

Fizika mérnököknek 2. levelező

3. előadás - Hőtan

Mingesz Róbert

Szegedi Tudományegyetem

2010. március 5.

Tartalom I

- 1 A hőmérséklet
- 2 Ideális gázok állapotegyenlete
- 3 A kinetikus gázelmélet
 - Az ekvipartíció tétele
- 4 Hőtágulás
 - Szilárd testek hőtágulása
 - Térfogati hőtágulás
 - Folyadékok hőtágulása
- 5 A termodinamika nulladik főtétele
- 6 A termodinamika első főtétele
 - Az energiamegmaradás elve
- 7 A hőkapacitás
 - Gázok hőkapacitása
 - Szilárd anyagok hőkapacitása
 - Nyílt folyamatok ideális gázokkal
- 8 A termodinamika második főtétele

Tartalom II

- Carnot-féle körfolyamat
- Entrópia
- III. főtétele

9 Statisztikus termodinamika

10 Fázisátalakulások

- Olvadás és fagyás
- Párolgás
- Forrás és lecsapódás
- Folytonos fázisátalakulások

11 Gázok alacsony hőmérsékleten

12 A levegő páratartalma

13 Gépek

14 Transzportfolyamatok

- Hővezetés

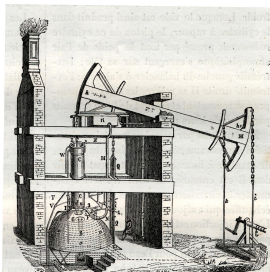
15 Transzportfolyamatok

- Hőáramlás és hőszigetelés

Tartalom III

- Diffúzió

- Ókor: a „tűz” elem
 - 1592: Galilei \Rightarrow hőmérő
 - Az igazi fejlődés csak a XIX. században indult meg
- Korábban:
- fogalmi zavarok
 - hőanyagelmélet
- Miért lett fontos?
- Ipari forradalom
 - Hőerőgépek építése



A hőmérséklet

- A testek „hőállapotát” érzékszerveinkkel is észleljük szubjektív, megbízhatatlan
 - Az azonos hőmérsékletű, de különböző anyagú testek hőmérsékletét nem érezzük azonosnak
 - A hőérzet függ az érzékelő „előéletétől”
- Lehetőségünk van objektívebb mérésekre Tapasztalataink szerint:
 - A testek tulajdonságai függenek a hőmérséklettől (pl. térfogat, nyomás, ellenállás, halmazállapot...)
 - Ha különböző hőmérsékletű testeket összeérintünk, egy idő után a hőmérséklet kiegyenlítődik
 - Rendelkezésre állnak jól definiálható hőállapotok (pl. jég olvadáspontja, forrásban lévő víz ...)

Hőmérők

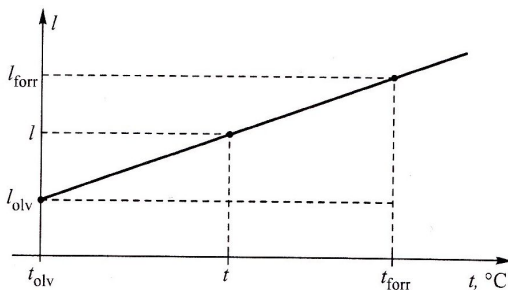
Hőmérsékletváltozás \Rightarrow az anyagi tulajdonságok megváltoznak

- higanyos/alkoholos hőmérő
- gázhőmérők
- fémrudas hőmérők
- bimetál hőmérők
- ellenállás-hőmérők
- termisztor / termoelem
- infravörös hőmérők
- ...



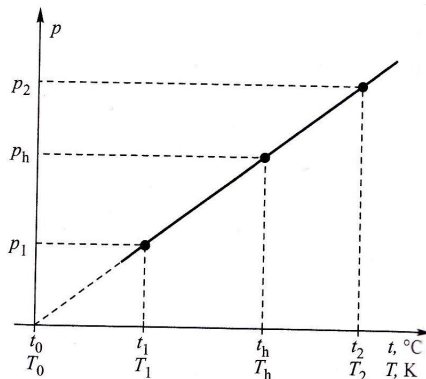
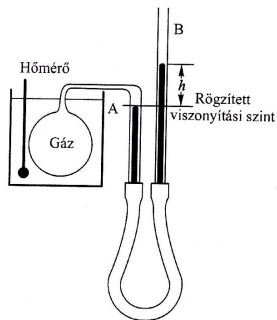
Celsius-féle empirikus hőmérsékleti skála

- Folyadékhőmérő (alkohol / higany)
- $p = 101,325 \text{ kPa}$
- A víz olvadáspontja: 0°C
- A víz forráspontja: 100°C

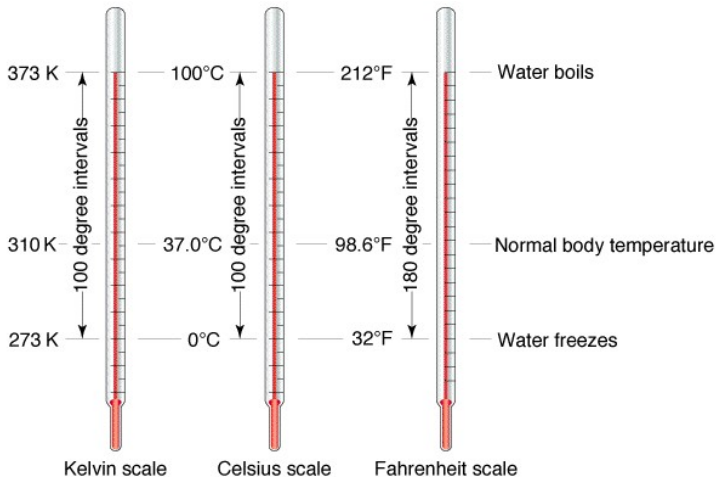


Kelvin-skála, ideálisgáz-skála

- Gázhőmérő
- $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$
- $T = t + 273,15^\circ\text{C}$



Hőmérsékleti skálák



Nemzetközi gyakorlati hőmérsékleti skála

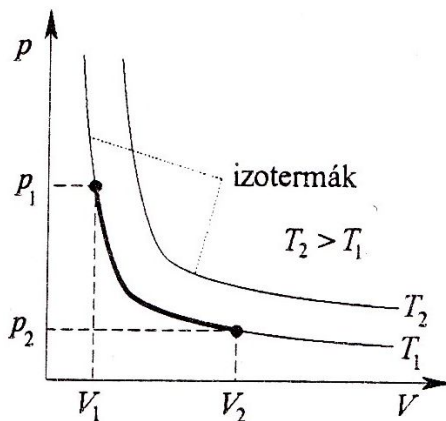
Elsődleges alappontok	$t_{68},$ °C	$T_{68},$ K
A hidrogén hármaspontja	-259,34	13,81
A hidrogén forráspontja (33,3306 kPa)	-256,108	17,042
A hidrogén forráspontja	-252,87	20,28
A neon forráspontja	-246,048	27,102
Az oxigén hármaspontja	-218,789	54,361
Az oxigén forráspontja	-182,962	90,188
A víz hármaspontja (610,5 Pa)	0,01	273,16
A víz forráspontja	100	373,15
A cink fagyáspontja	419,58	692,73
Az ezüst fagyáspontja	961,93	1235,08
Az arany fagyáspontja	1064,43	1337,58

- **Extenzív mennyiségek:** Az anyagban mérhető helyi értékek összege
Additivitás (pl. tömeg, térfogat, energia)
- **Intenzív mennyiségek:**
nem additív jellegűek, függetlenek a térfogattól
(pl. nyomás, hőmérséklet, sűrűség)
- **Termodinamikai paraméterek:**
az anyagi rendszert egyértelműen jellemzik (egyensúlyban)
(pl. nyomás, térfogat, hőmérséklet, entrópia)
- **Állapotjelzők:** közvetlenül mérhetők
(pl. nyomás, térfogat, anyagmennyiség)
- **Állapotfüggvény:** az állapotjelzők nem függetlenek egymástól

$$f(p, V, T, n) = 0$$

Boyle-Mariotte-törvény

- A hőmérséklet állandó $\Rightarrow p \cdot V = \text{állandó}$
- Izotermikus állapotváltozás
- Állapotváltozások szemléltetése: **p-V diagram**



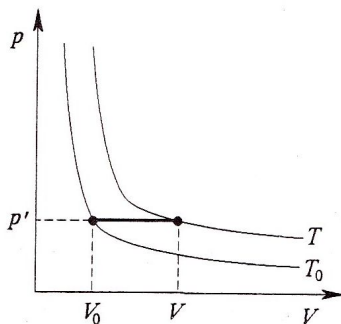
$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Gay-Lussac-törvények

- Állandó nyomás \Rightarrow

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$$

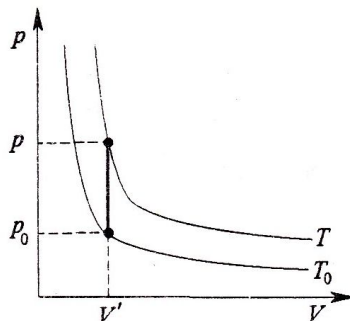
- Izobár állapotváltozás



- Állandó térfogat \Rightarrow

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}$$

- Izochor állapotváltozás



Ideális gázok állapotegyenlete

- $\frac{pV}{T} = \text{állandó} \Rightarrow$

$$pV = nRT$$

$$pV = NkT$$

- n : anyagmennyiség [mol]
- N : részecskeszám
- R : **univerzális gázállandó**, $R = 8,31 \text{ J/molK}$
- N_A : **Avogadro-féle** szám, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$
- k : **Boltzmann-állandó**, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$$k = \frac{R}{N_A}$$

Az Avogadro-törvény és a Dalton-törvény

- **Avogadro-törvény:** az azonos nyomású, térfogatú és hőmérsékletű ideális gázokban mindig ugyanannyi gázrészecske található.
- **Dalton-törvény:** ideális gázelegy p nyomása egyenlő az egyes gázkomponensek p_i **parciális nyomásának** összegével:

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

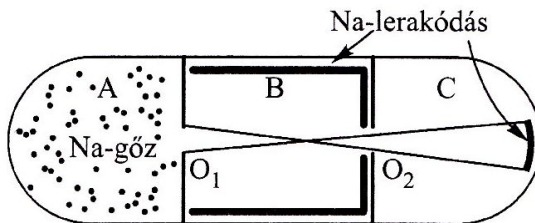
A gázelegy egyes komponensei (összetevői) úgy viselkednek, mintha a többi komponens nem lenne jelen.

A kinetikus gázelmélet

- Leukipposz, Démokritosz, Dalton:
Az anyag atomokból áll
- Avogadro: molekulák
- Bizonyítékok: Brown-mozgás, diffúzió, hőmozgás



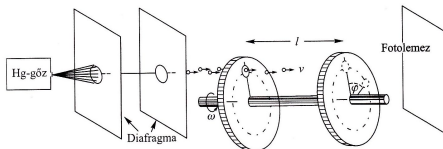
- A kinetikus gázelmélet alapfeltevései:
 - az ideális gázok pontszerű atomokból/molekulákból állnak
 - nagyszámú részecske (10^{24})
 - a gázcseppkék egymással és az edény falával ütköznek, más kölcsönhatás nincs
 - egyensúlyban a gázcseppkék egyenletesen töltik ki a teret



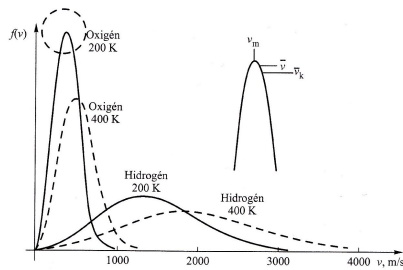
- Dunoyer-kísérlet: ha a gáz részecskéi egymással nem ütköznek, egyenes vonalban haladnak.

Gázcsepscék sebességeloszlása

- Eldridge-Lammert-féle berendezés \Rightarrow
A részecskék sebessége kísérletileg meghatározható



- Az egyes részecskék sebessége
nem azonos \Rightarrow
az események leírása statisztikai
függvényekkel lehetséges



Maxwell-féle sebességeloszlás

- Mérések + statisztikus fizika:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

- A négyzetes középsebesség:

$$\bar{v}_k = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

- Egy részecske átlagos energiája:

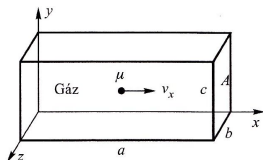
$$\bar{\epsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

- A hőmérséklet statisztikai értelmezése:

$$T = \frac{2}{3k} \bar{\epsilon}_k$$

A kinetikus gázelmélet

- További feltételezések: csak haladó mozgás, csak az edény falával való ütközés



- A gáz részecskéi ütköznek a fallal, impulzust adnak át \Rightarrow nyomás
- Hosszas levezetés eredménye: a nyomás értéke:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)$$

- Átrendezve:

$$pV = \frac{2}{3} N \bar{\epsilon}_k = \frac{2}{3} N \frac{3}{2} kT = NkT$$

- Adott v_x sebességgel a fal felé haladó részecskék száma:

$$dN_f = \frac{1}{2} N f(v_x) dv_x$$

- Adott v_x sebességgel időegység alatt ütköző részecskék:

$$dN_u = dN_f \frac{dV}{V} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} A v_x f(v_x) dv_x d\tau$$

- Az időegység alatt átadott impulzus:

$$dI(v_x) = dN_u 2m v_x$$

$$dI = \int dI(v_x) = \left(m \frac{N}{V} A \int_0^{\infty} v_x^2 f(v_x) dv_x \right) d\tau$$

- A falra ható erő:

$$pA = F = \frac{dI}{d\tau}$$

- A falra ható nyomás:

$$p = m \frac{N}{V} \int_0^{\infty} v_x^2 f(v_x) dv_x$$

$$p = \frac{Nm}{V} \overline{v_x^2}$$

- A nyomás minden egyes falon megegyezik \Rightarrow

$$\frac{Nm \overline{v_x^2}}{V} = \frac{Nm \overline{v_y^2}}{V} = \frac{Nm \overline{v_z^2}}{V} \Rightarrow \overline{v^2} = 3 \overline{v_x^2}$$

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \overline{v^2}$$

Az ekvipartíció tétele

- Egyatomos gázok (He, Ne, Ar, ...)

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_x^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{3}{2} kT$$

- Szabadsági fok (f):** az energiatárolás független lehetősége
Pl. egyatomos gáz: 3 egymástól független mozgási irány: $f = 3$
- Az **ekvipartíció tétele:** az egy szabadsági fokra jutó átlagos energia:

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{2} kT$$

- Kéttatomos gázok (H_2 , O_2 , ...): $f = 5$
 - transzláció: 3 szabadsági fok
 - rotáció: 2 szabadsági fok
- Többatomos gázok: $f = 6$
- Szilárd testek: $f = 6$

Ideális gázok belső energiája

- Egy atom egy szabadsági fokára jutó átlagos energia:

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{1}{2}kT$$

- Gáz: f szabadsági fok, N atom:

$$E = \frac{f}{2}NkT = \frac{f}{2}nRT$$

- Az ideális gázok belső energiája csak a hőmérséklettől függ.
- Megjegyzés: az épp „elérhető” szabadsági fokok száma függ a hőmérséklettől.

Reális gázok állapotegyenlete

- Reális gázok:
 - nem pontszerű részecskék (véges térfogatot elfoglalnak)
 - a részecskék között vonzó kölcsönhatás is fellép van der Waals-erők
- A van der Waals-féle állapotegyenlet:

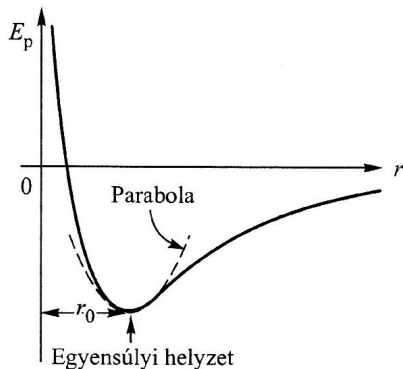
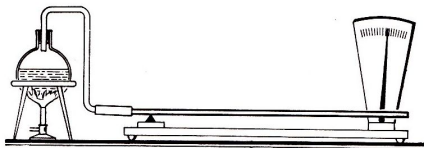
$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

a és b a gázra jellemző állandók

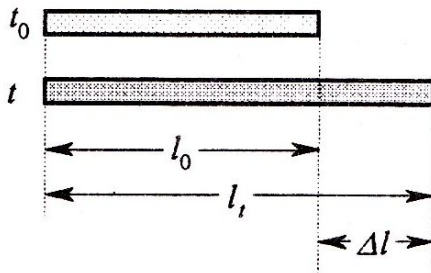
- a a nyomáskorrekció mértéke
- b a gázcsepp részecskék saját térfogata (m^3/mol)

Szilárd testek hőtágulása

- Az atomok rezegnek a kristályrácsban
- Hőmérsékletváltozás hatására az atomok átlagos távolsága megváltozik



Lineáris hőtágulási együttható



- **Lineáris hőtágulási együttható: α**

$$l_t = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

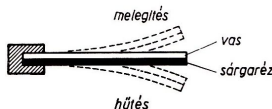
- Nagyobb hőmérsékletkülönbség esetén: nem lineáris elemek

$$l_t = l_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots]$$

Lineáris hőtágulási együttható

Anyag	α (10^{-6} 1/K) $T_0 = 20^\circ\text{C}$
Ólom	60
Alumínium	23
Réz	16
Arany	14
Beton	12
Vas / Acél	12
Platina	9
Üveg	8,5
Volfram	4,5
Szilícium	3
Gyémánt	1
Kvarcüveg	0,59

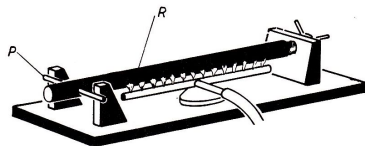
- A különböző anyagok különböző mértékben tágulnak.
- Alkalmazások: hőmérsékletmérés / hőmérsékletszabályozás



A hőtágulás során fellépő mechanikai feszültség

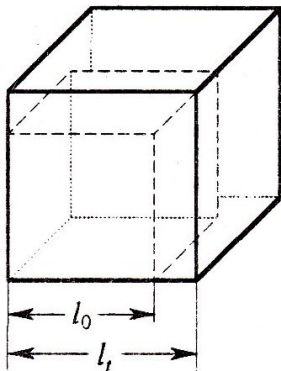
- Ha a hosszváltozás akadályozva van \Rightarrow mechanikai feszültség

$$l = l_0 \left[1 + \frac{\sigma}{E} + \alpha(T - T_0) \right]$$



A hőtágulás gyakorlati vonatkozásai

- Hidak tágulása: görgők, tágulási hézagok
- Vasúti sínek: tágulási hézagok, erős alap
- Távvezetékek: nyáron jobban lelógnak
- Csövek: meghajlított szakaszok szükségesek
- Vasbeton: együtt kell táguljon az acél és a beton
- Lakk, zománcrétegek: megrepedeznek, ha nem együtt tágulnak
- Üvegedények: hirtelen hőmérsékletváltozás hatására megrepedhetnek
(\Rightarrow hőálló üvegek)



- A test minden irányba tágul:

$$l_t = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

- A test térfogata:

$$V_t = l_t^3 = l_0^3 [1 + \alpha(T - T_0)]^3$$

$$V_t \approx V_0 [1 + 3\alpha(T - T_0)]$$

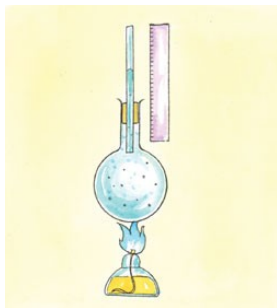
- **Térfogati hőtágulási együttható: β**

$$V_t = V_0 [1 + \beta(T - T_0)]$$

Folyadékok hőtágulása

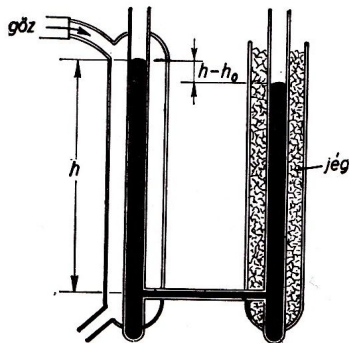
A folyadékok hőtágulása lényegesen nagyobb, mint a szilárd testeké

$$V_t = V_0 [1 + \beta(T - T_0)]$$



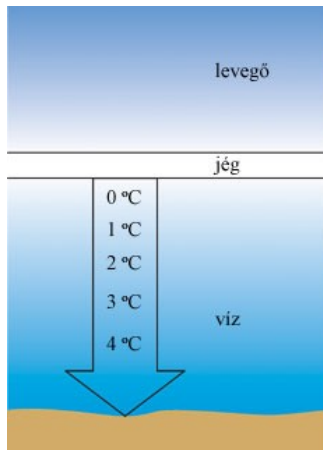
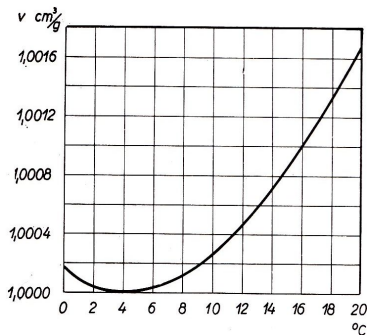
A sűrűség is változik:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}$$



A víz hőtágulása

- A víz sűrűsége 4°C-on a legnagyobb \Rightarrow a tavak alja nem fagy be



- Klasszikus termodinamika
 - egyensúlyi rendszerek
 - végtelen lassan lejátszódó folyamatok
 - (általában) reverzibilis folyamatok
- Irreverzibilis termodinamika
 - nemegyensúlyi folyamatok
 - véges idő alatt végbemenő folyamatok

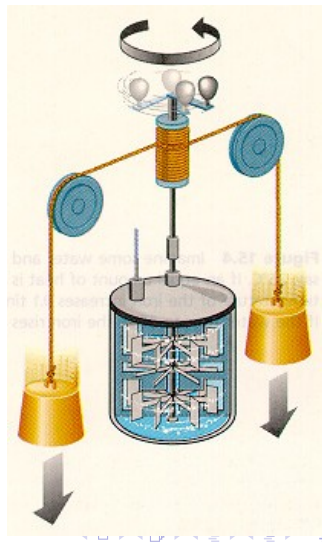
- Rendszer: jól definiált határfelületek
- Környezet
- Rendszerek felosztása:
 - Nyitott: az anyag és az energia is átmehet
 - Mechanikailag zárt: energiacsere lehetséges, de anyag nem megy át
 - Hőtanilag zárt: nincs termikus kölcsönhatás
⇒ **adiabatikus** folyamatok
 - Izolált rendszer: nincs anyag vagy energiaátvitel

A termodinamika nulladik főtétele

- Tapasztalat: két különböző hőmérsékletű test
Összeérintve \Rightarrow közös T hőmérséklet (termikus egyensúly)
- **A termodinamika 0. főtétele:** ha A és B rendszerek termikus egyensúlyban vannak egy C rendszerrel, akkor egymással is egyensúlyban vannak.
- Ez általában is igaz, nem csak a hőmérsékletre.
Az egyensúly feltétele: az intenzív paraméterek (nyomás, hőmérséklet, ...) egyezzenek meg

Joule-kísérlet

- 19. század eleje: hőanyagelmélet (kalorikum)
- Rumford: ágyúfúrási kísérletek: felmelegedés hőanyag közlése nélkül
⇒ a hő egy külön energiafajta
- Joule-kísérlet: a hő mechanikai egyenértéke meghatározható
- A hő az energiaközlés mértéke



A termodinamika első főtétele

- A rendszer belső energiájának változása (ΔU vagy ΔE) = a rajta végzett munka + a vele közölt hő

$$\Delta U = Q + W$$

$$dU = \delta Q + \delta W$$

- Ha $Q > 0$: a rendszer hőt vesz fel
- Ha $W > 0$: a környezet munkát végez a rendszeren
- Ha $\Delta U > 0$: a belső energia nő (T nő)
(Gázok esetén: $U = \frac{f}{2} NkT$)

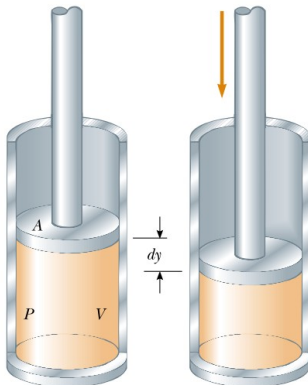
- **Térfogati munka**

$$dW = -F dy = -pAdy = -pdV$$

$$W = \int_1^2 dW = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

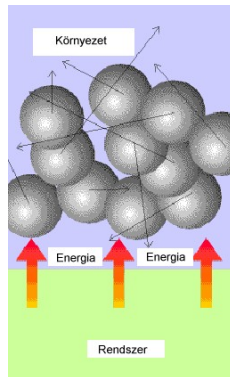
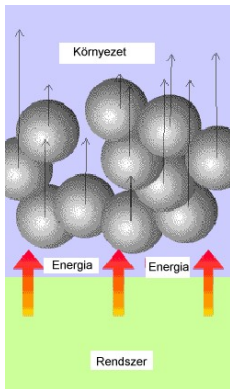
Ha $p = \text{állandó} \Rightarrow$

$$W_p = -p\Delta V$$



- Egyéb munkavégzés, pl. elektromos, kémiai...

A munka és a hő molekuláris értelmezése



- Munka: rendezett energiaközlés

- Hő: rendezetlen energiaközlés

Az energiamegmaradás elve

- Energia: munkavégző képesség
- Jele: E , mértékegység: Joule (J)
(Belső energia: U)
Régi mértékegységek: cal (hő), erg (mechanikai), atm (térfogati), eV (elektromos)
- **Az energiamegmaradás elve:**
az energia semmiből nem keletkezik és nem is tűnik el.
Következmények:
 - Izolált rendszer energiája állandó.
 - **Elsőfajú örökmozgó** (perpetuum mobile) nem létezik
Elsőfajú örökmozgó: olyan gép, ami több munkát végez, mint amennyi energiát fölvesz a környezetéből.

Az entalpia

- Ha egy test felmelegszik \Rightarrow kitágul \Rightarrow térfogati munkát végez

A térfogati munka: $W = -p\Delta V$

I. főtétele: $\Delta U = Q + W$

- **Entalpia:**

$$H = U + pV$$

Kis mértékű változás esetén:

$$dH = dU + pdV + Vdp$$

- Állandó nyomáson: $dp = 0$

$$dH = \delta Q_p$$

$$\Delta H = Q_p$$

Állandó nyomáson a közölt hő megegyezik az entalpiaváltozással.

A hőkapacitás

- **Hőkapacitás:** megadja, hogy mennyi hőt kell közölni a rendszerrel, hogy hőmérséklete egységnivel megemelkedjen

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Egysége: J/K vagy J/°C

- Állandó térfogaton vett hőkapacitás
A gáz által végzett munka 0

$$Q_V = \Delta U = C_V \Delta T$$

- Állandó nyomáson vett hőkapacitás
A gáz által végzett munka: $W = p \Delta V$

$$Q_p = \Delta H = C_p \Delta T$$

$$C_p > C_V$$

- **Fajhő:** fajlagos hőkapacitás (az anyagtól függ)

$$c_V = \frac{C_V}{m}$$

$$c_p = \frac{C_p}{m}$$

- Egysége:

$$\frac{\text{J}}{\text{kgK}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

- A test által felvett hő ΔT hőmérsékletváltozás esetén:

$$Q = cm\Delta T$$

Gázok hőkapacitása

- A gáztörvény:

$$pV = NkT$$

- A gáz belső energiája:

$$U = \frac{f}{2} NkT$$

- Állandó térfogat:

$$Q_V = \Delta U = C_V \Delta T$$

$$C_V = \frac{f}{2} Nk$$

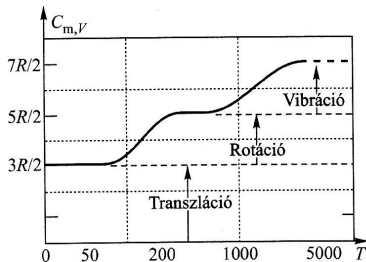
- Állandó nyomáson:

$$Q_p = \Delta H = C_p \Delta T$$

$$p \Delta V = Nk \Delta T \Rightarrow$$

$$W = Nk \Delta T$$

$$C_p = \frac{f+2}{2} Nk$$



Szilárd anyagok hőkapacitása

- Az ekvipartíció tétele:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2}kT$$

- A szilárd anyag belső energiája:

$$U = \frac{f}{2}NkT$$

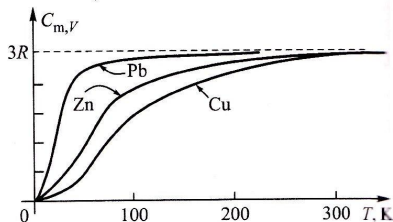
$$f = 6$$

- A hőkapacitás

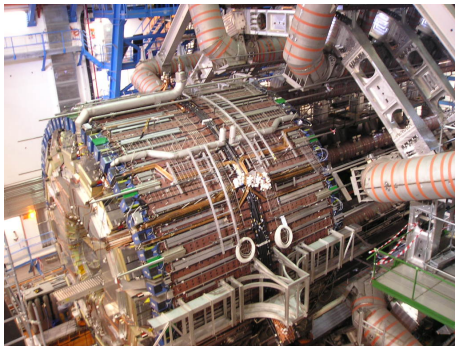
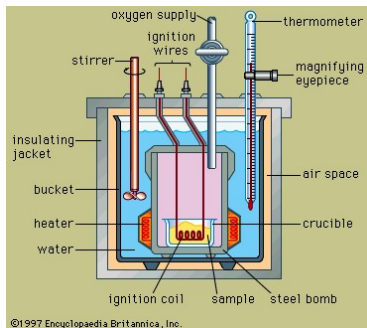
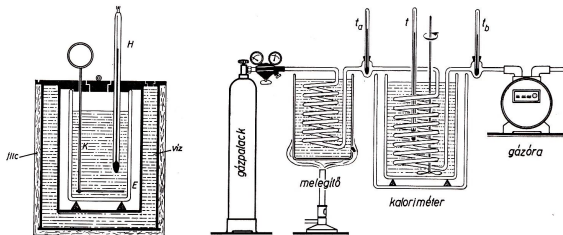
$$C = 3nR$$

- A Dulong-Petit-szabály:
szilárd testek moláris
hőkapacitása:

$$C_{\text{mol}} = 3R \approx 25 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$$



Hőkapacitás mérése: kaloriméterek

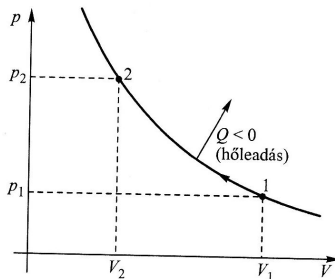
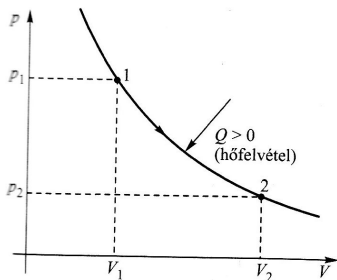


Izotermikus folyamat

- **Nyílt folyamat:** kezdeti állapot \rightarrow végállapot
- Izotermikus folyamat: $T = \text{állandó}$

$$W = -NkT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q = -W$$

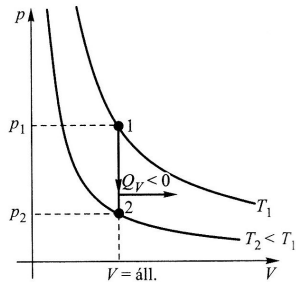
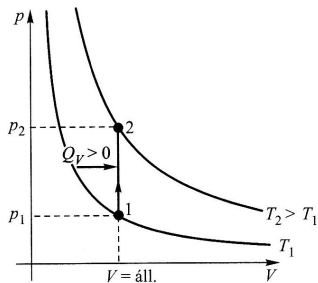


Izochor folyamat

- $V = \text{állandó}$

$$W = 0$$

$$Q_V = \Delta U = \frac{f}{2} Nk\Delta T$$

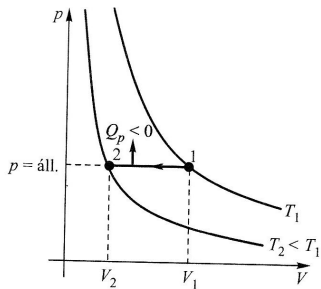
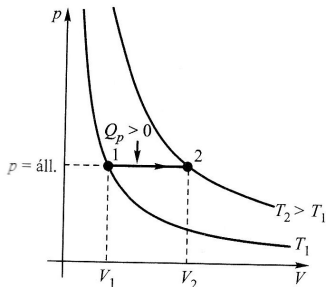


Izobár folyamat

- $p = \text{állandó}$

$$W = p\Delta V$$

$$Q_p = \Delta H = \frac{f+2}{2} Nk\Delta T$$



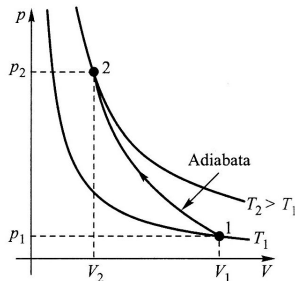
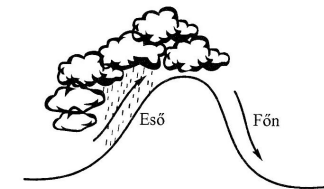
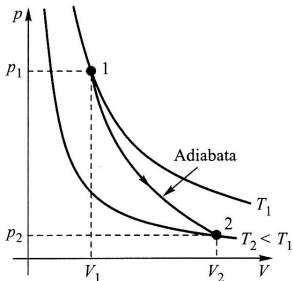
Adiabatikus folyamat

- $Q = 0$

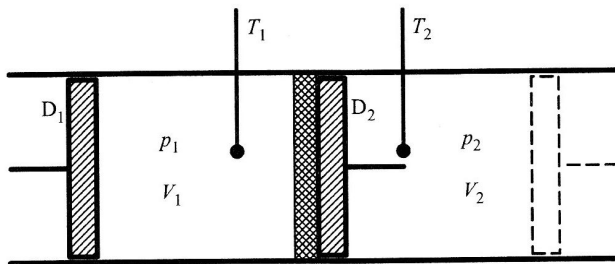
$$W = \Delta U = \frac{f}{2} Nk\Delta T$$

Adiabatikus kitevő: $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

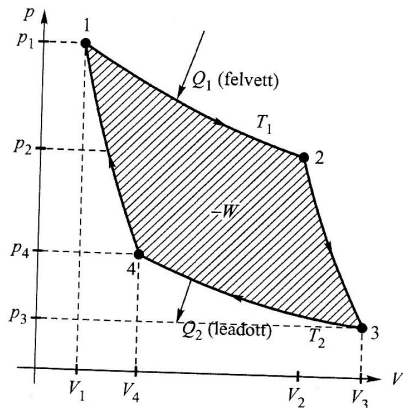


Joule-Thomson effektus



- $W = 0$
- Ideális gáz esetén: $\Delta T = 0$
- Valóságos gáz: lehűl vagy felmelegszik
- Reális gáz esetén: a részecskék között vonzóerő van
táguló gáz: a belső energia rovására munkavégzés történik

A Carnot-féle körfolyamat



A körfolyamat részei:

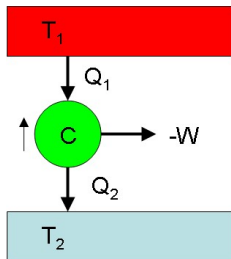
- Izotermikus tágulás
- Adiabatikus tágulás
- Izotermikus összenyomás
- Adiabatikus összenyomás

A körfolyamat során végzett munka:

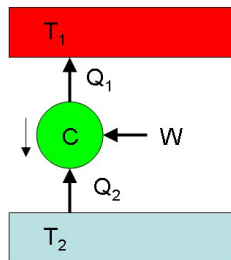
$$-W = Nk(T_2 - T_1) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

A Carnot-féle körfolyamat

- Hőerőgép



- Hűtőgép



A Carnot-féle körfolyamat hatásfoka

- A végzett munka:

$$-W = Q_1 + Q_2$$

- Ideális, reverzibilis körfolyamat esetén:

$$\eta = \frac{-W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- A **redukált hő**k összege 0

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Reverzibilis és irreverzibilis folyamatok

- Az I. főtétele számos folyamatot megenged
- **Reverzibilis** folyamatok: mindkét irányba lejátszódnak
- Valóság: számos folyamat csak egy irányba valósul meg önként:
 - súrlódási munka \rightarrow hő
 - környezetnél melegebb testek lehűlése
 - víz + só \rightarrow feloldódás
- Számos folyamat **irreverzibilis**
 - külső beavatkozás nélkül végbemennek
 - egyensúly (intenzív paraméterek kiegyenlítődése)
 - fordított irányba nem játszódnak le

A termodinamika második főtétele

- **Clausius-féle megfogalmazás:**
nem létezhet olyan folyamat (gép), amelyben a hő önként, munkavégzés nélkül egy hidegebb testről egy melegebb testbe menne át
- **Kelvin-Planck-féle megfogalmazás:**
nem létezhet olyan folyamat (gép), melyben egy test hőt veszít, és az teljes egészében (100 % hatásfokkal) munkává alakulna át
- Nem létezik **másodfajú örökmozgó:**
olyan gép, amely a környezetből felvett hőenergiát veszteségek nélkül munkavégzésre fordítja

Reverzibilis és irreverzibilis Carnot-féle körfolyamat

- Reverzibilis Carnot-féle körfolyamat esetén:
A hatásfok független az anyagi minőségtől.
A redukált hő összege 0.
- Clausius-féle egyenlőség:

$$\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$$

- Irreverzibilis Carnot-féle körfolyamat:
veszteségek lépnek fel

$$\eta_{\text{irrev}} < \eta_{\text{rev}}$$

$$\frac{Q_{1,\text{irrev}}}{T_1} + \frac{Q_{2,\text{irrev}}}{T_2} < 0$$

- Clausius-féle egyenlőség:

$$\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$$

- Nyílt folyamat esetén: $\int_A^B \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = \text{állandó, független az úttól}$
 \Rightarrow állapotfüggvény
- **Entrópia:**

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

- Körfolyamatok esetén:

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$$

- Irreverzibilis folyamatok esetén:

$$\Delta S > \int_A^B \frac{\delta Q_{\text{irrev}}}{T}$$

- Hőtanilag zárt rendszerek esetén: $\delta Q = 0$

$$\Delta S > 0$$

- **Az entrópiánövekedés elve:** zárt rendszerben a valóságban végbemenő, irreverzibilis folyamatoknál a rendszer entrópiája növekszik (míg eléri a maximális értékét: egyensúly)

Gibbs-féle összefüggés

- I. főtétele:

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$\delta Q < TdS ; \delta W = -pdV$$

- Termodinamika alapvető egyenlete (Gibbs-féle összefüggés)

$$dU \leq TdS - pdV$$

Szabadenergia és szabadentalpia

- A **szabadenergia**:

$$F = U - TS$$

Ha $T = \text{állandó} \Rightarrow \Delta F \geq W'$.

Megadja a gáz által végezhető maximális munkát.

- A **szabadentalpia** (Gibbs-féle szabadenergia):

$$G = H - TS = F + pV$$

Ha $T = \text{állandó}$ és $p = \text{állandó} \Rightarrow \Delta G \geq W'_{\text{chem}}$.

Megadja a maximálisan végezhető kémiai munkát.

A termodinamika harmadik főtétele

- Folyékony és szilárd homogén anyagok entrópiája nulla Kelvinen nulla

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

(Általában: minimuma van)

- 0 K-en a hőkapacitás is nulla
- Következmények: a 0 K nem érhető el
- **Harmadfajú örökmozgó:** olyan gép, ami eléri a 0 K-t
- Ha el tudnánk érni a 0 K-t, 100 % hatásfokú Carnot-féle körfolyamatot tudnánk létrehozni

- Makroszkópikus anyag: $> 10^{24}$ részecske
- Leírás: statisztikus fizika
- Boltzmann-féle klasszikus statisztika
 - a részecskék egymástól megkülönböztethetők
 - a részecskék helye és sebessége meghatározható
 - érvényes az ekvipartíció tétele

- **Fázistér:**

Egy részecskét 6 adat határoz meg:

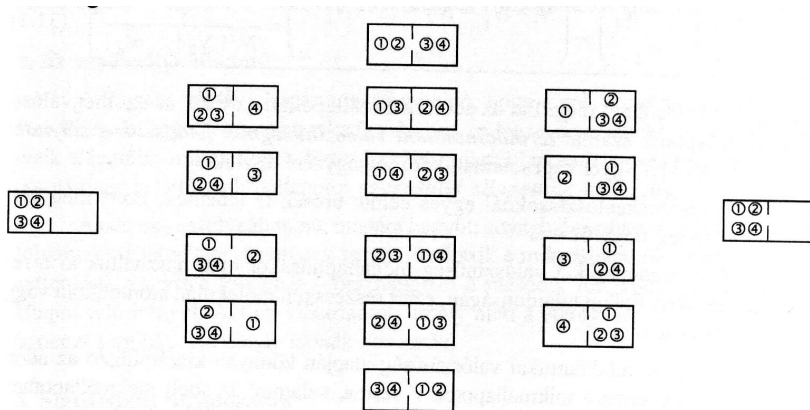
- 3 helybeli koordináta
- 3 sebességbeli koordináta

N részecske: $6N$ adat

$6N$ dimenziós tér: fázistér

Makro- és mikroállapotok

- $N = 4$ egymástól megkülönböztethető részecske
- $g = 2$ térrész



Makro- és mikroállapotok

- $N = 10, g = 2$

Makroállapot (N_1, N_2)	Cellák száma g	Mikroállapotok száma Y	Megtalálási valószínűség $P, \%$
10,0	2	1	0,098
9,1	2	10	0,977
8,2	2	45	4,394
7,3	2	120	11,719
6,4	2	210	20,508
5,5	2	252	24,610
4,6	2	210	20,508
3,7	2	120	11,719
2,8	2	45	4,394
1,9	2	10	0,977
0,10	2	1	0,098
Összesen:		1024	100,002

Az egyensúlyi állapot

- Egyensúlyi állapot: a legtöbb mikroállapotot megvalósító makroállapot.
- Statisztikus ingadozások:
véletlenszerű eltérések az egyensúlyi állapottól
 - sörétzaj
 - Brown-mozgás
 - hőmérsékletingadozás
 - sűrűségingadozás

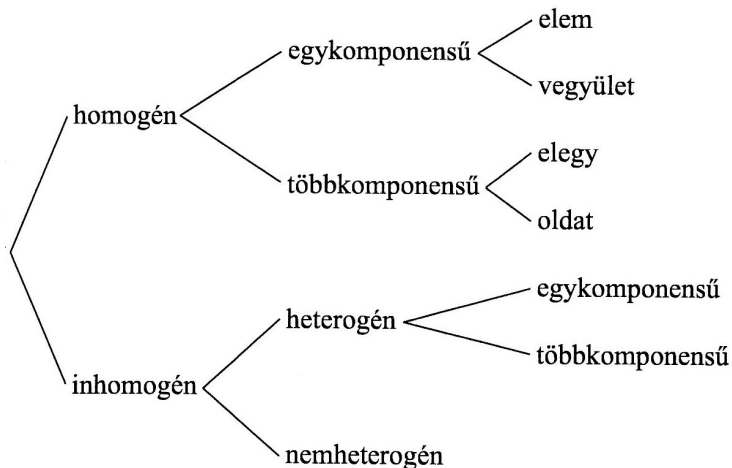
- **Boltzmann-képlet:** az entrópia és a termodinamikai valószínűség (Y : mikroállapotok száma) kapcsolata:

$$S = k \ln Y$$

- **Boltzmann-eloszlás:** az ϵ_i energiával rendelkező részecskék száma:

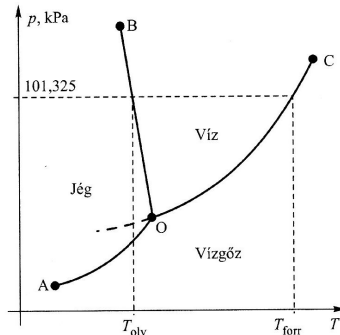
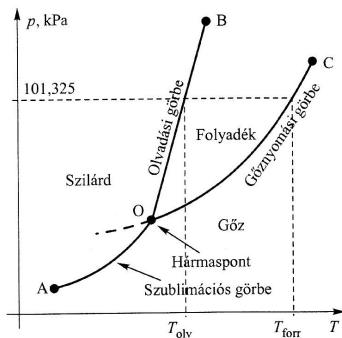
$$N_i = B \cdot e^{-\frac{\epsilon_i}{kT}}$$

Anyagi rendszerek csoportosítása



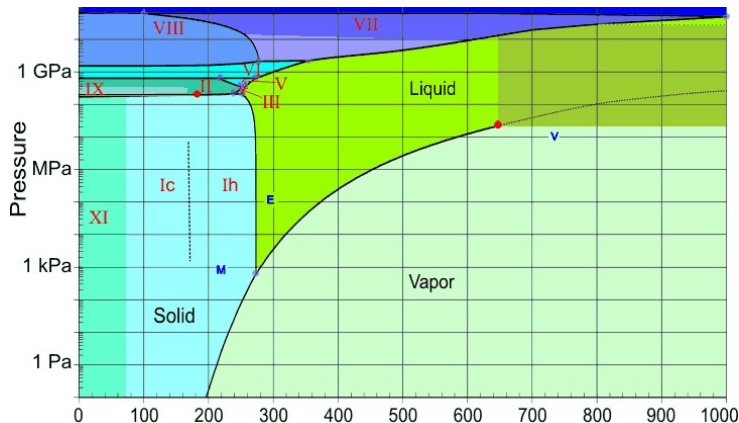
- Heterogén rendszerek: makroszkopikus határfelületek választják szét a különböző **fázisokat**
 - szilárd
 - folyadék
 - gáz
 - plazma
- Hőközlés/hőelvonás \Rightarrow intenzív paraméterek megváltoznak
jól meghatározott paramétereknél \Rightarrow
ugrásszerű változások: **fázisátalakulások**
 - halmazállapot-változások
 - polimorf átalakulások
- **Elsőrendű fázisátalakulások:** hirtelen változások (törések vannak az állapotjelzőkben), az átalakulás során nem változik a hőmérséklet, látens hő felvétele
pl. olvadás
- **Másodrendű fázisátalakulások** (folytonos fázisátalakulások)

Fázisdiagramok



- **Fázisegyensúly:** két (három) fázis egymással egyensúlyban van
- **Hármaspont:** a szilárd, a folyadék, és a gőz fázis egyensúlya
- **C pont: kritikus pont**

A víz fázisdiagramja



- <http://www.phy.duke.edu/~hsg/176/table-images/water-phase-diagram.html>

- Az olvadás oka: a hőmozgás (ha a hőmozgás elér egy kritikus értéket, a kristályrács felbomlik)
- **Olvadáspont** (T_{olv}): itt történik az olvadás (fázisegyensúly). Nyomásfüggő.
- Az olvadás teljes ideje alatt nem változik a rendszer hőmérséklete, a közölt hő az olvadásra fordítódik \Rightarrow
- **Olvadáshő**: L_{olv} (átalakulási hő / látens hő)
- Clausius-Clapeyron-egyenlet

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T\Delta V}$$

Víz esetén: olvadás = térfogatcsökkenés
ha p nő $\Rightarrow T_{olv}$ csökken

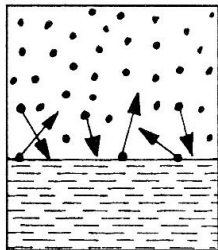
- Az olvadás fordított folyamata

$$T_{\text{olv}} = T_{\text{fagy}}$$

$$L_{\text{olv}} = L_{\text{fagy}}$$

- A kristályrács kialakulásához szükséges: **kristálygócok**
- **Túlhűtés:** kristálygócok hiányában T_{olv} alá csökkenthető a folyadék hőmérséklete
nem egyensúlyi állapot

- Folyadék \Rightarrow gőz
- A molekulák egy része elegendő energiához jut, hogy kijusson a folyadékból
- A visszamaradt folyadék lehűl



- Zárt edény \Rightarrow kialakul az egyensúly (\rightarrow **telített gőz**)
- Nyitott edény \Rightarrow a folyadék teljes egészében gőzzé alakul (\rightarrow **telítetlen gőz**)

- **Párolgáshő:** L_p

$$L_p = L_{p,B} + NkT$$

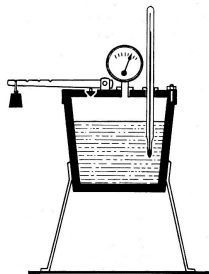
$$\left(\frac{\partial L_p}{\partial T} \right)_p = c_f - c_g$$

- Telített gőz nyomása: hőmérsékletfüggő (\rightarrow fázisdiagram)
- Clausius-Clapeyron-egyenlet \Rightarrow

$$p = Ae^{-\frac{L_{m,p}}{RT}}$$

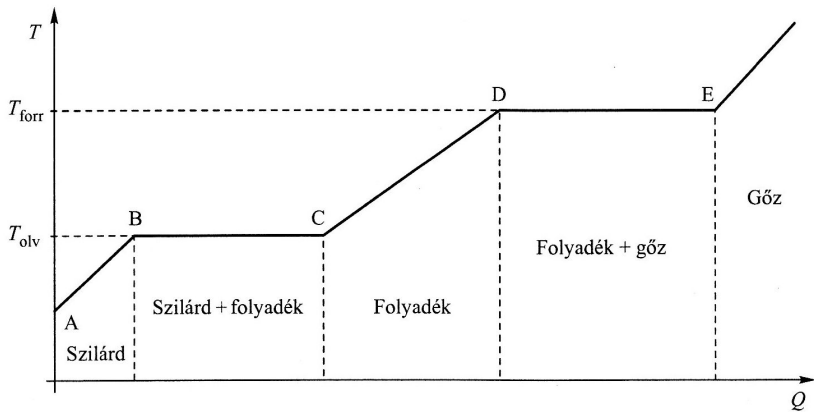
- Párolgási sebesség:
 - exponenciálisan növekszik a hőmérséklettel
 - függ a kilépési munkától (éter: gyors párolgás)
 - nagyobb felület \Rightarrow több molekula van a felületen
 - függ a párolgó felület melletti tér telítettségétől

- Ha a telített gőz nyomása = a külső nyomás \Rightarrow a folyadék belsejében is megindul a párolgás
- **Forráspont:** T_{forr}
- T_{forr} nyomásfüggő (\Rightarrow kukta)
- **Túlhevített folyadék**
tisztá, buborékmentes folyadék esetén T_{forr} fölé növelhetjük a hőmérsékletet



- A párolgással ellentétes folyamat
- Telített gőz nyomásának csökkentése / hőmérséklet csökkentése
- Lecsapódási hő (= párolgáshő)
- A lecsapódást elősegítik: apró szilárd részecskék (**kondenzációs magvak**)
- Túltelített gőz

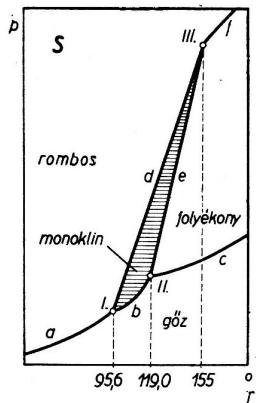
Halmazállapotok változása



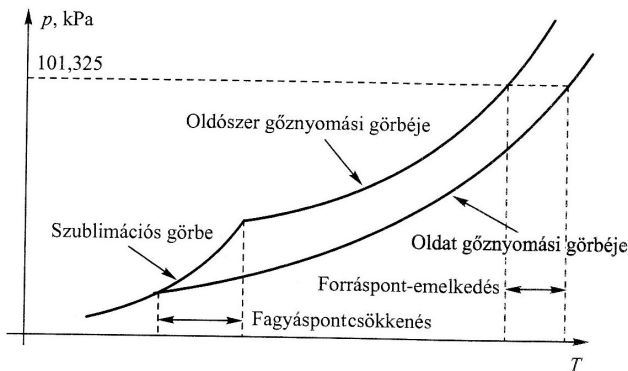
- Szilárd \rightarrow gőz
- Szublimációs nyomás
- Gyorsan szublimáló anyagok: kámfor, naftalin, jód

Polimorf átalakulások

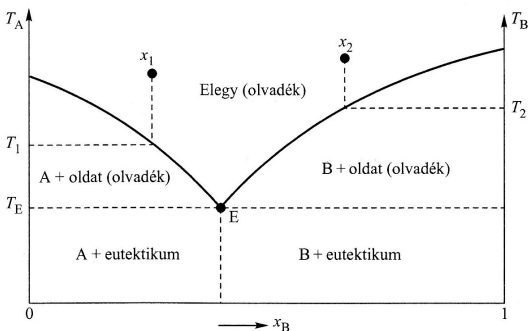
- szilárd anyagok hirtelen változása
 - kén módosulatai
 - kvarc módosulatai
 - grafit \rightleftharpoons gyémánt



- Forráspont emelkedése
- Fagyáspont csökkenése



- Forrás/párolgás \Rightarrow a gőz összetétele különbözik az eredeti aránytól
- Fagyás: eutektikum kialakulása



Folytonos fázisátalakulások

- Nincs látens hő
- A szabadenergia első deriváltja folytonos (a második már nem)

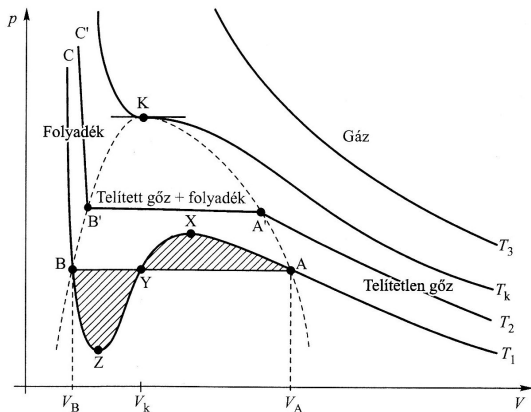
Példák:

- Szupravezető \rightleftharpoons normál vezető
- Ferromágnes \rightleftharpoons paramágnes (T_c)
- Szuperfolyékony hélium (He-II) \rightleftharpoons normál hélium

Gázok alacsony hőmérsékleten

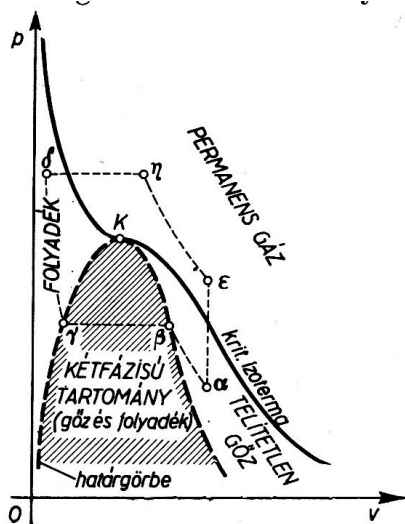
- Nem ideális gázok \Rightarrow van der Waals-féle állapotegyenlet:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$



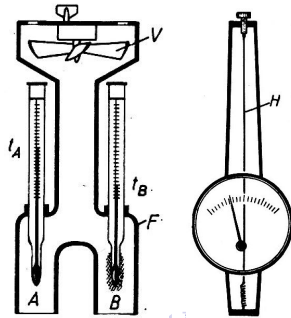
Gázok alacsony hőmérsékleten

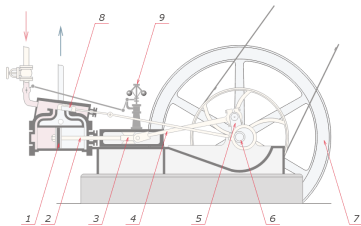
- **Kritikus hőmérséklet:** ezen hőmérséklet felett a gáz nem cseppfolyósítható
- $T > T_c \Rightarrow$ gáz
- $T < T_c \Rightarrow$ gőz / folyadék



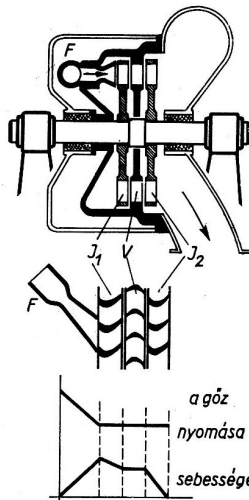
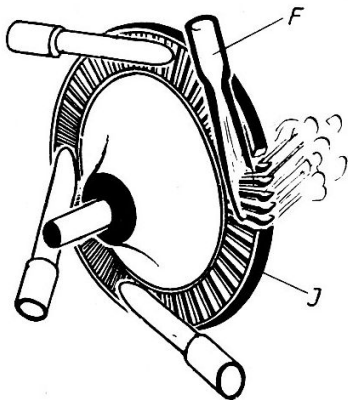
A levegő páratartalma

- Abszolút páratartalom (kg/m^3)
- Relatív páratartalom: mekkora a páratartalom a telített vízgőzhöz képest (%)
- Harmatpont: az a hőmérséklet, ahol a vízgőz telítetté válna
Ha a hőmérséklet ez alá hűl, a vízgőz kicsapódik
(\Rightarrow dér / zúzmara, felhők, csapadék)
- Az emberi tüdő normál működési tartománya: 40 – 70 %
- Páratartalom mérése: higrométer

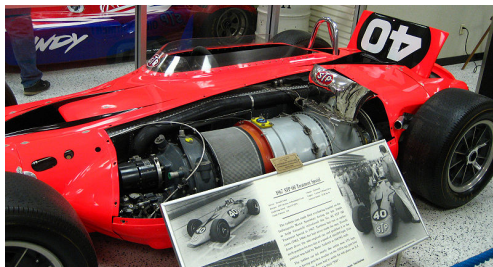
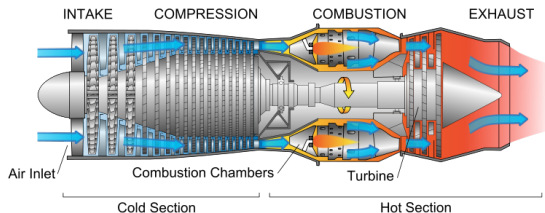




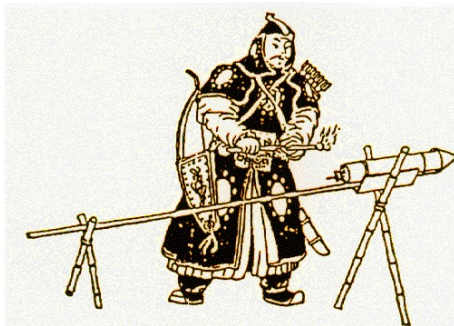
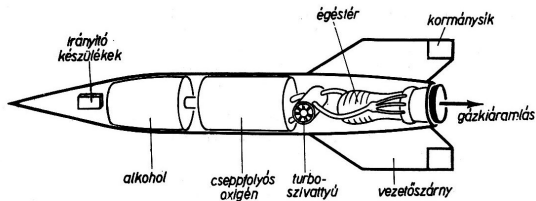
Gőzturbína



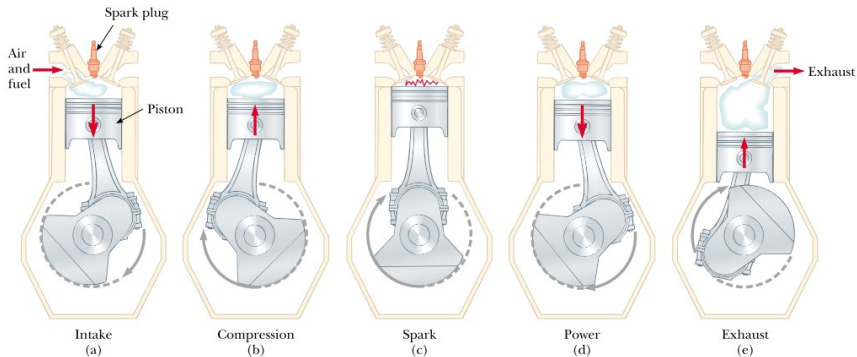
Gázturbína



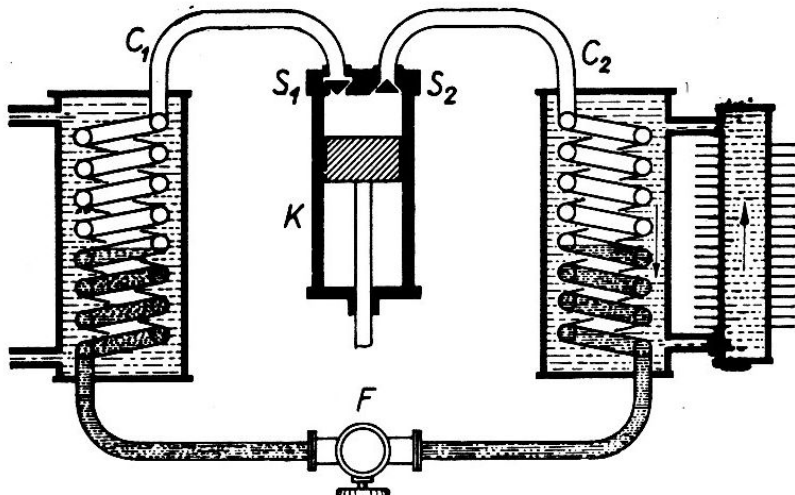
Rakétamotorok



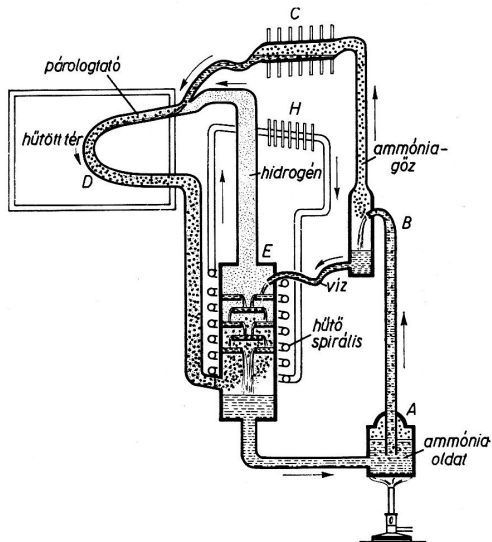
Otto-motor



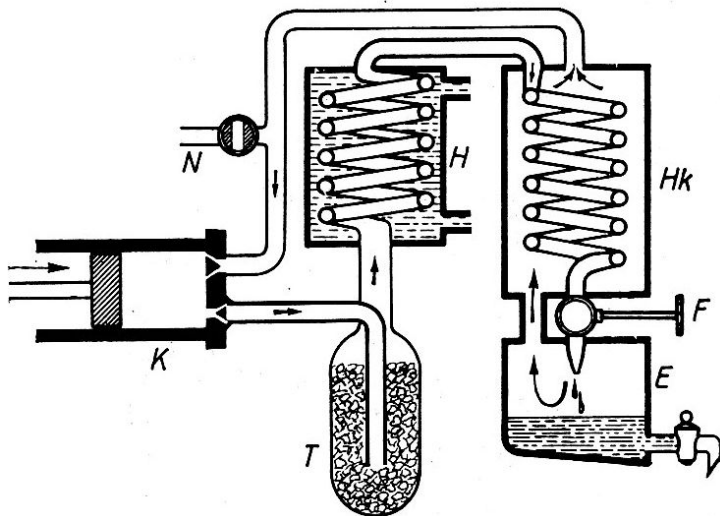
Kompresszoros hűtőgép



Abszorpciós hűtőgép



Gázok cseppfolyósítása: Linde-féle gép



- **Transzportfolyamat:** anyag, energia vagy más mennyiség az egyik helyről egy másikra jut
- Kiváltja: adott X intenzív mennyiség térbeli változása
Pl. koncentrációkülönbség, elektromos potenciál, hőmérséklet
- Hatására ΔY extenzív mennyiség $\Delta\tau$ idő alatt áthalad Y :
anyagmennyiség, tömeg, töltés, energia
- **Áramsűrűség:**

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\Delta Y}{A\Delta\tau}$$

- Onsager-egyenlet

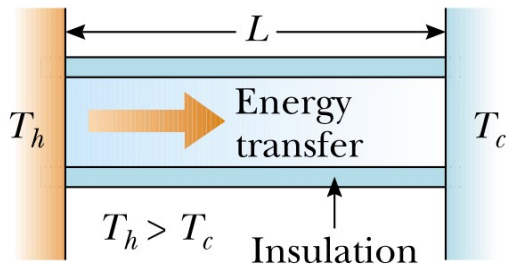
$$J \propto \Delta X$$

Termikus energia transzport

- Intenzív mennyiség: hőmérséklet
- Extenzív mennyiség: energia (hő)

Típusai:

- Hővezetés
- Hőáramlás
- Hősugárzás



- A hővezetést leíró egyenlet:

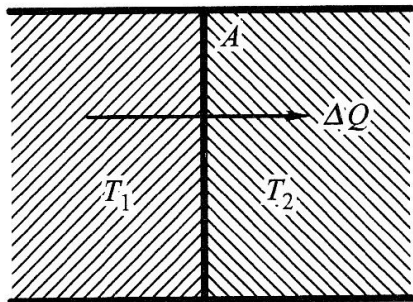
$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = -\lambda \frac{\Delta T}{l}$$

λ : hővezetési együttható (anyagfüggő), egysége:

$$\frac{\text{J}}{\text{msK}} = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

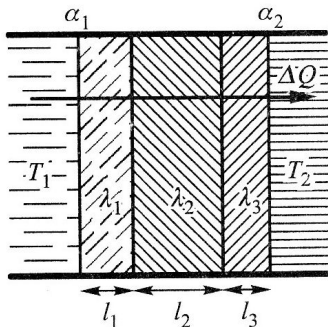
A hővezetési együttható

Anyag	λ , W/(m · K)	Anyag	λ , W/(m · K)
Szilárd anyagok:		Folyadékok:	
Alumínium	236	Víz	0,566
Beton	0,9		
Ezüst	429		
Fa	≈0,09		
Jég	2,21	Gázok:	
Polisztirol	0,01	Hélium	0,141
Réz	403	Hidrogén	0,167
Tégla	≈0,26	Levegő	0,0237
Üveg	≈0,8	Szén-dioxid	0,0145
Vas	≈60		



- α : hőátadási együttható

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = -\alpha \Delta T$$



- k : hőátviteli együttható

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = -k \Delta T$$

- R : hőellenállás

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \frac{A \Delta T}{\sum_i R_i}$$

Newton-féle lehűlési törvény

- Hővezetési egyenlet:

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = -\alpha \Delta T$$

- Ha a hőmérséklet változik:

$$\frac{dQ}{A d\tau} = -\alpha(T - T_s)$$

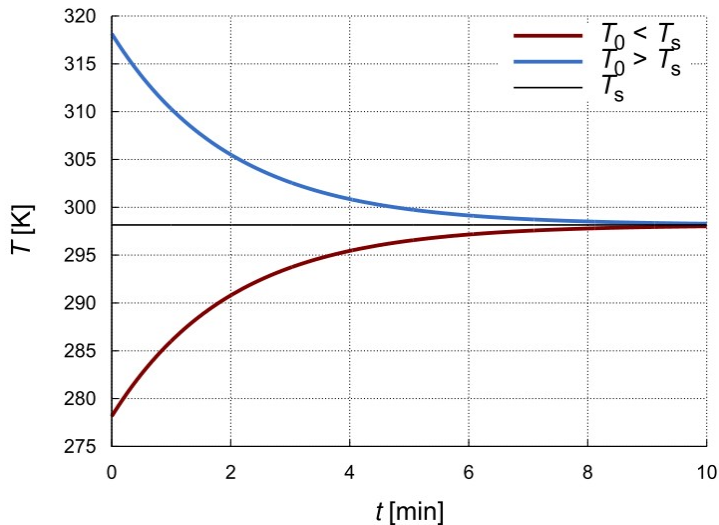
- Átrendezve:

$$\frac{C}{A} \frac{dT}{d\tau} = -\alpha(T - T_s)$$

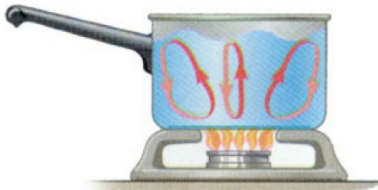
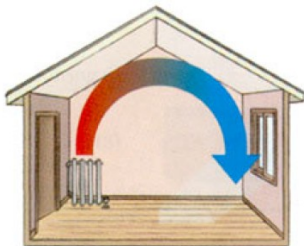
- Megoldva a differenciálegyenletet:

$$T = T_s + (T_0 - T_s)e^{-\frac{\alpha A}{C}\tau}$$

Newton-féle lehűlési törvény



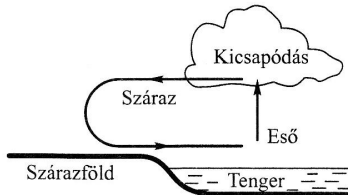
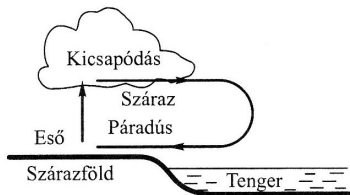
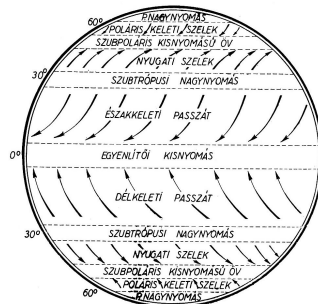
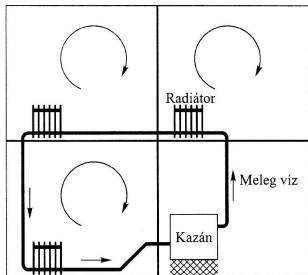
Hőáramlás



- A sűrűségkülönbség hatására indul meg
- α : hőáramlási együttható

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = -\alpha \Delta T$$

Hőáramlás



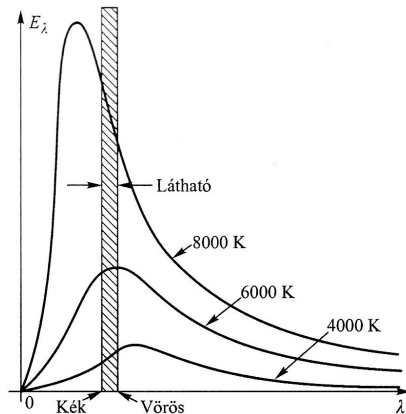
Hőszugárzás

- Magas hőmérséklet
⇒ elektromágneses sugárzás:
hőszugárzás
- **Stefan-Boltzmann-törvény:** a
kisugárzott hő

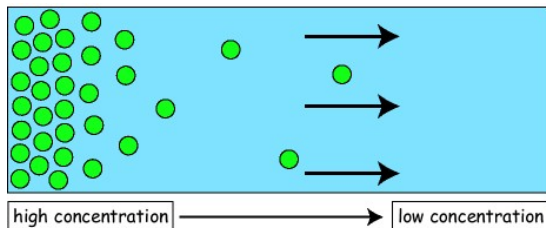
$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = \epsilon \sigma T^4$$

- Az átadott hő két különböző
hőmérsékletű test között:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4)$$



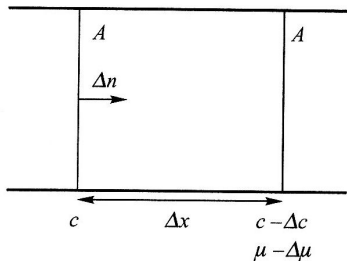
A diffúzió



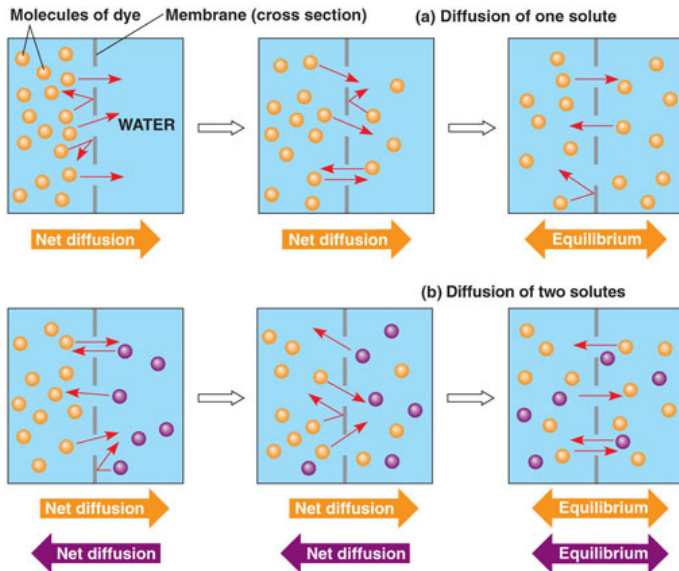
- Fick-törvény:

$$\frac{\Delta n}{A \Delta \tau} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

D : diffúziós együttható

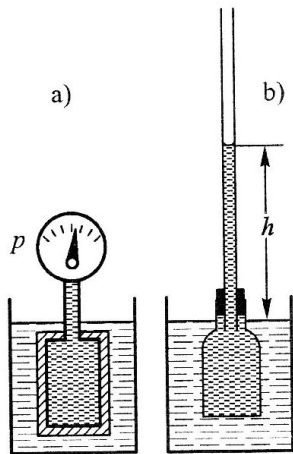


A diffúzió

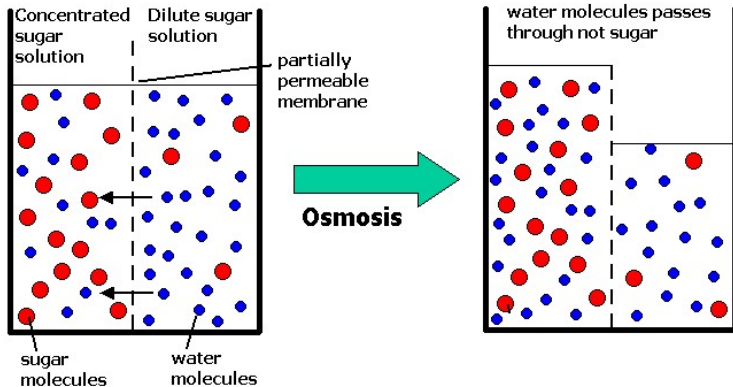


- Diffúzió \Rightarrow az anyag egyenletesen oszlik el
- Membránok, féligáteresztő hártyák: akadályozzák bizonyos részecskék mozgását (pl. oldott anyag)
 \Rightarrow ozmózisnyomás (Π)

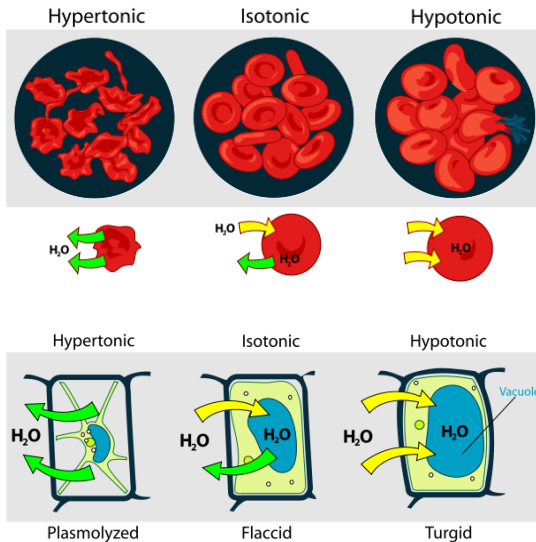
$$\Pi = cRT$$



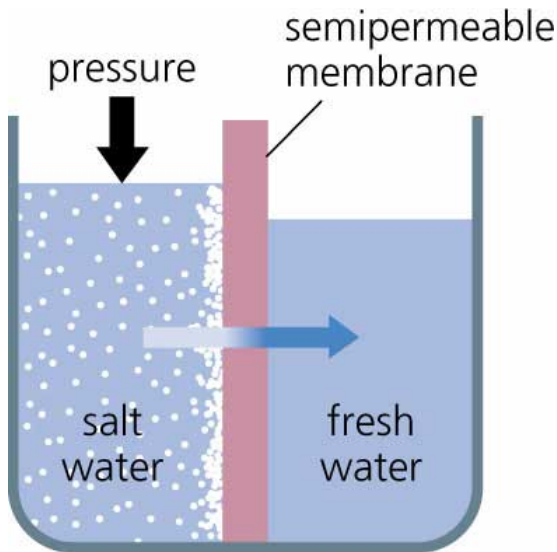
Ozmózis



Ozmózis élő szervezetekben



Fordított ozmózis



Precision Graphics

