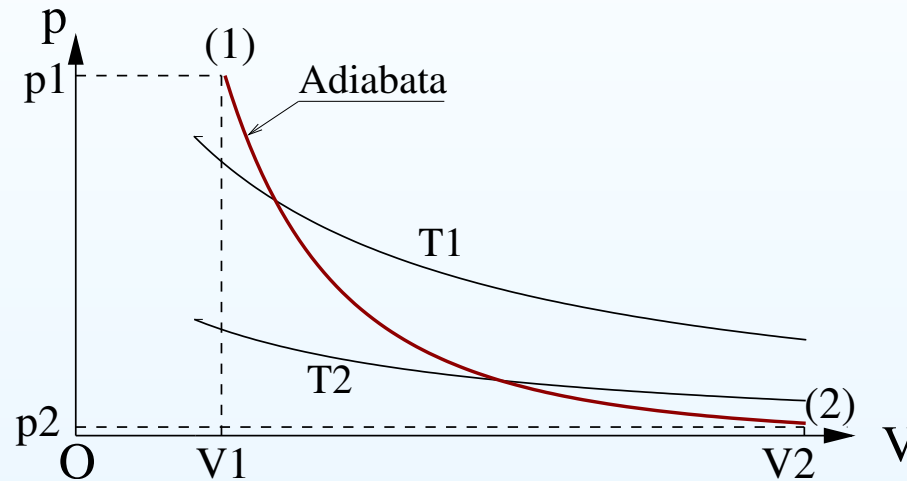
● Körfolyamatok, hatásfok

● Hőerőgépek

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

A folyamat a $p - V$ diagramban egy $p = \text{const}/V^\kappa$ alakú görbe.





Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

• Fő termodinamikai folyamatok

• **Körfolyamatok, hatásfok**

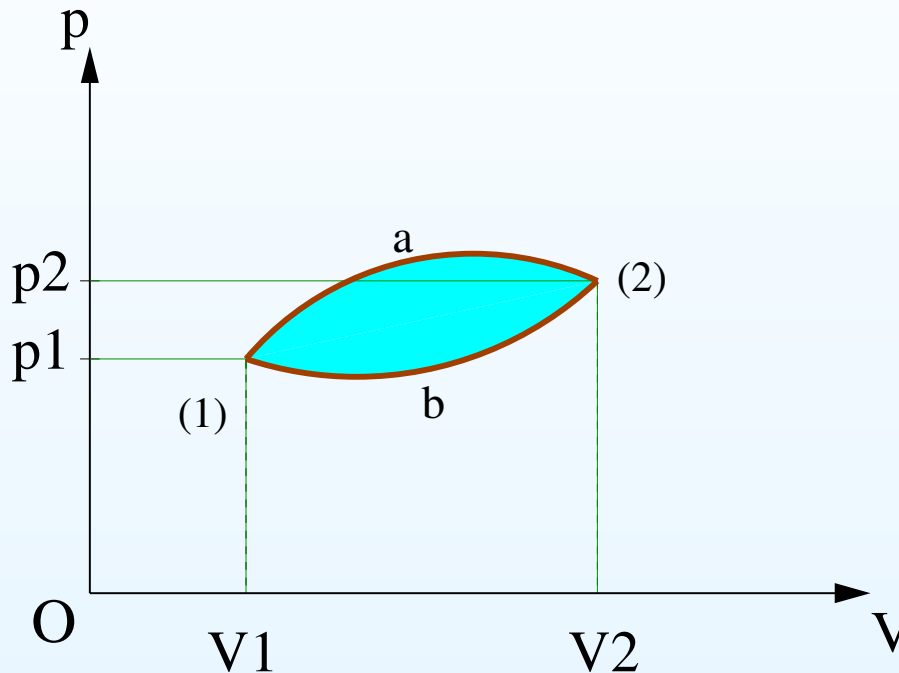
• Hőerőgépek

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Körfolyamatok, hatásfok

A körfolyamatnak az olyan folyamatot nevezzük, amelyben az állapotsíkon a folyamatot leíró görbe zárt.



A körfolyamat alatt a rendszer által végzett munka pozitív, ha a változás az óramutató járásával egyirányban történt, és negatív, ha a változás iránya az óramutató járásával ellenkező.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

- Fő termodinamikai folyamatok

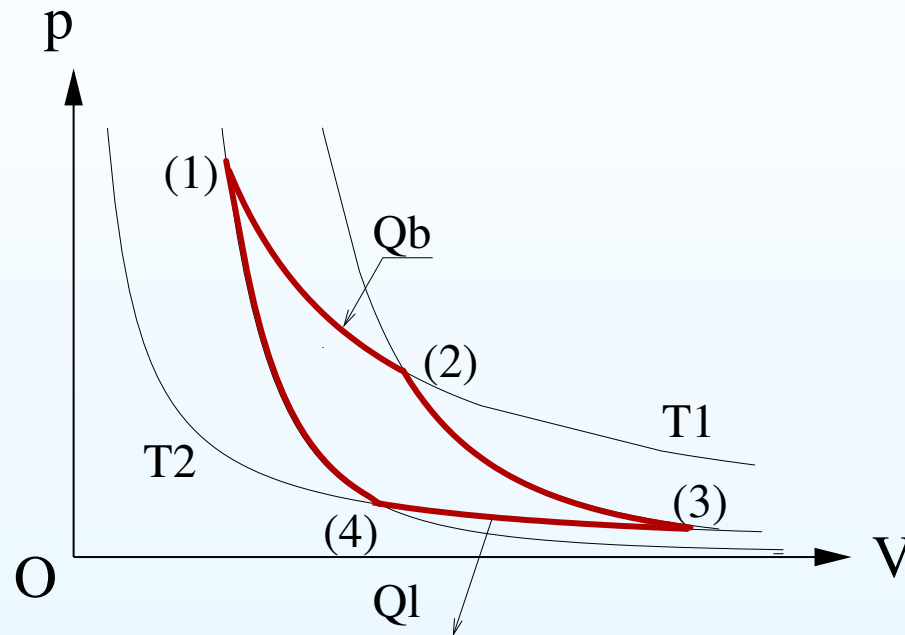
- Körfolyamatok, hatások

- Hőerőgépek

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Carnot-folyamat



Az (1)→(2) és (3)→(4) szakaszok izotermikus folyamatok, a (2)→(3) és a (4)→(1) szakaszok adiabatikusak.

A végzett munkák összege

$$W_{\text{összes}} = R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (30)$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

• Fő termodinamikai
folyamatok

• **Körfolyamatok,
hatásfok**

• Hőerőgépek

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Q_{be} az $1 \rightarrow 2$ folyamat során felvett hőmennyiség, Q_{el} pedig a $3 \rightarrow 4$ folyamat során leadott hőmennyiség:

$$Q_{be} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad Q_{el} = -RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (31)$$

A képletben Q_{el} negatív. Tehát, $W_{\text{összes}} = Q_{be} + Q_{el}$.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

- Fő termodinamikai folyamatok

- **Körfolyamatok, hatásfok**

- Hőerőgépek

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

Q_{be} az $1 \rightarrow 2$ folyamat során felvett hőmennyiség, Q_{el} pedig a $3 \rightarrow 4$ folyamat során leadott hőmennyiség:

$$Q_{be} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad Q_{el} = -RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (31)$$

A képletben Q_{el} negatív. Tehát, $W_{\text{összes}} = Q_{be} + Q_{el}$.

Az η körfolyamat hatásfoka: a végzett (hasznos) munka és a felvett hőmennyiség aránya

$$\eta = \frac{W_{\text{összes}}}{Q_{be}}. \quad (32)$$

A Carnot-folyamat hatásfoka

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (33)$$

A hatásfok mindig kisebb egynél!



Hőerőgépek

Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

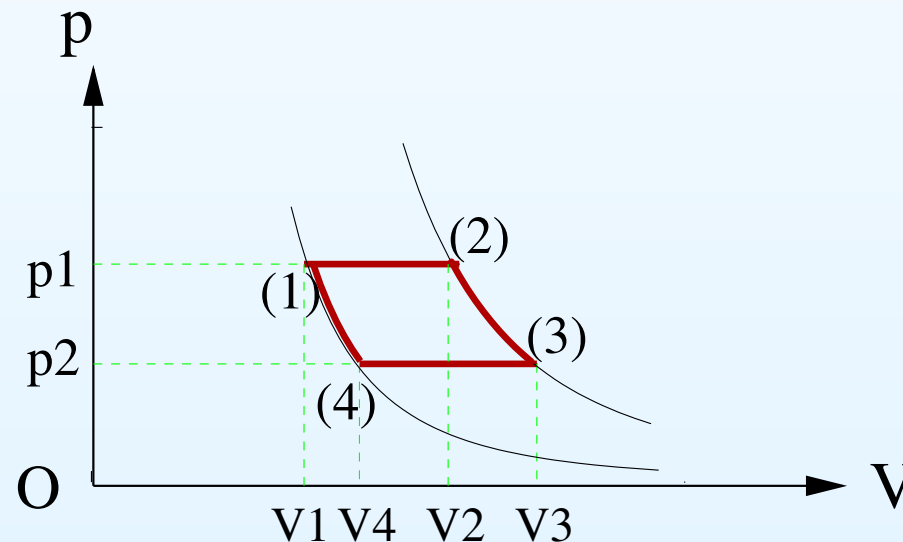
Körfolyamat

- Fő termodinamikai folyamatok
- Körfolyamatok, hatásfok
- **Hőerőgépek**

A termodinamika II. és III. főtétele

Valódi gázok termodinamikája

A körfolyamatok fontos szerepet játszanak a technikában. Gyakorlatilag az összes erőgép, ami a hőenergiát mechanikai energiára alakítja (hőerőgép), körfolyamatszerűen működik. Joule-féle folyamatban az $(1) \rightarrow (2)$ és a $(3) \rightarrow (4)$ szakaszok izobár jellegű állapotváltozások, a $(2) \rightarrow (3)$ és a $(4) \rightarrow (1)$ szakaszok pedig adiabatikusak.





Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

**A termodinamika II. és
III. főtétele**

- A termodinamika II.
főtétele
- Entrópia
- A termodinamika III.
főtétele
- Entalpia. Technikai
munka

Valódi gázok
termodinamikája

A termodinamika II. és III. főtétele



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

● A termodinamika II.
főtétele

● Entrópia

● A termodinamika III.
főtétele

● Entalpia. Technikai
munka

Valódi gázok
termodinamikája

A termodinamika II. főtétele

Termodinamika II. főtétele:

Nem lehetséges egy olyan periódikusan működő gépet szerkeszteni, melynek működése során más nem történik, csak egy súly felemelése és a hőtartály lehülése.

Vagyis nem lehet létrehozni olyan körfolyamatot, mely hőelvonás nélkül dolgozik.

Más fogalmazásban:

nincs a természetben olyan folyamat, amelyben egy test hőt veszít, és az teljesen munkává alakul át.

Az olyan rendszert, amely az összes környezetből felvett hőenergiát mechanikai energiává (munkává) alakítja át, másodfajú „perpetuum mobile”-nek nevezik.

Másodfajú „perpetuum mobile” nem létezik!



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

- A termodinamika II. főtétele

- **Entrópia**

- A termodinamika III. főtétele

- Entalpia. Technikai munka

Valódi gázok termodinamikája

Entrópia

Termodinamikában egy folyamat lehet reverzibilis (megfordítható) és irreverzibilis (nem megfordítható).

Nézzük a Carnot-féle folyamatban a $\delta Q/T$ hányados összegét a teljes ciklusban.

Az első szakaszban a hőmérséklet $T = T_1$ állandó és

$$Q_{be} = Q_1, \quad \sum \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_1}{T_1} = R \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right).$$

A második és negyedik szakasz adiabatikus, vagyis $\delta Q = 0$. A harmadik szakaszban $T = T_2$ állandó és így ott:

$$Q_{el} = Q_2, \quad \sum \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_2}{T_2} = R \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right).$$



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

- A termodinamika II. főtétele

- **Entrópia**

- A termodinamika III. főtétele

- Entalpia. Technikai munka

Valódi gázok termodinamikája

Az egész ciklusra vonatkozóan a fenti hányados összege (reverzibilis folyamatban):

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0, \implies \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0, \implies \oint \frac{\delta Q^\tau}{T} = 0. \quad (34)$$

A zárt görben az integrál egyenlő nullával, így integrandus teljes differenciál:

$$\frac{\delta Q^\tau}{T} = dS, \quad S = \int_0^T \frac{\delta Q^\tau}{T} + S_0.$$

Az S egy állapotfüggvény, **entrópia**. Reverzibilis folyamatokra az entrópia változása az egész ciklusban egyenlő nullával.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

- A termodinamika II. főtétele

- **Entrópia**

- A termodinamika III. főtétele

- Entalpia. Technikai munka

Valódi gázok termodinamikája

Az irreverzibilis folyamatokra igaz:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0, \quad \text{és} \quad dS > \frac{\delta Q}{T}. \quad (35)$$

A (35). reláció univerzális jellegű, és érvényes minden termodinamikai folyamatra.

Az adiabatikus folyamatokban $\delta Q = \xi$, és így $dS \geq 0$. Ez az eredmény **a termodinamika II. főtétele**:

Egy hőszigetelt rendszerben az entrópia nem csökkenhet.



Bevezetés

Az ideális gázok termodinamikája

Szilárdtestek termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és III. főtétele

- A termodinamika II. főtétele

- **Entrópia**

- A termodinamika III. főtétele

- Entalpia. Technikai munka

Valódi gázok termodinamikája

Az irreverzibilis folyamatokra igaz:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0, \quad \text{és} \quad dS > \frac{\delta Q}{T}. \quad (35)$$

A (35). reláció univerzális jellegű, és érvényes minden termodinamikai folyamatra.

Az adiabatikus folyamatokban $\delta Q = \xi$, és így $dS \geq 0$. Ez az eredmény **a termodinamika II. főtétele**:

Egy hőszigetelt rendszerben az entrópia nem csökkenhet.

A valóságban minden folyamat irreverzibilis, és az entrópia csak növekszik, egészen addig, ameddig a rendszer nem jut el az egyensúlyi helyzetbe.

Az entrópia segítségével megfogalmazhatjuk a **termodinamika alapvető relációját**:

$$TdS \geq dE + \delta W_b. \quad (36)$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

- A termodinamika II.
főtétele

- **Entrópia**

- A termodinamika III.
főtétele

- Entalpia. Technikai
munka

Valódi gázok
termodinamikája

Vezessünk be még egy állapotfüggvényt.

Szabad energia

$$F = E - T \cdot S$$

Izoterm folyamatban

$$dF \leq \delta W_b,$$

így a belső energiából csak a szabad energia használható fel a munka végzésre.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

- A termodinamika II.
főtétele

- Entrópia

- **A termodinamika III.
főtétele**

- Entalpia. Technikai
munka

Valódi gázok
termodinamikája

A termodinamika III. főtétele

A Nernst-féle tétel vagy **a Termodinamika III. főtétele**: *tetszőleges izotermikus folyamatban $T = 0\text{ K}$ mellett az entrópia nem változik:*

$$dS = 0, \quad S = S_0 = \text{const.} \quad (37)$$

Ennek alapján $T = 0\text{ K}$ -nél a hőkapacitás nullához tart, és $T\text{ K}$ nem lehet nulla.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

- A termodinamika II.
főtétele

- Entrópia

- A termodinamika III.
főtétele

- **Entalpia. Technikai
munka**

Valódi gázok
termodinamikája

Entalpia. Technikai munka

Entalpiának nevezünk a következő állapotfüggvényt:

$$I = E + pV. \quad (38)$$

Most a Termodinamika I. főtétele írható át:

$$Q = I_2 - I_1 + W_{tech}, \quad (39)$$

ahol a W_{tech} -t a rendszer által végzett **technikai munkának** nevezik:

$$W_{tech} = - \int_{p_1}^{p_2} V dp. \quad (40)$$

Mivel $p_1 > p_2$, $dp < 0$, ezért itt $W_{tech} > 0$.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Valódi gázok termodinamikája



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

Magas nyomás és alacsony hőmérséklet esetén a gázok cseppfolyósodása figyelhető meg. Ekkor között nem használható az ideális gázok modelje. A valódi gázok állapotának leírásánál be kell vezetni a molekulák közötti vonzóerőket (van der Waals-féle erők) és figyelembe kell venni a molekulák kiterjedését.

Van der Waals-féle állapotegyenletet:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = nRT, \quad (41)$$

ahol a a van der Waals-féle erőkkel kapcsolatos paraméter, b pedig a molekulák kiterjedése.



Bevezetés

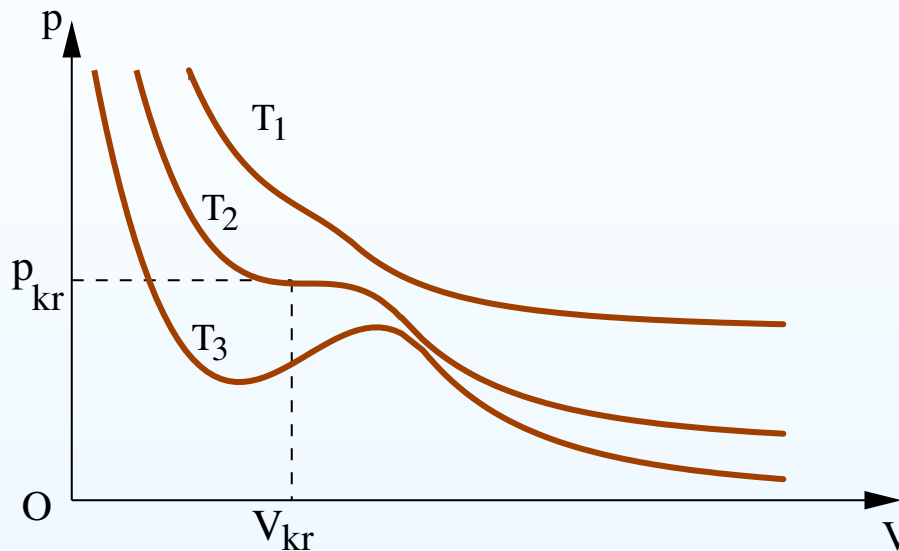
Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája



Itt $T_1 > T_2 > T_3$.

Alacsony hőmérséklet esetén (pl. T_3) a görbének két extrémuma van: egy minimum és egy maximum. A hőmérséklet növekedésével a minimum és a maximum közötti intervallum hossza csökken, és a $T_2 = T_{kr}$ **kritikus hőmérsékletnél** a két extrémum pontjai egybeesnek, és e pontot V_{kr} és p_{kr} -ként jelöljük.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

A kritikus paramétereket a kritikus együttható kapcsolja össze:

$$\frac{RT_{kr}}{p_{kr} V_{kr}} = \frac{8}{3}.$$



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

A kritikus paramétereket a kritikus együttható kapcsolja össze:

$$\frac{RT_{kr}}{p_{kr} V_{kr}} = \frac{8}{3}.$$

Ha $T > T_{kr}$, a gáz nem fogja megváltoztatni a halmazállapotát: bármilyen magas is a nyomás, a gáz nem alakul át folyadékká. Ugyanakkor a $T < T_{kr}$ esetén nagy nyomással változtathatunk a gáz halmazállapotán.



Bevezetés

Az ideális gázok
termodinamikája

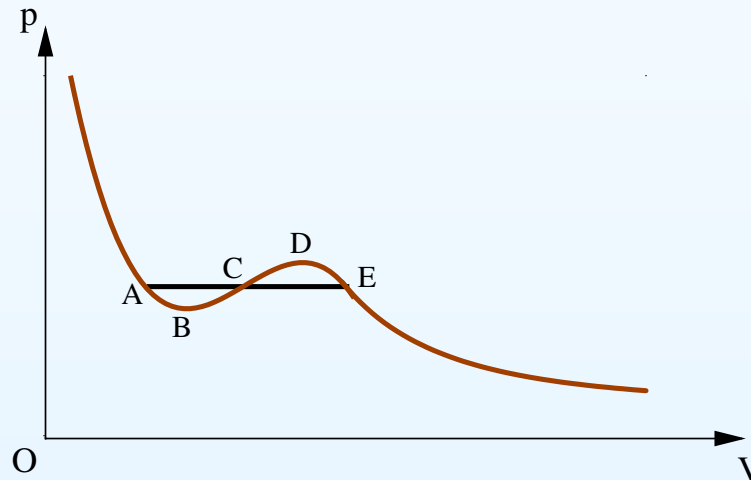
Szilárdtestek
termodinamikája

Körfolyamat

A termodinamika II. és
III. főtétele

Valódi gázok
termodinamikája

A gyakorlat azt mutatja, hogy $T < T_{kr}$ esetén a halmazállapotváltáskor az átmeneti szakaszon, amikor a térfogat növekedésével a folyadék fázisú anyag párolog, a nyomás állandó marad (telített gőz). Vagyis ezen a szakaszon a görbét helyettesíteni kell egy vízszintes egyenessel.



Itt az ABCA terület egyenlő a CDEC területtel.