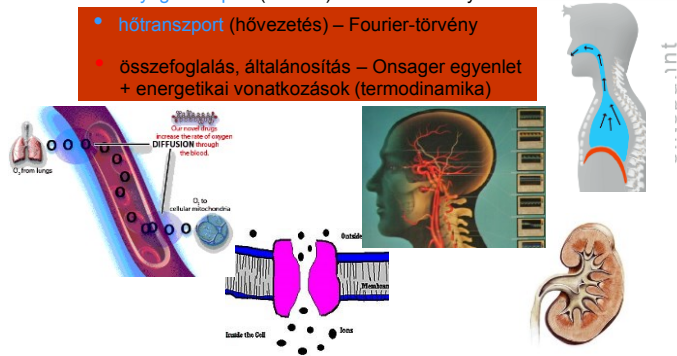


1

Transzportfolyamatok

- térfigatranszport (áramlás) – Hagen–Poiseuille-törvény
- (elektromos) töltéstranszport (elektr. áram) – Ohm-törvény
- anyagtranszport (diffúzió) – Fick 1. törvénye
- hőtranszport (hővezetés) – Fourier-törvény**
- összefoglalás, általánosítás – Onsager egyenlet + energetikai vonatkozások (termodinamika)



3

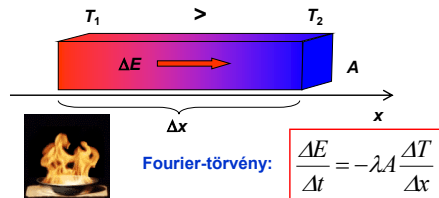
Hővezetés

energiaáram-erősség (I_E): $I_E = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ (J/s)

energiaáram-sűrűség (J_E): $J_E = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$ (J/(m²s) = W/m²)



J. B. J. Fourier
1768-1830
matematikus fizikus



Fourier-törvény: $\frac{\Delta E}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

λ — hővezető képesség
hővezetési együttható
J/(s·m²·K/m) = W/(m·K)

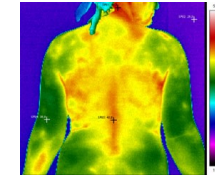
anyag	λ (W/(m·K))
ezüst	420
üveg	1
víz	0,6
izomszövet	0,4
zsírszövet	0,2
levegő	0,025

Limitált hőleadási lehetőség az ember számára!

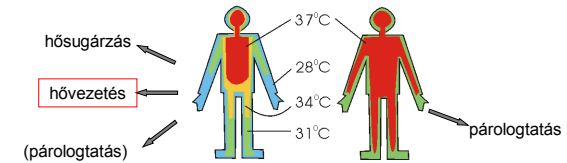
2

Az emberi test hőleadása

tevékenység	hő keletkezési ráta (W)
nyugalom	115
lassú séta	260
kerékpározás (15 km/h)	420
lépcsőzés (2/s)	700
futás (15 km/h)	1150



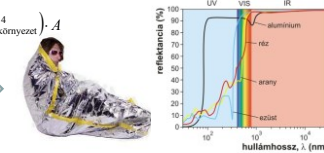
környezeti hőmérséklet
20°C ← 35°C



4

Hőleadási lehetőségek összefoglalása

■ **Hőmérsékleti sugárzás** $\Delta P = \sigma \cdot (T_{\text{test}}^4 - T_{\text{környezet}}^4) \cdot A$
 $T_{\text{test}} = 28^\circ\text{C}$ $T_{\text{környezet}} = 20^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta P = 83 \text{ W}$
 $T_{\text{környezet}} = 0^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta P = 290 \text{ W}!$



■ **Hővezetés** $P = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$ $T_{\text{test}} = 28^\circ\text{C}$ $T_{\text{környezet}} = 20^\circ\text{C} \Rightarrow P = 40 \text{ W}$
 ➢ levegő ↔ víz!
 ➢ áramlás (szél!)



- **Párolgatás**
- a víz nagy fajlagos párolgási hője (≈ 2400 kJ/kg 30°C-nál) !!
 - párolgatás: állandóan ≈ 50 ml/h ⇒ ≈ 35 W
szélsőséges körülmények között ≈ 1600 ml/h ⇒ ≈ 1000 W !!
 - áramlás (szél!)



5

Transzportfolyamatok összefoglalása

	Mi áramlik?	Erőssége?	Mi hajtja az áramlást?	Összefüggés?
töltés-transzport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
térfogat-transzport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$ $J_V = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
anyag-transzport	v	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$ $J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
hő-transzport	E	$J_E = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $J_E = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
általános	x_{ext} extenzív mennyiség	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$ áram-sűrűség	y_{int} intenzív mennyiség	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$ termodinamikai erő Onsager-összefüggés



6

Extenzív mennyiség: additív, transzportálódó mennyiség.

Intenzív mennyiség: nem-additív, kiegyenlítő mennyiség.

Egysúly: nincs transzportfolyamat.

Termodinamika 0. főtétele: egy rendszer akkor és csak akkor van egyensúlyban, ha az intenzív mennyiségek térbeli eloszlása homogén.

Intenzív mennyiségek térbeli eloszlása inhomogén \Rightarrow transzportfolyamat

Transzportfolyamat erőssége és iránya:

$$J = LX$$

Onsager-féle összefüggés

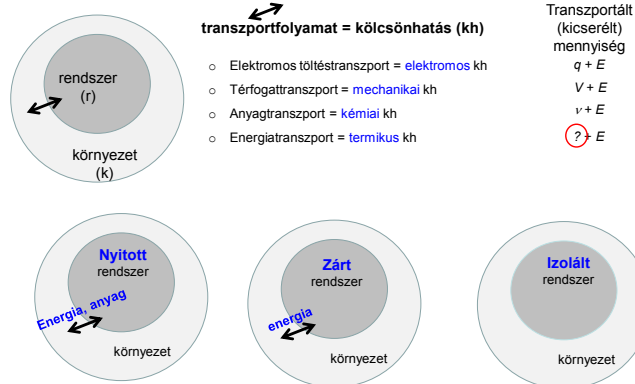
Folyamat iránya: homogén eloszlás \Rightarrow irreverzibilitás!

a termodinamika 2. főtétele

7

Energetikai vonatkozások (termodinamika)

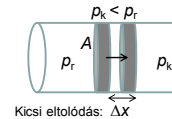
1. Új nomenklatúra



8

2. Energiacsere (munka) az egyes kölcsönhatásokban

a) Térfogattranszport = **mechanikai** kh



$$W_{\text{mech}} = -F \cdot \Delta x = -pA \cdot \Delta x = -p\Delta V \quad \text{Térfogati munka}$$

$$W_{\text{mech}} = -p\Delta V \quad (\text{ha } p = \text{konstans})$$

Megjegyzések:

$$-p_r \Delta V \neq -p_k \Delta V !!!$$

$$W_{\text{mech}, r} \neq W_{\text{mech}, k} !!!$$

\Rightarrow Nem igazi „energiacsere”, mert a rendszer által végzett munka nem egyenlő a környezet által végzett munkával. (A leadott mech. energia nem jelenik meg egy az egyben mech. energiaként a környezetben.)

$$-p_r \Delta V = -p_k \Delta V \quad \text{csak, ha } p_r = p_k$$

\Rightarrow Ekkor viszont nincs folyamat! Rendszer és környezete egyensúlyban vannak!

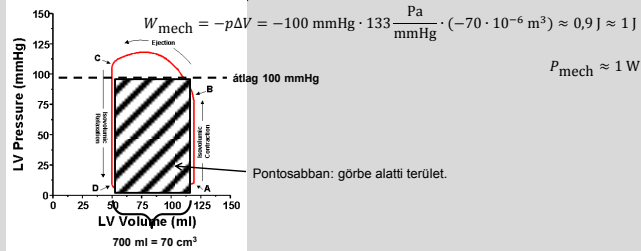
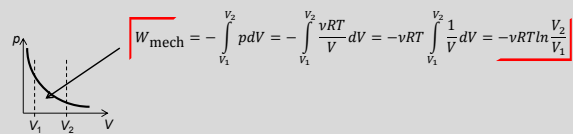
► Kompromisszum: egyensúlyi termodinamika, azaz folyamatok egyensúlyban („fából vaskarika”)

$p_r \neq p_k$ de $p_r \approx p_k$
+ kvázistacionárius folyamat („reverzibilis folyamat”)!
(kis lépésekben közel az egyensúlyhoz)
 $W_{\text{mech}, r} \approx W_{\text{mech}, k}$

9

Alkalmazás:

Szív bal kamrájának térfogati munkája:

Gáz izoterm tágulásakor végzett térfogati munka ($p \neq \text{konstans}$):

11

3. Belső energia (E): a rendszert alkotó részecskék kinetikus energiáinak és a közöttük lévő kölcsönhatások potenciális energiáinak összege

4. A termodinamika 1. főtétele:

Energiamegmaradás \Rightarrow

$$\Delta E = W_{\text{mech}} + W_{\text{elektr}} + W_{\text{kém}} + W_{\text{term}}$$

$$\Delta E = W + Q$$

$$\Delta E = -p\Delta V + \varphi\Delta q + \mu\Delta v + T\Delta S = \sum y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$$

Megjegyzés: $-\Delta E_r = -\Delta E_k$, de pl. $W_{\text{mech}, r} \neq W_{\text{mech}, k}$,
legfolyjabb akkor, ha reverzibilis a folyamat.
– a folyamat irányát nem adja meg!

5. Entrópia (S) – fenomenológikus meghatározás:

$$Q = W_{\text{term}} = T\Delta S \Rightarrow \text{Az entrópia definíciója: } \Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{K}}\right) \quad (T = \text{konstans})$$

Feltétel: reverzibilis folyamat, azaz $Q_{\text{rev}, \text{rendszer}} = Q_{\text{rev}, \text{környezet}}$

$$\text{Ha } T \neq \text{konstans, akkor } \Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

10

b) Elektromos töltéstranszp. = **elektromos** kh: $W_{\text{elektr}} = \varphi\Delta q$ ($\varphi = \text{konstans}$)

c) Általánosítás a fenti két eset alapján: $W = y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$ ($y_{\text{int}} = \text{konstans}$)

d) Anyagtranszport = **kémiai** kh: $W_{\text{kém}} = \mu\Delta v$ ($\mu = \text{konstans}$)

$$\text{Ha } \mu \neq \text{konstans, akkor: } W_{\text{kém}} = v \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{c_2}{c_1}$$

Példa: A vese koncentrációs munkája (kémiai munka) a glükóz reszorpciónál:



„A vese egy nap alatt kb. 0,8 mol glükózt reszorból kb. 100-szoros koncentrációnövekedés ellenében.” (Élettan) \Rightarrow

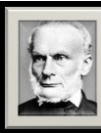
$$W_{\text{kém}} = vRT \ln \frac{c_2}{c_1} = 0,8 \cdot 8,31 \cdot 310 \cdot \ln 100 \approx 9500 \text{ J}$$

$$P_{\text{kém}} = \frac{9500}{24 \cdot 3600} \approx 0,1 \text{ W}$$

e) Energiatranszport = **termikus** kh:

$$W_{\text{term}} (= Q) = T\Delta? = T\Delta S \quad (T = \text{konstans})$$

Rudolf Julius
Emmanuel Clausius
(1822-1888), fizikus



entrópia
(entrepein (*gr*) = visszafordítani)

12

6. A termodinamika 2. főtétele: izolált rendszerben a folyamatok az intenzív mennyiségek kiegyenlítődése irányában zajlanak.

Példa: koncentráció (általánosabban: kémiai potenciál) kiegyenlítődése a rendszer (r) és környezete (k) között.

Feltételek:

- termikus egyensúly, azaz $T_r = T_k = T$
- fix fal \Rightarrow mechanikai kh nincs
- szigetelő fal \Rightarrow elektromos kh nincs

$$\text{energiamegmaradás} \Rightarrow \Delta E_r = -\Delta E_k \rightarrow \Delta E_r + \Delta E_k = 0$$

$$\text{anyagmegmaradás} \Rightarrow \Delta v_r = -\Delta v_k$$

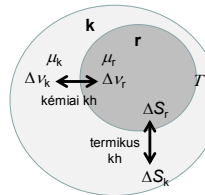
$$1. \text{ főtétel} \Rightarrow \Delta E_r = \mu_r \cdot \Delta v_r + T \cdot \Delta S_r \rightarrow \Delta S_r = \frac{\Delta E_r - \mu_r \cdot \Delta v_r}{T}$$

$$\Delta E_k = \mu_k \cdot \Delta v_k + T \cdot \Delta S_k \rightarrow \Delta S_k = \frac{\Delta E_k - \mu_k \cdot \Delta v_k}{T}$$

Az összentrópia változás:

$$\Delta S = \Delta S_r + \Delta S_k = \frac{\Delta E_r - \mu_r \cdot \Delta v_r}{T} + \frac{\Delta E_k - \mu_k \cdot \Delta v_k}{T} =$$

$$= \frac{\Delta v_r}{T} \cdot (\mu_k - \mu_r)$$



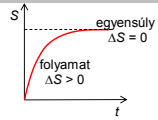
	$(\mu_k - \mu_r)$	$\frac{\Delta v_r}{T}$	ΔS
$\mu_k < \mu_r$	negatív	negatív	pozitív
$\mu_k > \mu_r$	pozitív	pozitív	pozitív
$\mu_k = \mu_r$	= 0	= 0	= 0

Az összes lehetőség:



13

ΔS csak pozitív (vagy 0) lehet, azaz S a folyamat során mindenképpen nő (ill. egyensúlyban állandó)



⇒ A 2. főtétel alternatív megfogalmazása és az entrópia egy fontos tulajdonsága.

A termodinamika 2. főtétele (alternatív megfogalmazás): Izolált rendszerben a folyamatok az entrópia növekedés irányában zajlanak.

Az **entrópia** nem megmaradó mennyiség, kiegyenlítődési folyamatok során „termelődik”

⇒ Az univerzum „hőhalála” („entrópia halál”)

entropy

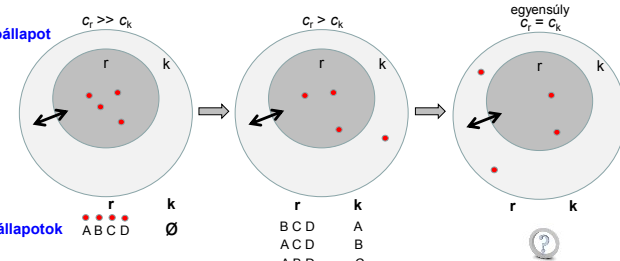


14

7. Entrópia (S) – statisztikus meghatározás:

A példa ugyanaz: koncentráció kiegyenlítődés — 4 molekulával A-val, B-vel, C-vel és D-vel

makroállapot

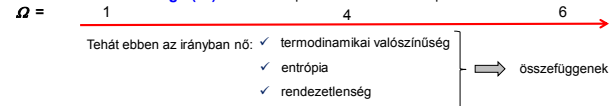


mikroállapotok

r : A B C D
 k : \emptyset
 r : B C D
 k : A
 r : A C D
 k : B
 r : A B D
 k : C
 r : A B C
 k : D

Egy makroállapot

termodinamikai valószínűség (Ω): a makroállapothoz tartozó mikroállapotok száma.



15

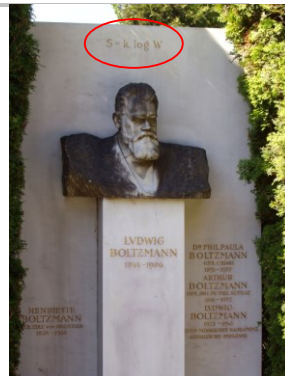
entrópia

termodinamikai
valószínűség

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

Boltzmann-
állandó

Az entrópia a „rendezetlenség mértéke”.



Ludwig Eduard
Boltzmann
(1844-1906)
fizikus