

Klasszikus fizika

Termodinamika II.

Horváth András, SZE GIVK

v 0.9



Oktatási célra szabadon terjeszthető

Cél: munkát állítani elő valahonnan.

A hőerőgépek célja: **Hőből** munkát előállítani.

Cél: munkát állítani elő valahonnan.

A hőerőgépek célja: **Hőből** munkát előállítani.

Sokáig tartott felismerni, hogy **semmitől** nem lehet energiát előállítani.

(Energiamegmaradás törvénye.)

A termodinamika I. főtétele is ezt fejezi ki: $\Delta E = Q + W$.

Cél: munkát állítani elő valahonnan.

A hőerőgépek célja: **Hőből munkát előállítani.**

Sokáig tartott felismerni, hogy **semmiből nem lehet energiát előállítani.**

(Energiamegmaradás törvénye.)

A termodinamika I. főtétele is ezt fejezi ki: $\Delta E = Q + W$.

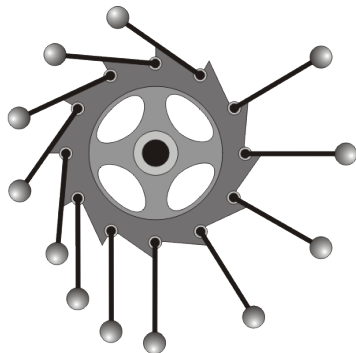
Korábban sokan kísérleteztek **örökmozgó**
(perpetuum mobile) létrehozásával.

Sok ezer cseles gép: egyik sem működött.

A semmiből nem lehet mozgást létrehozni.

Pontosabban:

Nincs olyan gép, mely környezetén munkát végez, de ő visszatér eredeti állapotába és a környezetétől sem vesz fel energiát.



A hőerőgépek ötlete

Termodinamika I. főtétele: $\Rightarrow$ Egy gép csak akkor tud munkát végezni környezetén, saját állapotának megváltozása nélkül, ha munkát vagy hőt vesz fel valahonnan.

- Ha munkát vesz fel valahonnan és munkát ad le, akkor az csak átalakító.
(Ezek is fontosak, de valakinek munkavégzést kell először előállítania.)

A hőerőgépek ötlete

Termodinamika I. főtétele: $\Rightarrow$ Egy gép csak akkor tud munkát végezni környezetén, saját állapotának megváltozása nélkül, ha munkát vagy hőt vesz fel valahonnan.

- Ha munkát vesz fel valahonnan és munkát ad le, akkor az csak átalakító.
(Ezek is fontosak, de valakinek munkavégzést kell először előállítania.)
- **Hő felvételéből munka előállítása: hőerőgép.**

A hőerőgépek ötlete

Termodinamika I. főtétele: $\Rightarrow$ Egy gép csak akkor tud munkát végezni környezetén, saját állapotának megváltozása nélkül, ha munkát vagy hőt vesz fel valahonnan.

- Ha munkát vesz fel valahonnan és munkát ad le, akkor az csak átalakító.
(Ezek is fontosak, de valakinek munkavégzést kell először előállítania.)
- **Hő felvételéből munka előállítása: hőerőgép.**

Munkából hő: könnyű, 100% hatásfokkal megy. (Pl. súrlódás.)

Hőből munka: csak korlátozottan!

Végső ok: a hő „rendezetlen” energiát jelent.

A kérdés fontossága

Emberi és állati munkavégzés: erős korlátok.

A technikai civilizáció egyik legfontosabb alapja a munkavégző gépek megjelenése.

Erőgépek nélkül a mai életszínvonal, tudományos szint, életminőség, ...
nem lenne tartható.

A kérdés fontossága

Emberi és állati munkavégzés: erős korlátok.

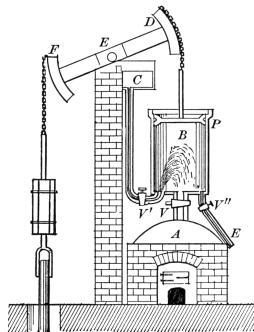
A technikai civilizáció egyik legfontosabb alapja a munkavégző gépek megjelenése.

Erőgépek nélkül a mai életszínvonal, tudományos szint, életminőség, ... nem lenne tartható.

Probléma: ha kis hatékonyságúak az erőgépek, akkor:

- kevés hasznos munka áll a rendelkezésre
- bizonyos feladatok el sem végezhetők
- pazarlás: nagy környezeti hatás

Dilemma: Lemondani az erőgépekről vagy fejleszteni őket?



Alapok ideális gáz esetén (ismétlés)

Állandó nyomáson: $W = -p\Delta V$, általában: $W = -\int_{V_1}^{V_2} p(V)dV$

Alapok ideális gáz esetén (ismétlés)

Állandó nyomáson: $W = -p\Delta V$, általában: $W = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$

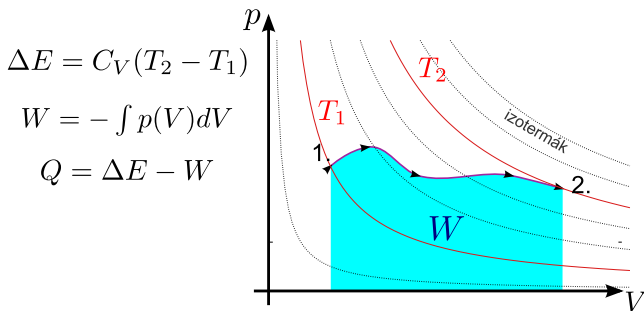
$$\Delta E = C_v \Delta T = C_v (T_2 - T_1) = \frac{f}{2} n R (T_2 - T_1)$$

Alapok ideális gáz esetén (ismétlés)

Állandó nyomáson: $W = -p\Delta V$, általában: $W = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$

$$\Delta E = C_V \Delta T = C_V (T_2 - T_1) = \frac{f}{2} nR (T_2 - T_1)$$

$$Q = \Delta E - W, \quad pV = nRT = NkT$$



Fontos állapotváltozások: izoterm

$$pV = p_1 V_1 = \text{áll.}$$

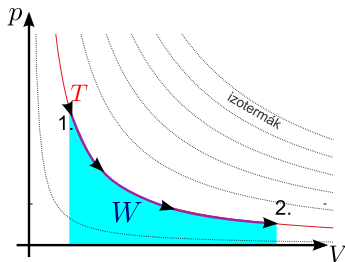
$$\Delta E = C_V(T_2 - T_1) = 0$$

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1}{V} dV = p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$Q = -W = -p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

A hő kifejezését átírva:

$$Q = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Fontos állapotváltozások: izobár

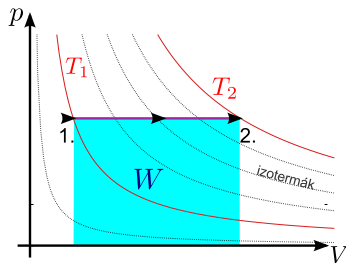
$$V/T = \text{áll.}$$

$$\Delta E = C_V(T_2 - T_1)$$

$$W = -p(V_2 - V_1)$$

$$Q = \Delta E - W = C_V(T_2 - T_1) + p(V_2 - V_1)$$

$$Q = C_p(T_2 - T_1)$$



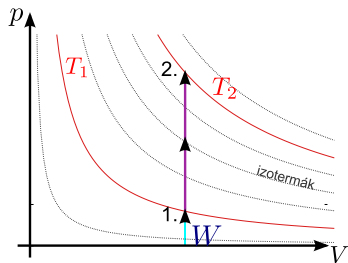
Fontos állapotváltozások: izochor

$$V = \text{áll.}$$

$$\Delta E = C_V(T_2 - T_1)$$

$$W = 0$$

$$Q = \Delta E = C_V(T_2 - T_1)$$



Fontos állapotváltozások: adiabatikus

$$pV^\kappa = p_1 V_1^\kappa = \text{áll.}$$

$$TV^{\kappa-1} = T_1 V_1^{\kappa-1} = \text{áll.}$$

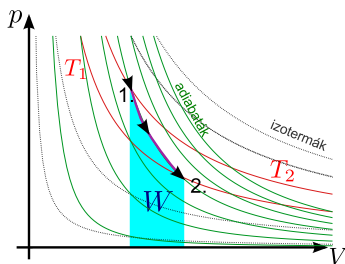
$$\Delta E = C_V(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0$$

$$W = -\Delta E = -C_V(T_2 - T_1)$$

Másrészről a munka:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^\kappa}{V^\kappa} dV = p_1 V_1^\kappa \frac{V_2^{1-\kappa} - V_1^{1-\kappa}}{1-\kappa}$$



Körfolyamatok

A fenti alap folyamatok bármelyike hasznos munkát végez táguláskor.

De: **Egy egyirányú táulás csak egyszeri munkaforrás!**

Energiatárolónak jó, de nem erőgépnek.

(Használat: sűrített levegővel hajtott járművek.)

Körfolyamatok

A fenti alap folyamatok bármelyike hasznos munkát végez táguláskor.

De: **Egy egyirányú táulás csak egyszeri munkaforrás!**

Energiatárolónak jó, de nem erőgépnek.

(Használat: sűrített levegővel hajtott járművek.)

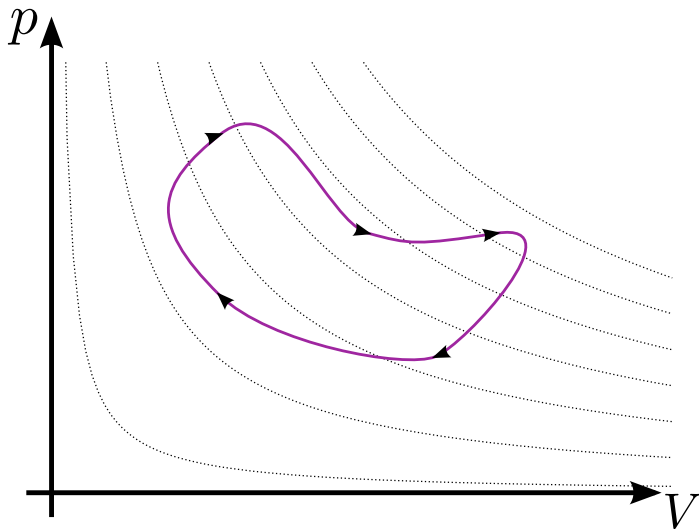
Folytonos működéshez a rendszernek vissza kell térnie eredeti állapotába!

Elnevezés: **Körfolyamat.**

A körfolyamatok bizonyos szakaszaiban a gép felvesz, másban lead hőt, néha ő végez munkát, máskor rajta végeznek munkát, ...

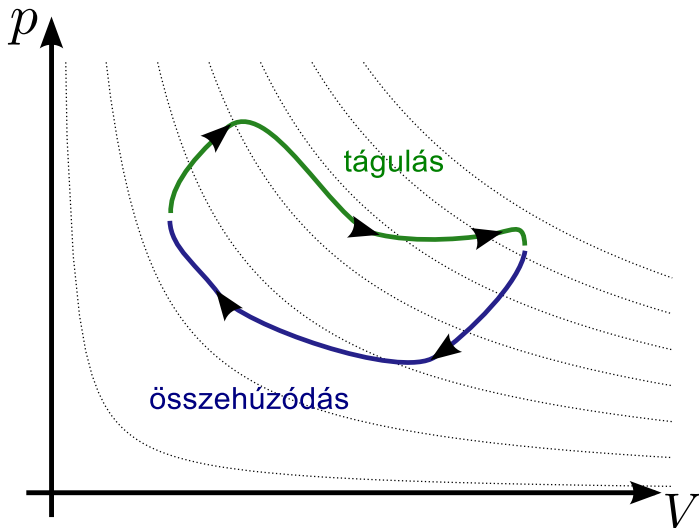
Ha ugyanoda visszatér: **Az egy kör alatti össz hő és munka számít.**

Egy általános körfolyamat.



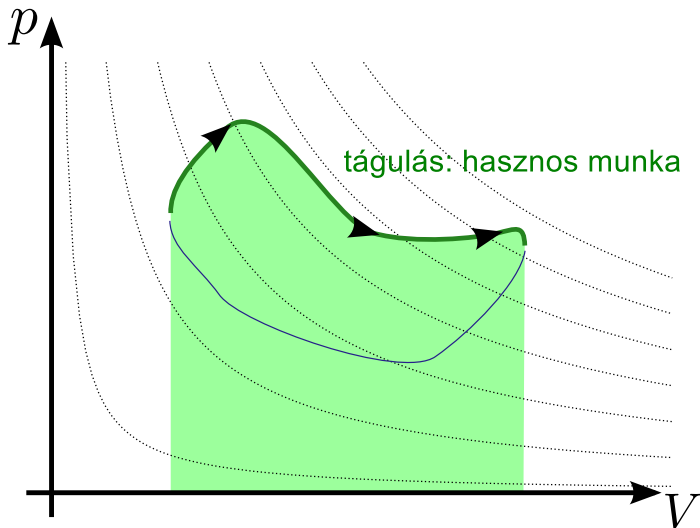
Nézzünk egy általános körfolyamatot!

Egy általános körfolyamat.



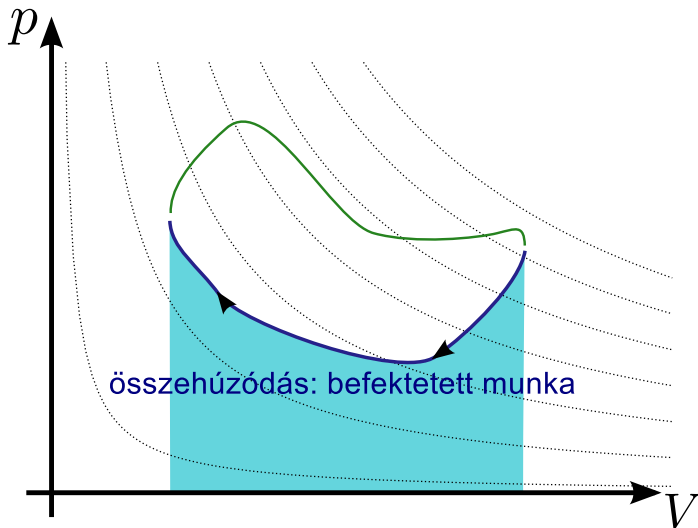
A folyamat felében tágult, felében összehúzódott a gáz.

Egy általános körfolyamat.



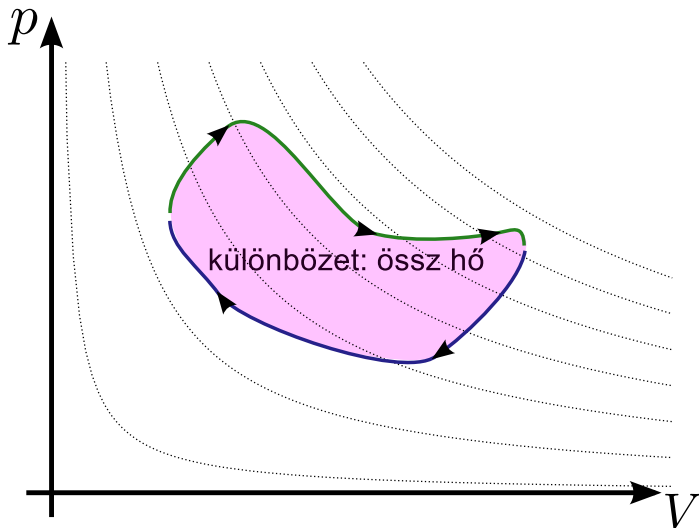
A táguláskor hasznos munkát végzett.

Egy általános körfolyamat.



Az összehúzódságkor ő végzett munkát a környezetén.

Egy általános körfolyamat.



A két munka különbsége a felvett (és nettó munkává alakult) hő.

A Carnot-ciklus

A Carnot-ciklus egy idealizált körfolyamat, mely optimális hatásfokú és viszonylag könnyű végigszámolni.

Négy fázis:

- 1 izoterm tágulás
- 2 adiabatikus tágulás
- 3 izoterm összehúzódás
- 4 adiabatikus összehúzódás

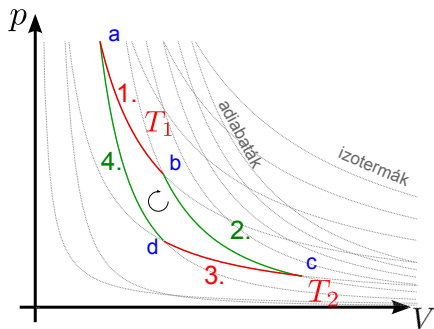
A Carnot-ciklus

A Carnot-ciklus egy idealizált körfolyamat, mely optimális hatásfokú és viszonylag könnyű végigszámolni.

Négy fázis:

- ❶ izoterm tágulás
- ❷ adiabatikus tágulás
- ❸ izoterm összehúzódás
- ❹ adiabatikus összehúzódás

Az első 2 fázisban ő végez munkát, a másodikban rajta végeznek.



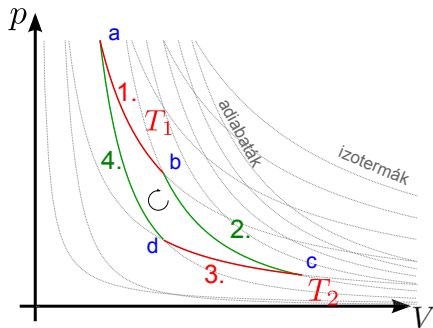
A Carnot-ciklus

A Carnot-ciklus egy idealizált körfolyamat, mely optimális hatásfokú és viszonylag könnyű végigszámolni.

Négy fázis:

- ❶ izoterm tágulás
- ❷ adiabatikus tágulás
- ❸ izoterm összehúzódás
- ❹ adiabatikus összehúzódás

Az első 2 fázisban ő végez munkát, a másodikban rajta végeznek.



Fontos: a folyamat során legyen elhanyagolható a súrlódási hő.
Ilyenkor a folyamat megfordítható: **reverzibilis**.

A Carnot-ciklus: a hőtartályok szerepe

A Carnot-ciklus megvalósításához szüksége van két, állandó hőmérsékletű hőtartályra:

- T_1 : magas hőmérsékletű tartály: innen Q_1 hőt vesz fel az 1-es szakaszban
- T_2 : alacsony hőmérsékletű tartály: ide Q_2 hőt ad le a 3-a szakaszban
- az adiabatikus szakaszokon (2 és 4-es) nincs hőcsere

Feltételezzük, hogy a tartályok sokkal nagyobb hőkapacitásúak, mint a gépünk, így a folyamat során állandó hőmérsékletűek maradnak.

Kell a két hőtartály!

Ha csak meleg tartály lenne, nem tudnánk visszahűteni a rendszert!

„Tartály” alatt persze bonyolult hőcserélőt, égésszabályzót, stb. is érthetünk.

Carnot-ciklus: felvett és leadott hő

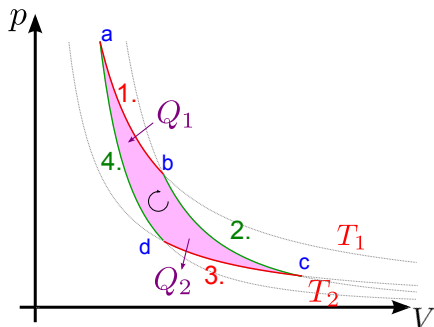
Hőfelvétel: izoterm szakaszokon.

$$Q_1 = nRT_1 \ln(V_b/V_a) > 0$$

$$Q_2 = nRT_2 \ln(V_d/V_c) < 0$$

Ezért:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_a} + \ln \frac{V_d}{V_c} \right)$$



Carnot-ciklus: felvett és leadott hő

Hőfelvétel: izoterm szakaszokon.

$$Q_1 = nRT_1 \ln(V_b/V_a) > 0$$

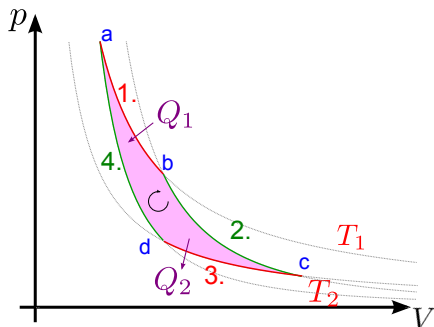
$$Q_2 = nRT_2 \ln(V_d/V_c) < 0$$

Ezért:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_a} + \ln \frac{V_d}{V_c} \right)$$

Páronként 1-1 adiabatán vannak: „a”-„d” és „b”-„c”

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_c} + \ln \frac{V_d}{V_a} \right) =$$



Carnot-ciklus: felvett és leadott hő

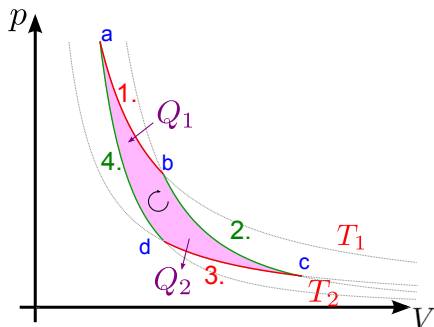
Hőfelvétel: izoterm szakaszokon.

$$Q_1 = nRT_1 \ln(V_b/V_a) > 0$$

$$Q_2 = nRT_2 \ln(V_d/V_c) < 0$$

Ezért:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_a} + \ln \frac{V_d}{V_c} \right)$$



Páronként 1-1 adiabatán vannak: „a”-„d” és „b”-„c”

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_c} + \ln \frac{V_d}{V_a} \right) = nR \left(\ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(\kappa-1)} + \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1/(\kappa-1)} \right)$$

Carnot-ciklus: felvett és leadott hő

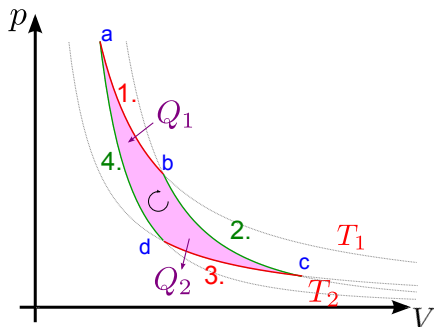
Hőfelvétel: izoterm szakaszokon.

$$Q_1 = nRT_1 \ln(V_b/V_a) > 0$$

$$Q_2 = nRT_2 \ln(V_d/V_c) < 0$$

Ezért:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_a} + \ln \frac{V_d}{V_c} \right)$$



Páronként 1-1 adiabatán vannak: „a”-„d” és „b”-„c”

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = nR \left(\ln \frac{V_b}{V_c} + \ln \frac{V_d}{V_a} \right) = nR \left(\ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(\kappa-1)} + \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1/(\kappa-1)} \right)$$

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

Carnot-ciklus: hasznos munka

Hasznos munka ideális esetben: $W = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$.

(Figyelem: $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$!)

Carnot-ciklus: hasznos munka

Hasznos munka ideális esetben: $W = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$.
 (Figyelem: $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$!)

Használjuk fel $Q_1/T_1 = |Q_2|/T_2$ -t:

$$W = Q_1 - Q_1 \frac{T_2}{T_1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Carnot-ciklus: hasznos munka

Hasznos munka ideális esetben: $W = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$.
 (Figyelem: $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$!)

Használjuk fel $Q_1/T_1 = |Q_2|/T_2$ -t:

$$W = Q_1 - Q_1 \frac{T_2}{T_1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

A kinyerhető munka nem lehet egyenlő a felvett hővel!

Arány: hatásfok (elvi maximális)

$$\eta_0 = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Carnot-ciklus: hasznos munka

Hasznos munka ideális esetben: $W = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$.
 (Figyelem: $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$!)

Használjuk fel $Q_1/T_1 = |Q_2|/T_2$ -t:

$$W = Q_1 - Q_1 \frac{T_2}{T_1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

A kinyerhető munka nem lehet egyenlő a felvett hővel!

Arány: hatásfok (elvi maximális)

$$\eta_0 = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Bebizonyítható: Nemcsak ideális gáz állapotegyenletnél van ez így!

Carnot-ciklus: hatásfok

A valódi hatásfok ennél csak kisebb lehet a veszteségek miatt.

$$\eta < \eta_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Példák hozzávetőleges adatokkal:

- Gőzgép: $T_1 = 120^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$

$$\eta_0 = \frac{393 - 293}{393} = 0,254 = 25,4\%$$

- Belső égésű motor: $T_1 = 600^\circ\text{C}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$

$$\eta_0 = \frac{873 - 293}{873} = 0,550 = 55,0\%$$

A valóságban a súrlódás, hőveszteség és a nem pontos körfolyamat-tartás miatt a hatásfok ennél kisebb!

Carnot-ciklus: hatásfok és kompresszióarány

Törekedni kell a nagy T_1/T_2 arányra:

$$T_1/T_2 = (V_c/V_b)^{\kappa-1}$$

T_1/T_2 akkor lesz nagy, ha

- **Kompresszióarány (V_c/V_b) nagy.**
Növelhető a dugattyúmozgás geometriájának változtatásával.
- **$\kappa = (f + 2)/f = 1 + 2/f$ nagy.**
Gáz adottsága: csekély hatással lehetünk rá.

Carnot-ciklus: hatásfok és kompresszióarány

Törekedni kell a nagy T_1/T_2 arányra:

$$T_1/T_2 = (V_c/V_b)^{\kappa-1}$$

T_1/T_2 akkor lesz nagy, ha

- **Kompresszióarány (V_c/V_b) nagy.**
Növelhető a dugattyúmozgás geometriájának változtatásával.
- **$\kappa = (f + 2)/f = 1 + 2/f$ nagy.**
Gáz adottsága: csekély hatással lehetünk rá.

Sok-sok probléma. Pl.

- Nagy kompresszióarány: **nagy csúcsnyomás.**
Nagy szilárdság kell.
- Nagy kompresszióarány: **nagy csúcshőmérséklet.**
Nem kívánt kémiai reakciók, alkatrészek hőtűrése.

(Részletek más tárgyakban: Hő és áramlástan, Belső égésű motorok, ...)

Alapötlet

Egy izotermán belül mozogva nincs belső energia változás.
Akármilyen úton megyek át két izoterma közt, ΔE ugyanaz.

Alapötlet

Egy izotermán belül mozogva nincs belső energia változás.

Akármilyen úton megyek át két izoterma közt, ΔE ugyanaz.

Egy adiabatán belül mozogva nincs hőfelvétel.

Akármilyen úton megyek át két adiabata közt, „valami” ugyanannyit változik.

De mi ez a valami?

Alapötlet

Egy izotermán belül mozogva nincs belső energia változás.

Akármilyen úton megyek át két izoterma közt, ΔE ugyanaz.

Egy adiabatán belül mozogva nincs hőfelvétel.

Akármilyen úton megyek át két adiabata közt, „valami” ugyanannyit változik.

De mi ez a valami?

Az előzőek szerint ez a hő és a hőmérséklet hányadosa!

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

Elnevezés: Entrópia.

Alapötlet

Egy izotermán belül mozogva nincs belső energia változás.

Akármilyen úton megyek át két izoterma közt, ΔE ugyanaz.

Egy adiabatán belül mozogva nincs hőfelvétel.

Akármilyen úton megyek át két adiabata közt, „valami” ugyanannyit változik.

De mi ez a valami?

Az előzőek szerint ez a hő és a hőmérséklet hányadosa!

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

Elnevezés: Entrópia.

Ez egy izoterma mentén ($T=\text{áll.}$) igaz. Általában:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Az entrópia állapotjelző

Ha kiválasztunk egy energia 0-pontot, minden izotermára megmondható, mennyi energiával juttatható el oda.

Az entrópia állapotjelző

Ha kiválasztunk egy energia 0-pontot, minden izotermára megmondható, mennyi energiával juttatható el oda.

Ha kiválasztunk egy entrópia 0-pontot, minden adiabatára megmondható, mennyi hővel juttatható el oda.

Az entrópia állapotjelző

Ha kiválasztunk egy energia 0-pontot, minden izotermára megmondható, mennyi energiával juttatható el oda.

Ha kiválasztunk egy entrópia 0-pontot, minden adiabatára megmondható, mennyi hővel juttatható el oda.

Az entrópia állapotjelző!

Két pont közti megváltozása nem függ az úttól, csak a kezdő és végponttól!
Hasonlít a mechanikai potenciális energiához.

Az entrópia állapotjelző

Ha kiválasztunk egy energia 0-pontot, minden izotermára megmondható, mennyi energiával juttatható el oda.

Ha kiválasztunk egy entrópia 0-pontot, minden adiabatára megmondható, mennyi hővel juttatható el oda.

Az entrópia állapotjelző!

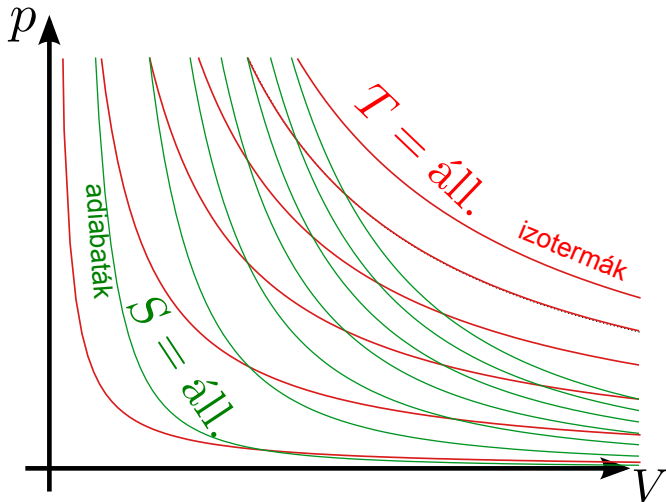
Két pont közti megváltozása nem függ az úttól, csak a kezdő és végponttól!
Hasonlít a mechanikai potenciális energiához.

Elvi számítási mód $\Delta S = S_B - S_A$ kiszámítására:

- 1 Melyik adiabatákon van rajt a két pont?
- 2 Mennyi a két adiabatát összekötő egy izoterma (T) során átadott hő (Q)?
- 3 $\Delta S = Q/T$

Adiabaták=izentropikus vonalak

Az adiabaták mentén S nem változik.



Az adiabatákat nevezhetjük **izentropikus vonalaknak**.

Az I. főtétele átírása

$$\Delta E = Q + W = T\Delta S - p\Delta V$$

Az I. főtétele átírása

$$\Delta E = Q + W = T\Delta S - p\Delta V$$

Érdekes szimmetria: hasonló szerepek.

T és p , valamint S és V hasonlóan viselkedik.

Az I. főtétele átírása

$$\Delta E = Q + W = T\Delta S - p\Delta V$$

Érdekes szimmetria: hasonló szerepek.

T és p , valamint S és V hasonlóan viselkedik.

Elnevezés: (korábban is bevezethető lett volna)

- **Extenzív állapotjelzők:** Két rendszer egyesítésekor összeadódnak.
Pl. S és V .
- **Intenzív állapotjelzők:** Két rendszer egyesítésekor kiegyenlítődnek.
Pl. T és p .

De miért egyenlítődnek ki az intenzív állapotjelzők?

A termodinamika II. főtétele

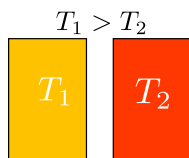
Kísérletekből:

Zárt rendszer olyan állapotra törekszik, melyben az össz entrópia a lehető legnagyobb értéket veszi fel.

A termodinamika II. főtétele

Kísérletekből:

Zárt rendszer olyan állapotra törekszik, melyben az össz entrópia a lehető legnagyobb értéket veszi fel.

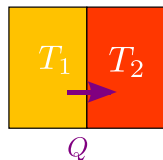


Hőcsere iránya:

Érintsünk össze két testet.

Az entrópia-változások:

$$\Delta S_1 = -Q/T_1, \quad \Delta S_2 = Q/T_2$$

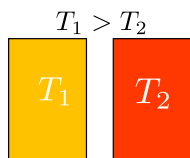


$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = Q(T_1 - T_2) \frac{1}{T_1 T_2}$$

A termodinamika II. főtétele

Kísérletekből:

Zárt rendszer olyan állapotra törekszik, melyben az össz entrópia a lehető legnagyobb értéket veszi fel.

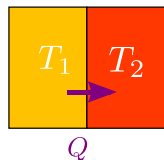


Hőcsere iránya:

Érintsünk össze két testet.

Az entrópia-változások:

$$\Delta S_1 = -Q/T_1, \quad \Delta S_2 = Q/T_2$$



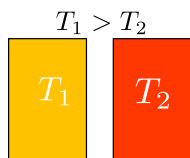
$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = Q(T_1 - T_2) \frac{1}{T_1 T_2}$$

A II. főtétele szerint $\Delta S \geq 0$, azaz $Q(T_1 - T_2) > 0$:

A termodinamika II. főtétele

Kísérletekből:

Zárt rendszer olyan állapotra törekszik, melyben az össz entrópia a lehető legnagyobb értéket veszi fel.

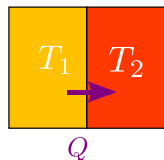


Hőcsere iránya:

Érintsünk össze két testet.

Az entrópia-változások:

$$\Delta S_1 = -Q/T_1, \quad \Delta S_2 = Q/T_2$$



$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = Q(T_1 - T_2) \frac{1}{T_1 T_2}$$

A II. főtétel szerint $\Delta S \geq 0$, azaz $Q(T_1 - T_2) > 0$:

Q és $T_1 - T_2$ előjele megegyezik.

A hőmérséklet zárt rendszer részei közt kiegyenlítődésre törekszik.

Nyomáskiegyenlítőzés

Ha egy rendszer össz energiája állandó, akkor $\Delta E = T\Delta S - p\Delta V$ miatt:

$$\Delta S = \frac{p}{T}\Delta V$$

Nyomáskiegyenlítőds

Ha egy rendszer össz energiája állandó, akkor $\Delta E = T\Delta S - p\Delta V$ miatt:

$$\Delta S = \frac{p}{T}\Delta V$$

Ha a két rendszer csak egymás rovására táguhat, akkor $\Delta V_1 = -\Delta V_2$.

Össz entrópia-változás:

$$\Delta S = \frac{p_1}{T}\Delta V_1 - \frac{p_2}{T}\Delta V_1 = \frac{1}{T}(p_1 - p_2)\Delta V_1$$

A II. főtétele szerint ez is pozitív, azaz $\Delta V_1(p_1 - p_2) > 0$.

$p_1 > p_2$ esetén $\Delta V_1 > 0$, azaz a nagyobb nyomású fog tágujni.

A nyomások is kiegyenlítődsre törekszenek.

A termodinamika II. főtétele: miért?

Mi az oka a II. főtételeknek?

Entrópia: „a rendezetlen energiaátadás (hő) fajlagos mértéke”.

Nagy entrópia = nagy „rendezetlenség”.

A magukra hagyott rendszerekben az entrópia növekszik.

Egybeesik a hétköznapi tapasztalattal...

A termodinamika II. főtétele: miért?

Mi az oka a II. főtételeknek?

Entrópia: „a rendezetlen energiaátadás (hő) fajlagos mértéke”.

Nagy entrópia = nagy „rendezetlenség”.

A magukra hagyott rendszerekben az entrópia növekszik.

Egybeesik a hétköznapi tapasztalattal...

Rövidesen pontosabban elmagyarázzuk.

A másodfajú örökmozgók

Energiamegmaradás: nem lehet munkavégzést a semmiből teremteni.

Termodinamika I. főtétele: nincs elsőfajú örökmozgó.

A másodfajú örökmozgók

Energiamegmaradás: nem lehet munkavégzést a semmiből teremteni.

Termodinamika I. főtétele: nincs elsőfajú örökmozgó.

Entrópianövekedés: nem lehet hőből munkát 100% hatásfokkal előállítani.

Termodinamika II. főtétele: nincs másodfajú örökmozgó.

A másodfajú örökmozgók

Energiamegmaradás: nem lehet munkavégzést a semmiből teremteni.

Termodinamika I. főtétele: nincs elsőfajú örökmozgó.

Entrópianövekedés: nem lehet hőből munkát 100% hatásfokkal előállítani.

Termodinamika II. főtétele: nincs másodfajú örökmozgó.

Nagy kár!

Ha lenne másodfajú örökmozgó, akkor hulladék hőből munkavégzést nyerhetnénk.

Hulladék hő: gyakorlatilag korlátlan energiaforrás.

Az elsőfajú örökmozgók hamar lebuktathatók. A másodfokúak nem mindig.

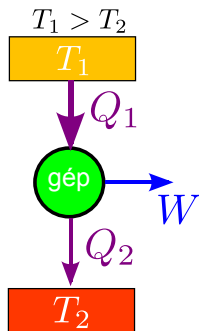
Sok tévedés/csalás épít ma is másodfokú örökmozgóra!

(A fizikusok örülnének ilyennek. Nincs összeesküvés, ami ezt elnyomja!)

Elvi maximális hatásfok

(Q_1 és Q_2 az abszolút értékek.)

A gép entrópiája nem változhat:

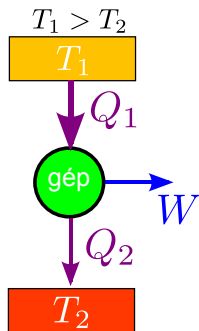


$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

Elvi maximális hatások

(Q_1 és Q_2 az abszolút értékek.)

A gép entrópiája nem változhat:



$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

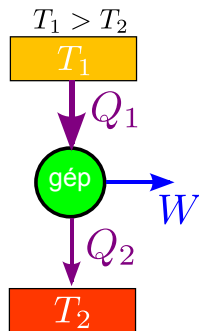
ezért

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 - Q_1 \frac{T_2}{T_1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

Elvi maximális hatásfok

(Q_1 és Q_2 az abszolút értékek.)

A gép entrópiája nem változhat:



$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

ezért

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 - Q_1 \frac{T_2}{T_1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

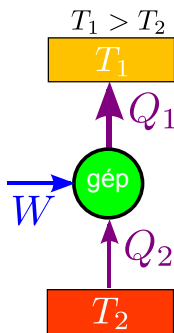
Hatásfok: (elvi, ha a gép entrópiája tényleg állandó)

$$\eta_0 = \frac{W}{Q_1} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Ez ugyanaz, mint fentebb, de most általánosabban bebizonyítottuk.

A hőszivattyú

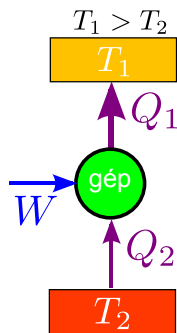
Fordítva üzemeltetett hőerőgép: munkából hőt állít elő.
A gép entrópiája nem változhat:



$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

A hőszivattyú

Fordítva üzemeltetett hőerőgép: munkából hőt állít elő.
A gép entrópiája nem változhat:



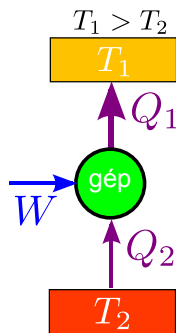
ezért

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

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

A hőszivattyú

Fordítva üzemeltetett hőerőgép: munkából hőt állít elő.
A gép entrópiája nem változhat:



ezért

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}$$

Innen:

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

$$\eta_s = \frac{Q_1}{W} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

A befektetett W munka sokszorosa lehet a hasznosított hő!

Ezzel hidegről meleg fele is szivattyúzhatunk hőt. (Hőszivattyú, hűtőgép.)

Mi is az az entrópia?

A molekuláris gázelméletnél láttuk, hogy az állapotjelzőknek valamilyen mikroszkopikus jellemző feleltethető meg. Pl:

- **Hőmérséklet:** egy szabadsági fokra jutó átlagenergia konstansszorosa.
- **Belső energia:** a testet alkotó részecskék össz energiája.
- **Nyomás:** átlagosan mennyi lendületet adnak át a részecskék a fal egységnyi felületének egységnyi idő alatt.
- **Entrópia:** ???

Mi is az az entrópia?

A molekuláris gázelméletnél láttuk, hogy az állapotjelzőknek valamilyen mikroszkopikus jellemző feleltethető meg. Pl:

- **Hőmérséklet:** egy szabadsági fokra jutó átlagenergia konstansszorosa.
- **Belső energia:** a testet alkotó részecskék össz energiája.
- **Nyomás:** átlagosan mennyi lendületet adnak át a részecskék a fal egységnyi felületének egységnyi idő alatt.
- **Entrópia:** ???

Amit tudunk:

- $\Delta S = Q/T$.
- S állapotjelző (extenzív).
- Zárt rendszerben S nem csökkenhet.

Mi is az az entrópia?

A molekuláris gázelméletnél láttuk, hogy az állapotjelzőknek valamilyen mikroszkopikus jellemző feleltethető meg. Pl:

- **Hőmérséklet:** egy szabadsági fokra jutó átlagenergia konstansszorosa.
- **Belső energia:** a testet alkotó részecskék össz energiája.
- **Nyomás:** átlagosan mennyi lendületet adnak át a részecskék a fal egységnyi felületének egységnyi idő alatt.
- **Entrópia:** ???

Amit tudunk:

- $\Delta S = Q/T$.
- S állapotjelző (extenzív).
- Zárt rendszerben S nem csökkenhet.

A rendezetlen energiaközléssel (hő) kapcsolatos.
 S valahogy az állapot „rendezetlenségét” méri.

A rendezetlenség értelmezése: a statisztikus fizika

A 19. században ismerték fel biztosan, hogy az anyag kis részecskékből áll. Ezek száma igen nagy (12 g szén $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ atom.)

Csak a részecskék statisztikai jellemzőiről tudunk beszélni:

Statisztikus fizika.

A rendezetlenség értelmezése: a statisztikus fizika

A 19. században ismerték fel biztosan, hogy az anyag kis részecskékből áll. Ezek száma igen nagy (12 g szén $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ atom.)

Csak a részecskék statisztikai jellemzőiről tudunk beszélni:

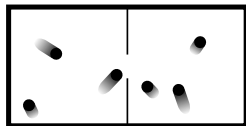
Statisztikus fizika.

A témakör bonyolultabb annál, hogy bizonyításokat adhassunk ebben a kurzusban.

Csak alapgondolatokat közlünk.

Egyszerű gondolatkísérlet

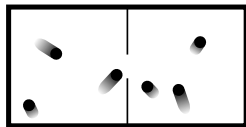
Két részre osztott tartály, lyukkal a falon.
A részecskék szabadon repkedhetnek.
Csak azt figyeljük, melyik oldalon vannak.



Ha a részecskék mindegyike egyenlő eséllyel bukkan fel a bal és a jobb oldalon, akkor lesz-e valami statisztikai szabályszerűség az eloszlásukban?

Egyszerű gondolatkísérlet

Két részre osztott tartály, lyukkal a falon.
A részecskék szabadon repkedhetnek.
Csak azt figyeljük, melyik oldalon vannak.



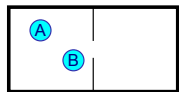
Ha a részecskék mindegyike egyenlő eséllyel bukkan fel a bal és a jobb oldalon, akkor lesz-e valami statisztikai szabályszerűség az eloszlásukban?

Alapfogalmak:

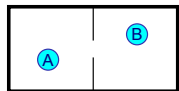
- **Mikroállapot:** az összes részecske helyét megadjuk.
- **Makroállapot:** csak azt adjuk meg, melyik térfélen mennyi részecske van.

A lényeg a makroállapot, mert ez határozza meg a nyomást, hőmérsékletet, stb.

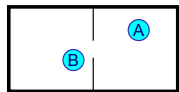
Egyszerű gondolatkísérlet: 2 részecske



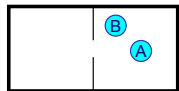
2 | 0



1 | 1



1 | 1



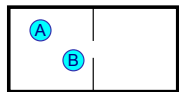
0 | 2

Mikroállapotok száma: 4.

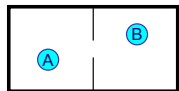
Makroállapotok száma: 3.

2 mikroállapot ugyanának a makroállapotnak (1|1) felel meg!

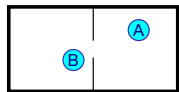
Egyszerű gondolatkísérlet: 2 részecske



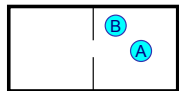
2 | 0



1 | 1



1 | 1



0 | 2

Mikroállapotok száma: 4.

Makroállapotok száma: 3.

2 mikroállapot ugyanának a makroállapotnak (1|1) felel meg!

Véletlenszerű mozgás: minden mikroállapot egyforma valószínűségű.

Az „1|1” makroállapot valószínűbb, mint a másik kettő!

Egyszerű gondolatkísérlet: 4 részecske

mikroállapotok

ABCD		4 0
------	--	-------

ABC	D
ABD	C
ACD	B
BCD	A

3 | 1

makroállapotok

	ABCD	0 4
--	------	-------

D	ABC
C	ABD
B	ACD
A	BCD

1 | 3

AB	CD
AC	BD
AD	BC
BC	AD
BD	AC
CD	AB

2 | 2

Mikroállapotok száma: 16.

Makroállapotok száma: 5.

A „2|2” makroállapot a legvalószínűbb.

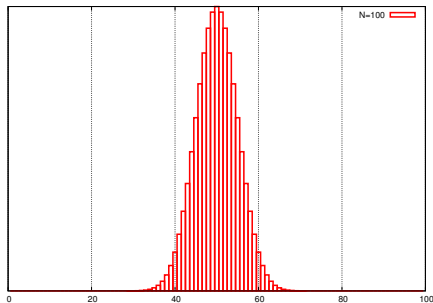
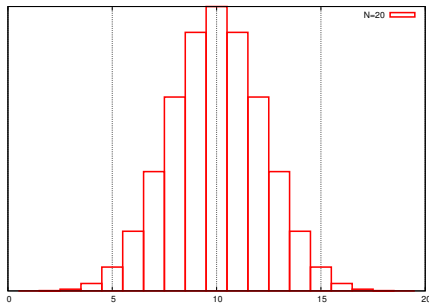
Egyszerű gondatkísérlet: N részecske

Mikroállapotok száma: 2^N .

Makroállapotok száma: $N + 1$.

„ $k|N - k$ ”-hoz tartozó mikroállapotok száma: $\Omega(k) = \binom{N}{k}$

Valószínűségszámítás: ez egyre erősebben $k_0 = N/2$ -nél csúcsosodik ki.



1 mol gázban $N = N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$! Csak elhanyagolható eltérések $N/2$ -től.

Az entrópia és a mikroállapotok száma

19. század: J.C. Maxwell, L. Boltzmann, és mások:

$$S = k \ln \Omega$$

Egy makroállapot entrópiája az azt megvalósító mikroállapotok számának természetes alapú logaritmusának Boltzmann-állandó-szorosa.

Az entrópia és a mikroállapotok száma

19. század: J.C. Maxwell, L. Boltzmann, és mások:

$$S = k \ln \Omega$$

Egy makroállapot entrópiája az azt megvalósító mikroállapotok számának természetes alapú logaritmusának Boltzmann-állandó-szorosa.

Hogy ez miért ugyanaz, mint ahogy fent bevezettük ($\Delta S = Q/T$), azt itt nem bizonyítjuk.

Az érezhető, hogy ez a statisztikus entrópia is ott lesz maximális, ahol egyenletesen oszlanak el a részecskék a lehetséges állapotok közt.

Az entrópia és a mikroállapotok száma

19. század: J.C. Maxwell, L. Boltzmann, és mások:

$$S = k \ln \Omega$$

Egy makroállapot entrópiája az azt megvalósító mikroállapotok számának természetes alapú logaritmusának Boltzmann-állandó-szorosa.

Hogy ez miért ugyanaz, mint ahogy fent bevezettük ($\Delta S = Q/T$), azt itt nem bizonyítjuk.

Az érezhető, hogy ez a statisztikus entrópia is ott lesz maximális, ahol egyenletesen oszlanak el a részecskék a lehetséges állapotok közt.

Most már tudjuk, milyen értelemben „rendezetlenség” az entrópia:

Két állapot közül az a rendezetlenebb, amelyiket több mikroállapot valósít meg.