



TÁMOP-4.1.1.F-14/1/KONV-2015-0006

Duális és moduláris képzésfejlesztés

ALKALMAZOTT MŰSZAKI HŐTAN

Prof. Dr. Keszthelyi-Szabó Gábor

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



TÁMOP-4.1.1.F-14/1/KONV-2015-0006

Duális és moduláris képzésfejlesztés

Aktív hőtranszport. Tetszőleges körfolyamat, Carnot körfolyamat. Elemi körfolyamat- párok vizsgálata. A hő átalakítása mechanikai munkává, munkát adó technikai körfolyamatok.

Prof. Dr. Keszthelyi-Szabó Gábor

2. előadás

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Problémafelvetés

Hogyan lehetséges egy termodinamikai rendszerből folyamatosan hasznos munkát nyerni?

Hasznos munkát a rendszer expanziója
(nyomáscsökkenés és térfogat-növekedés) során
nyerhetünk.

Szükségünk van tehát arra, hogy a TDR
„expanzióképes” állapotba kerüljön.

„Expanzióképes” a TDR közeg, ha a nyomása és a
hőmérséklete kellően ”nagy”.

„Expanzióképes” TDR előállítása: mechanikai
energia (kompresszió – nyomásnövelés) és hőenergia
(hőmérsékletnövelés) felhasználásával.

A körfolyamat

Ciklikusan ismétlődő állapotváltozások sorozata, melynek során a TDR ismételten „expanzióképes állapotba kerül és/vagy ad le,

- munkát végez és/vagy a környezet végez rajta munkát.

Tetszőleges körfolyamat

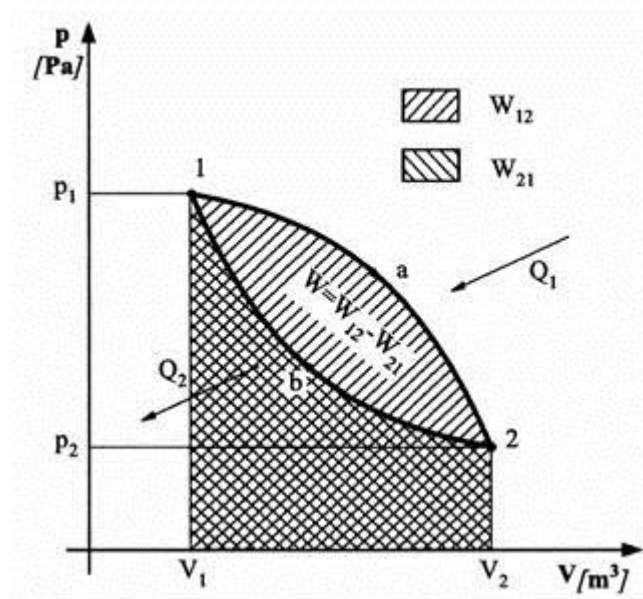
Az olyan termodinamikai folyamatokat, melyeknél a **kezdeti és a végállapot jellemzői megegyeznek**, körfolyamatoknak nevezzük.

A körfolyamat megismételhetőségét a műszaki gyakorlatban általában **gázcserével** érik el. Ezen **valóságos** körfolyamatok **nyitott** modellnek tekintendők. Az **elméleti** vagy ideális körfolyamatokban nincs gázcsere, a rendszer **zárt**.

A kapott hasznos munka:

$$W_h = |Q_{be}| - |Q_{el}|$$

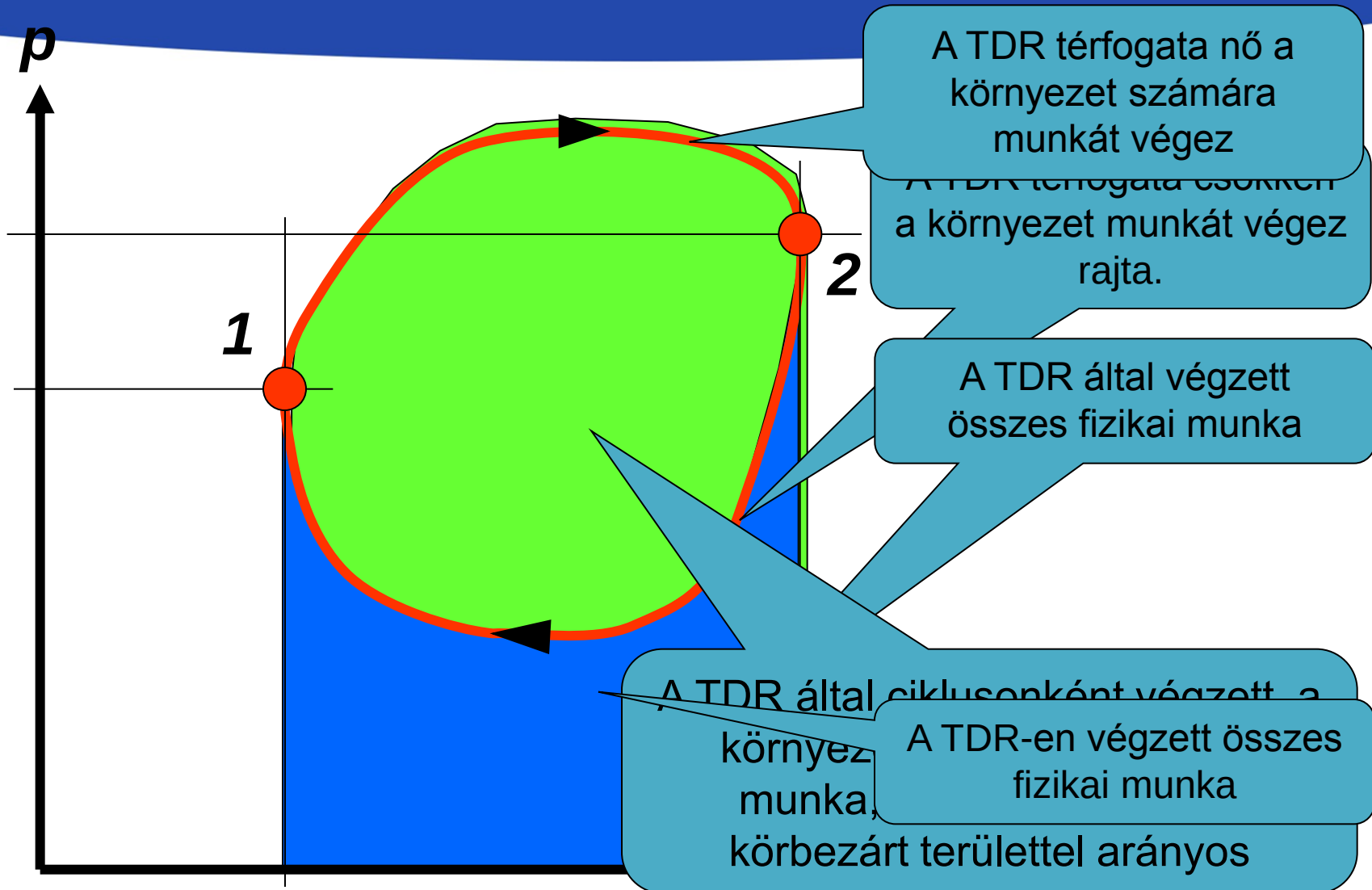
$$W_h = \sum Q$$



A termodinamikai hatásfok:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{be}}$$

A körfolyamat a p - v koordináta-rendszerben



A körfolyamat munkája

A p-v koordinátarendszerben ábrázolt

- az óramutató járásával megegyező körüljárású minden körfolyamat ciklikusan a környezetben hasznosítható munkát szolgáltat,
- az óramutató járásával ellentétes körüljárású minden körfolyamatba ciklikusan munkát kell befektetni a körfolyamat fenntartásához.

A körfolyamati görbe ill. törtvonal által körbezárt terület a ciklikusan szolgáltatott ill. szükséges munkával arányos.

$$w = -\oint (p \cdot dv) = \oint (v \cdot dp) \left[\frac{J}{kg} \right]$$

A körfolyamat hatásfoka
(korábbi ábra jelöléseivel)

$$\eta = \frac{\int_1^2 (p \cdot dv) - \int_2^1 (p \cdot dv)}{\int_1^2 (p \cdot dv)} = 1 - \frac{\int_1^2 (p \cdot dv)}{\int_2^1 (p \cdot dv)}$$

A hatásfok csak akkor lehetne 100%, ha a környezet nem végezne munkát a rendszeren.

Ilyen körfolyamatot nem lehet elképzelni!

Hőmennyiség és körfolyamat

Mivel a körfolyamat mindig ugyanazon pontokon „halad át”, a körfolyamati görbe bármely pontjára vonatkoztatva kijelenthető, hogy egy teljes ciklusra a belső energia megváltozása éppen zérus (azonos a hőmérséklet!), és így az 1. főtétele egy ciklusra történő alkalmazásával

$$W = Q$$

azaz bármely körfolyamat esetében a munkák algebrai összege megegyezik a hőmennyiségek algebrai összegével!

Az entrópia

Virtuális intenzív állapotjelző, mely a többi intenzív állapotjelzőhöz hasonlóan bármely két állapotjelző függvényében egyértelműen meghatározható és a következő egyenlettel definiált.

$$ds = \frac{dq}{T} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Egy olyan koordinátarendszerben, melyben a hőmérséklet az entrópia függvényében van ábrázolva, az állapotváltozási görbe alatti terület az állapotváltozás során leadott vagy felvett hőmennyiséggel arányos.

Az állapotváltozások ábrázolása a T -s koordinátarendszerben

Az állandó nyomású állapotváltozás

$$T = T_1 \cdot e^{\int_{S_1}^S \frac{dq}{T} \frac{c_p}{T}} = T_1 \cdot e^{\frac{S - S_1}{K}}$$

Azaz exponenciális görbe, ahol K egy rögzített konstans, melynek meghatározása abból a konvencióból kiindulva lehetséges, hogy 0°C -on és atmoszférikus nyomáson az entrópia zérus.

Az entrópia abszolút értéke érdektelen, csak a megváltozása bír jelentőséggel, valamilyen hőközlési folyamatra utal.

Az állapotváltozások ábrázolása a T - s koordináta-rendszerben

Az állandó térfogatú állapotváltozás

$$T = T_1 \cdot e^{\frac{S - S_1}{C_v}}$$

Azaz exponenciális görbe, mely abban különbözik az izobár állapotváltozás exponenciális görbéjétől, hogy annál kissé meredekebb, mivel az állandó térfogaton vett fajhő biztosan kisebb mint az állandó nyomáson vett fajhő.

Az állapotváltozások ábrázolása a T - s koordináta-rendszerben

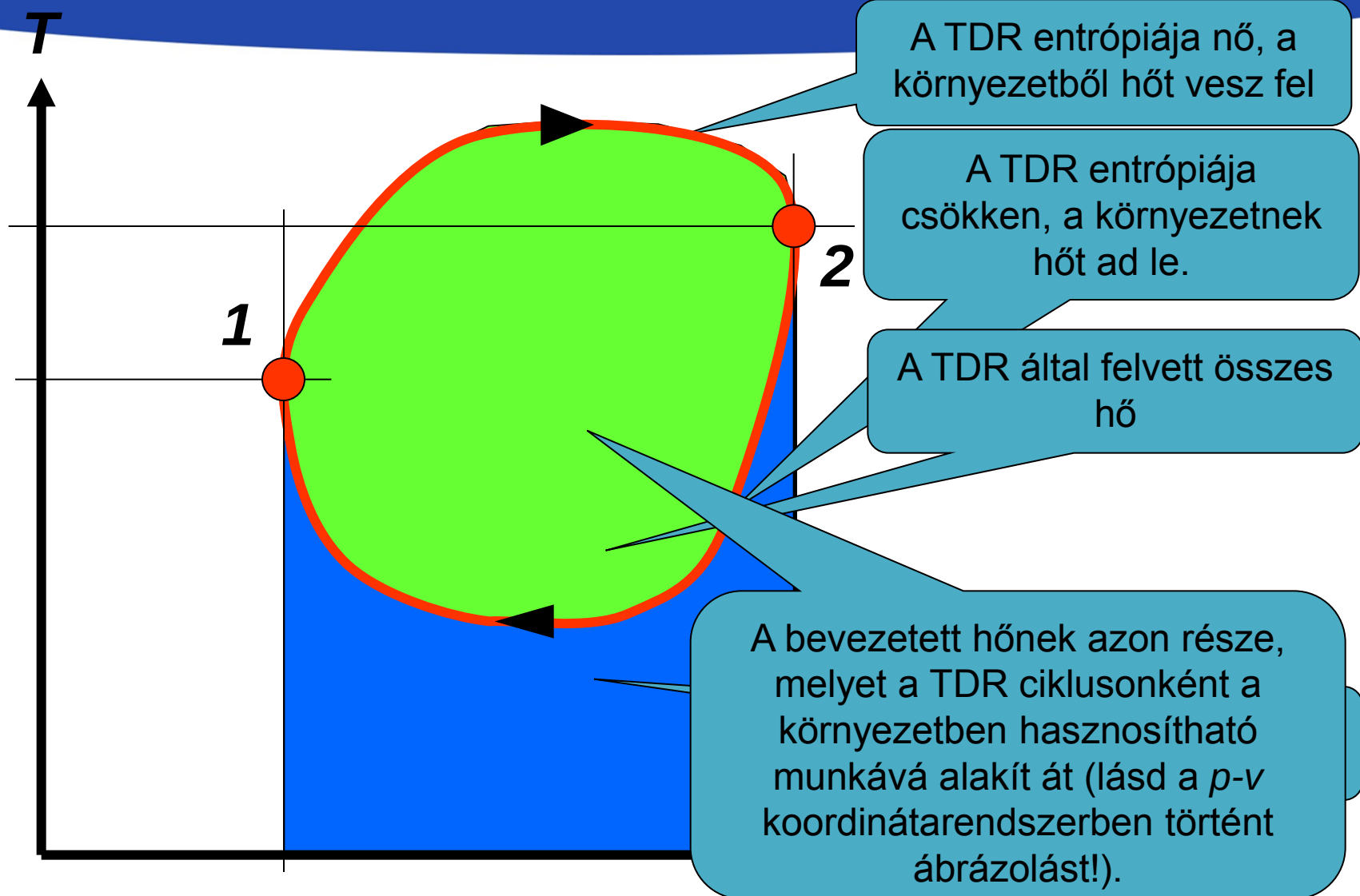
Az adiabatikus állapotváltozás

Tekintettel arra, hogy termikus kölcsönhatás ilyen esetben nincs, az entrópia-változás zérus, az állapotváltozást egy függőleges egyenes jelképezi.

A politropikus állapotváltozás

Általános menetű görbe, mely az adiabatát jelképező függőlegeshez képest vagy jobbra (fűtött adiabata, $n > \kappa$) vagy balra (hűtött adiabata, $n < \kappa$) hajlik el.

A körfolyamat a T -s koordináta-rendszerben



A körfolyamat termikus hatásfoka

$$\eta = \frac{\int_1^2 (T \cdot ds) - \int_2^1 (T \cdot ds)}{\int_1^2 (T \cdot ds)}$$

A hatásfok csak akkor lenne 100%, ha lehetne készíteni olyan körfolyamatot, mely a ciklikus működés során a környezetnek nem ad le hőt.

Ilyen körfolyamatot nem lehet elképzelni!

A körfolyamat termikus hatásfoka

$$\eta = 1 - \frac{q_{el}}{q_{be}} = 1 - \frac{\bar{T}_a}{\bar{T}_f} = \frac{\bar{T}_a}{\bar{T}_f} \cdot \frac{\Delta S}{\Delta S}$$

A hatásfok csak akkor lenne 100%, ha lehetne készíteni olyan körfolyamatot, melyből a hőelvonás 0 K-en történik.

Ilyen körfolyamatot nem lehet elképzelni!

A termodinamika 2. főtétele

- Nem lehet olyan körfolyamatot készíteni, mely hőelvonás nélkül működik.
- A hőenergiát nem lehet maradéktalanul mechanikai munkává alakítani.
- A hő, külső beavatkozás nélkül, csak a melegebb helyről a hidegebb helyre áramlik.

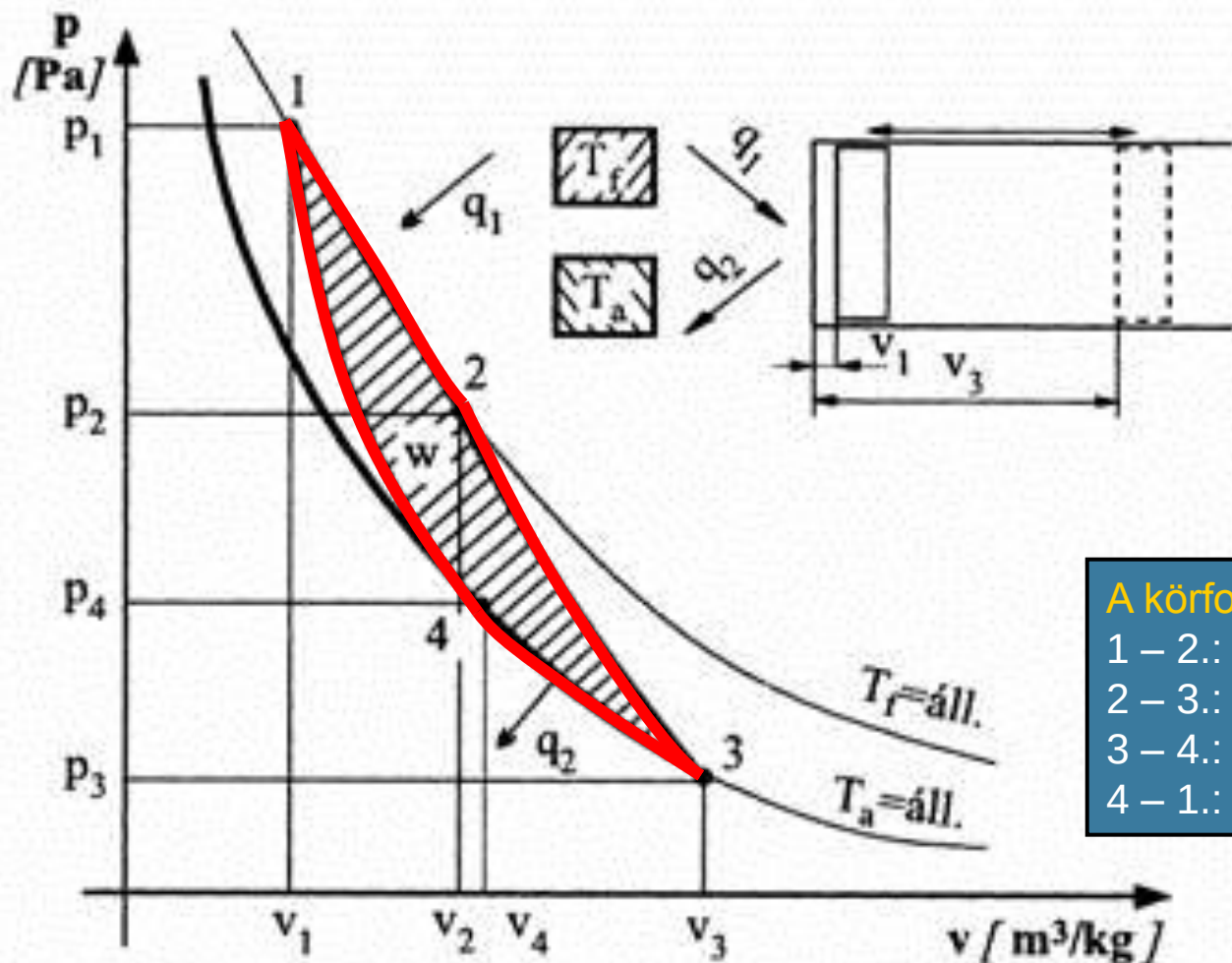
A körfolyamat termikus hatásfoka

$$\eta = 1 - \frac{\overline{T}_a}{\overline{T}_f}$$

Annál nagyobb, minél

- alacsonyabb a hőelvonás hőmérséklete,
- magasabb a hőbevezetés hőmérséklete
- távolabb van egymástól a hőbevezetés és a hőelvonás átlagos hőmérséklete,
- közelebb áll a hőbevezetés és a hőelvonás folyamata az izotermikushoz.

Carnot – körfolyamat



A termodinamikai hatásfok, speciálisan

Carnot – körfolyamatra:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_a}{T_f}$$

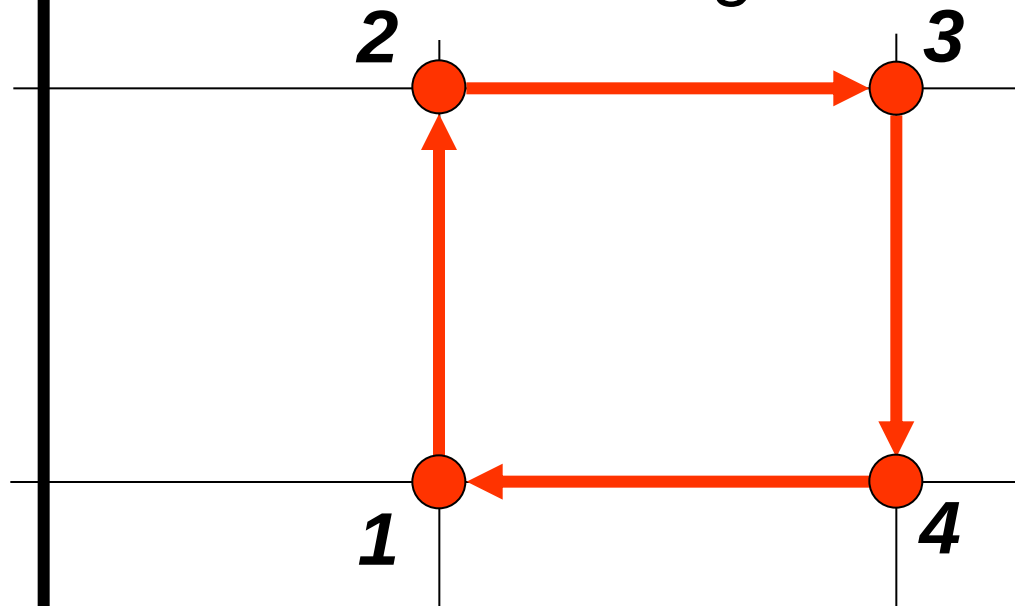
A Carnot – körfolyamat hatásfoka csak az alsó és felső hőmérséklettől függ. Azonos hőfokhatárok közt a Carnot – körfolyamatnak van a legjobb hatásfoka.

A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: izotermikus expanzió,
- 2 – 3.: adiabatikus expanzió,
- 3 – 4.: izotermikus kompresszió,
- 4 – 1.: adiabatikus kompresszió.

A Carnot-körfolyamat a T - s koordináta-rendszerben

Két izotermával (hőbevezetés és hőelvonás) és két adiabatával megvalósított körfolyamat.



1-2 kompresszió

2-3 hőbevezetés

3-4 expanzió

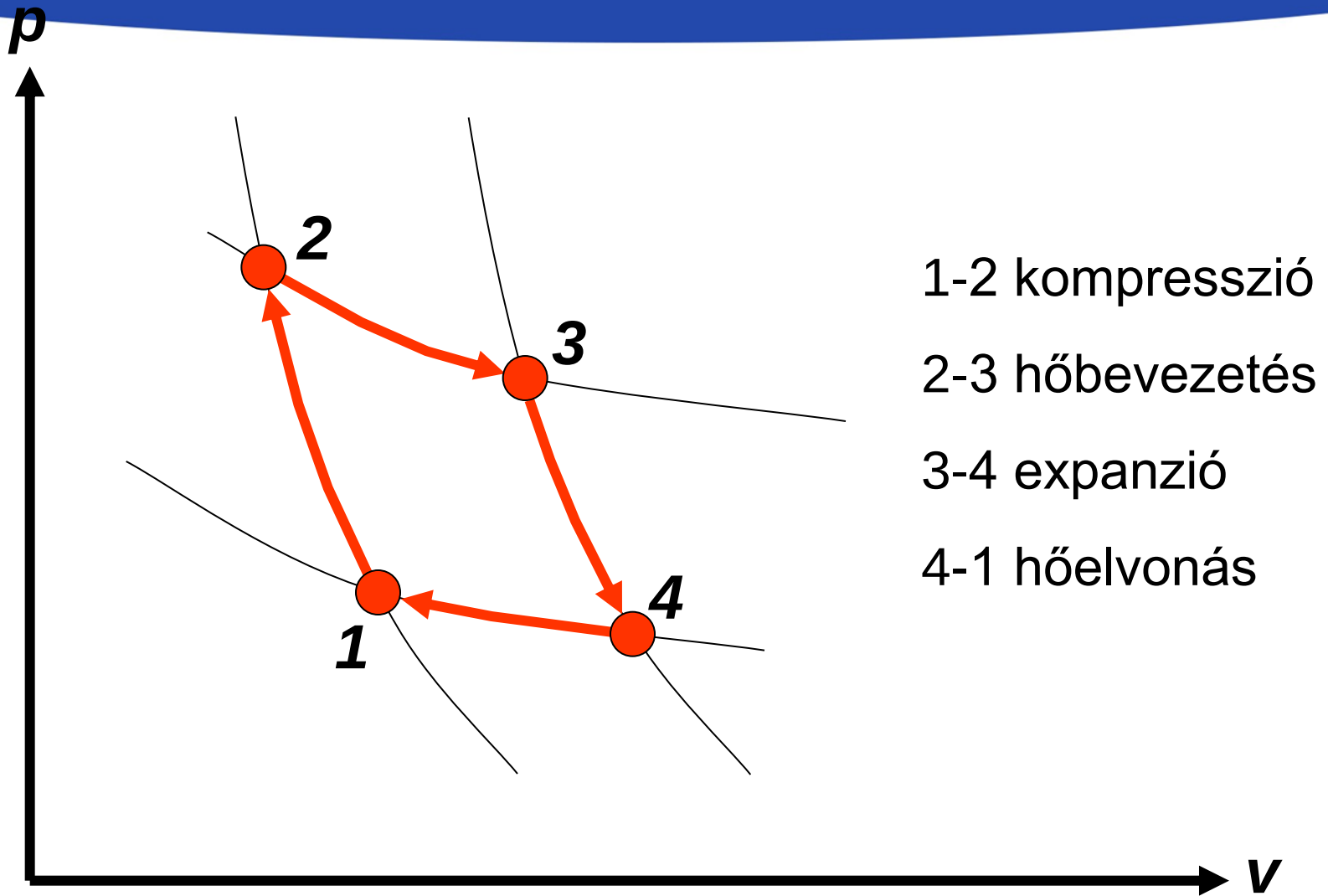
4-1 hőelvonás

Adott hőmérséklet határok között a

Carnot-körfolyamat

biztosítja a legjobb hatásfokot.

A Carnot-körfolyamat a p - v koordinátarendszerben



Hőerőgépek

- A hőerőgép olyan valóságos vagy elméleti erőgép, amely hőenergiát mechanikai munkává alakít át.
- Más definíció szerint a hőerőgép olyan kalorikus gép, mely hasznos mechanikai munkát szolgáltat.
- A hőerőgépek termodinamikai körfolyamatot valósítanak meg működésük folyamán. A hőerőgépeket rendszerint az általuk megvalósított körfolyamatról nevezik el, de gyakran alternatív elnevezéseket is használnak: benzinmotor, gőzturbina, gázturbina.
- A belsőégésű motorok a gép belsejében fejlesztenek hőenergiát, a külső hőbevezetésű gépek külső hőforrás által fejlesztett hőenergiát abszorbeálják. Egyes hőerőgépek a külső atmoszféra felé nyitott szerkezetűek, mások el vannak szigetelve a környezettől (*nyitott vagy zárt rendszerek*).

HŐERŐGÉPEK

Miért foglalkozunk hőerőgépekkel?

- mert az élet majd minden területén megtalálhatók:
 - (hűtőgépek, boiler, autó, repülőgép, villamos erőmű stb.)
- mert környezetbarát megvalósítása mindannyiunk érdeke:
 - kis CO₂ kibocsátás → jó hatásfok
 - megújuló energiaforrások: biomassza (gáz, növényi olaj, alkoholok, szilárd anyagok)

Hőerőgéppel szemben támasztott követelmények:

- 1.) Ár
 - elvégzendő feladathoz mennyire kihasznált,
 - a befektetett összeg megtérülési ideje
- 2.) Üzemelési költség:
 - fajlagos tüzelőanyag felhasználás
 - fajlagos energiaigény (pl.: hűtőgép)
- 3.) Üzemeltetési költség:
 - megbízhatóság
 - karbantartási igény
- 4.) Élettartam
- 5.) Éves kihasználtság:
 - alaperőmű → legjobb η
 - csúcserőmű → kis beruházási költség, gyors terhelhetőség
 - kazán → részterhelésen rosszabb η

Alapvető elméleti körfolyamatok

- Ottó-körfolyamat
- Diesel-körfolyamat
- Sabathé-körfolyamat
- Gázturbina körfolyamatok

Otto motor munkafolyamatai

Otto motoroknál a robbanó keveréket már a hengerbe jutás előtt előállítják. Munkafolyamatok:

a-b löket (1. ütem) szívás

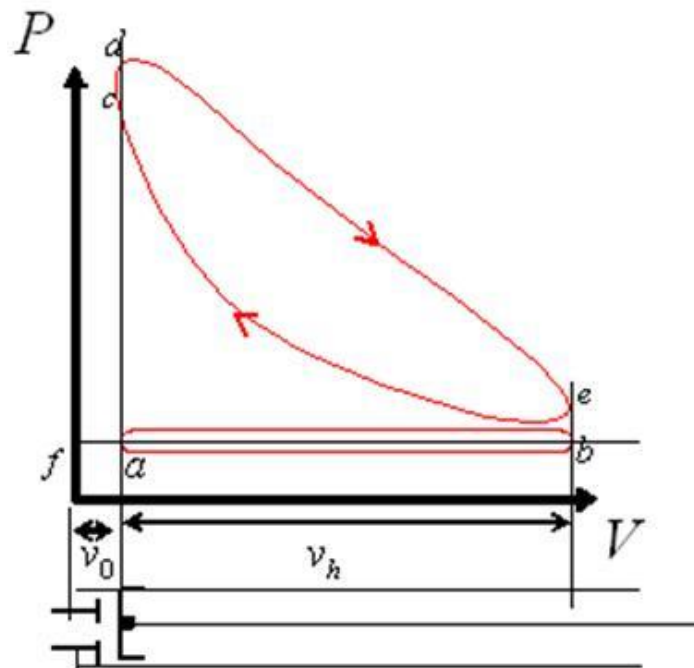
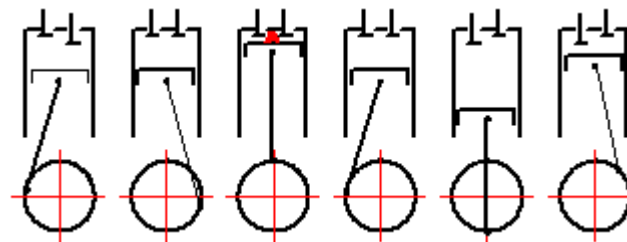
b-c löket (2. ütem) sűrítés

c-d felső holtpont gyújtás
robbanás

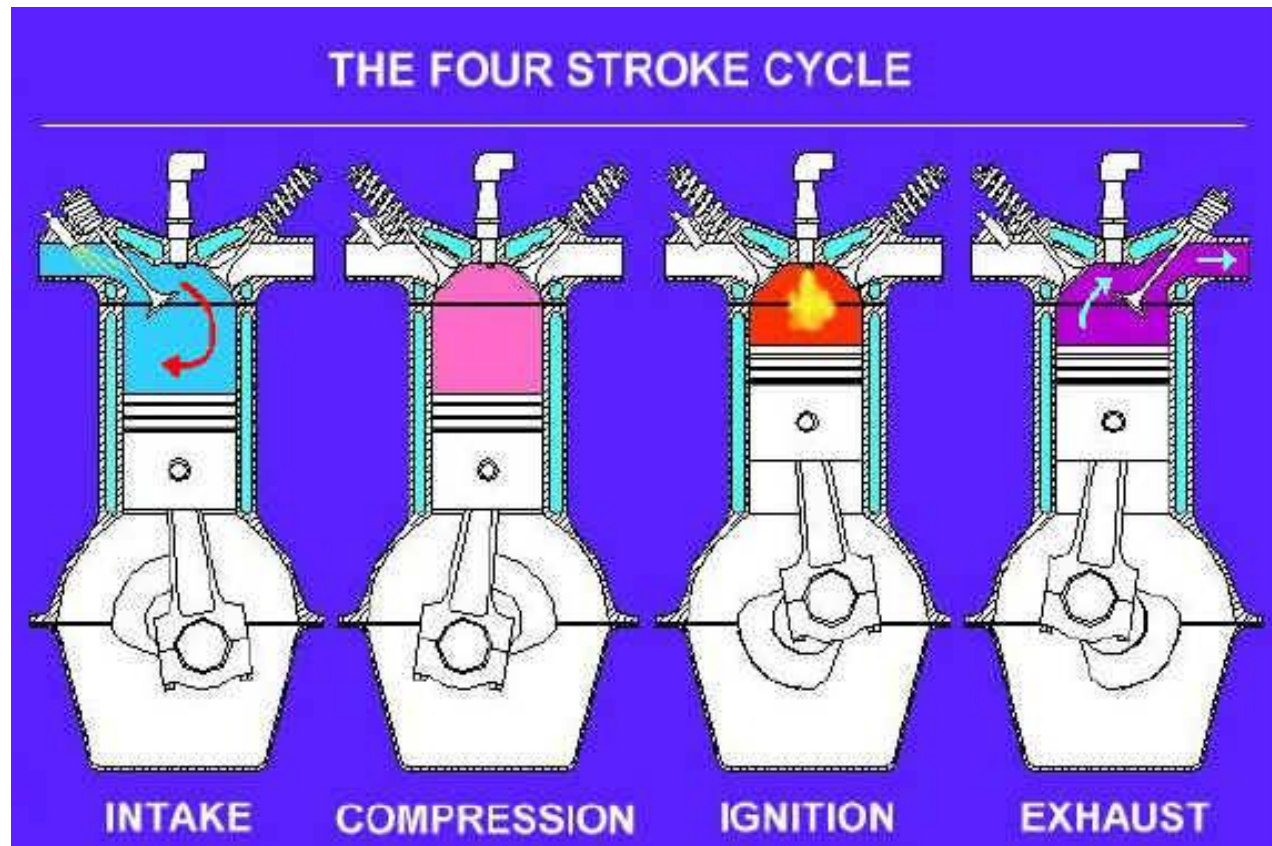
d-e löket (3. ütem) expanzió

e-f alsó holtpont kipufogás

f-a löket (4. ütem) kitolás



Négy ütemű Otto motor munkaütemei



Otto körfolyamat animációja

<http://hmika.freeweb.hu/Lexikon/Html/OttoMot.htm>

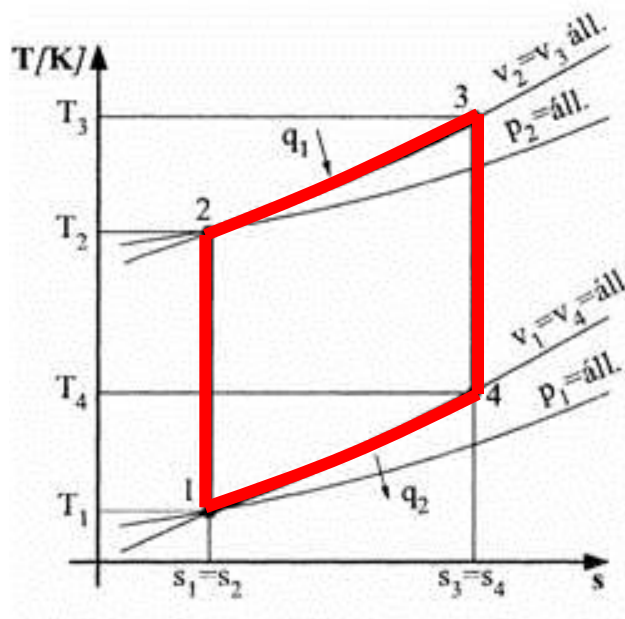
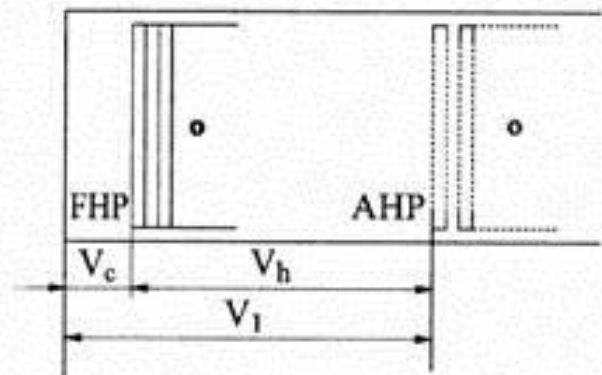
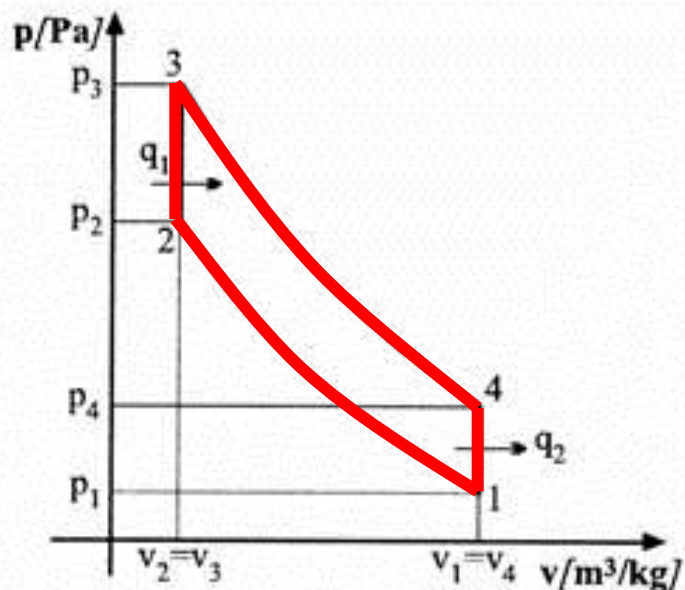
<http://www.animatedengines.com/otto.shtml>

A körfolyamat vizsgálata

A körfolyamat vizsgálatához egyszerűsítünk:

- *Nem foglalkozunk az égési folyamat terjedésével és kémiai átalakulásával, hőközléssel helyettesítjük.*
- *A kipufogó gázok lehűlését a $v = \text{áll}$ vonal mentén a kiindulási $T_f = T_b$ hőmérsékletig történő lehűléssel helyettesítjük.*
- *A szívás és az égéstermék kitolása a munkavégzés szempontjából lényegtelen mozzanatok, elhanyagolhatóak.*

Otto - körfolyamat



A kompresszió-viszony:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

A nyomás-emelkedési tényező:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

A termodinamikai hatásfok:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

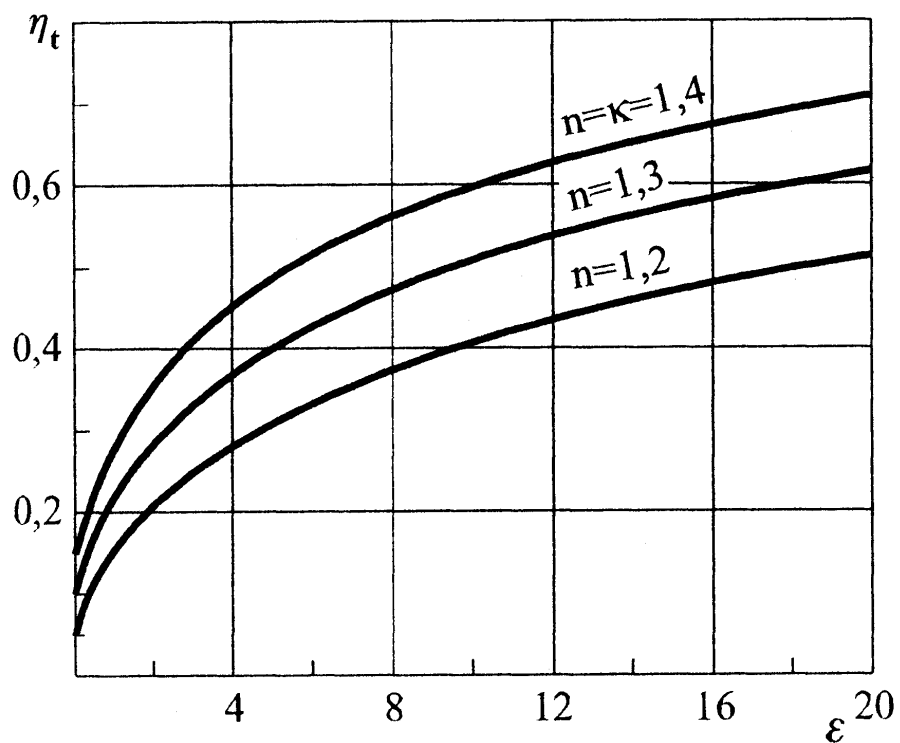
A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: adiabatikus kompresszió,
- 2 – 3.: izochor hőközlés,
- 3 – 4.: adiabatikus expanszió,
- 4 – 1.: izochor hőelvonás.

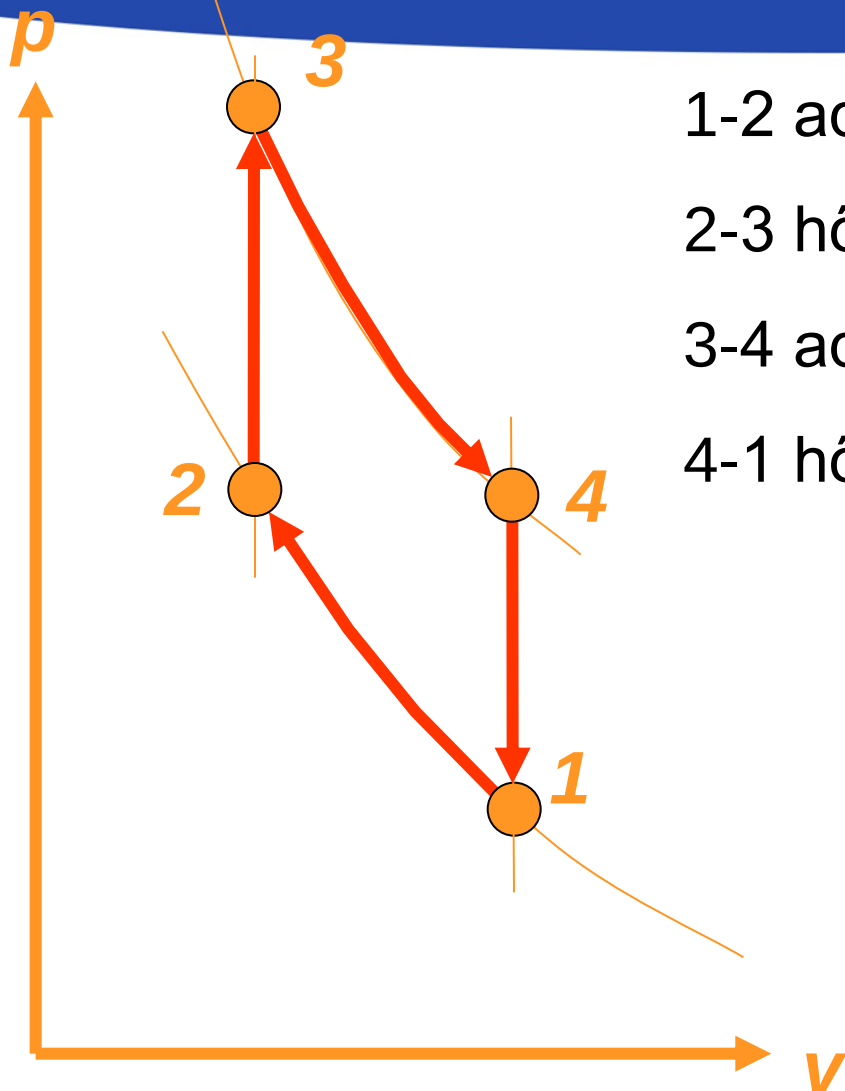
Otto – körfolyamat

A termodinamikai
hatásfok:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$



Az Ottó-körfolyamat a p - v koordinátarendszerben



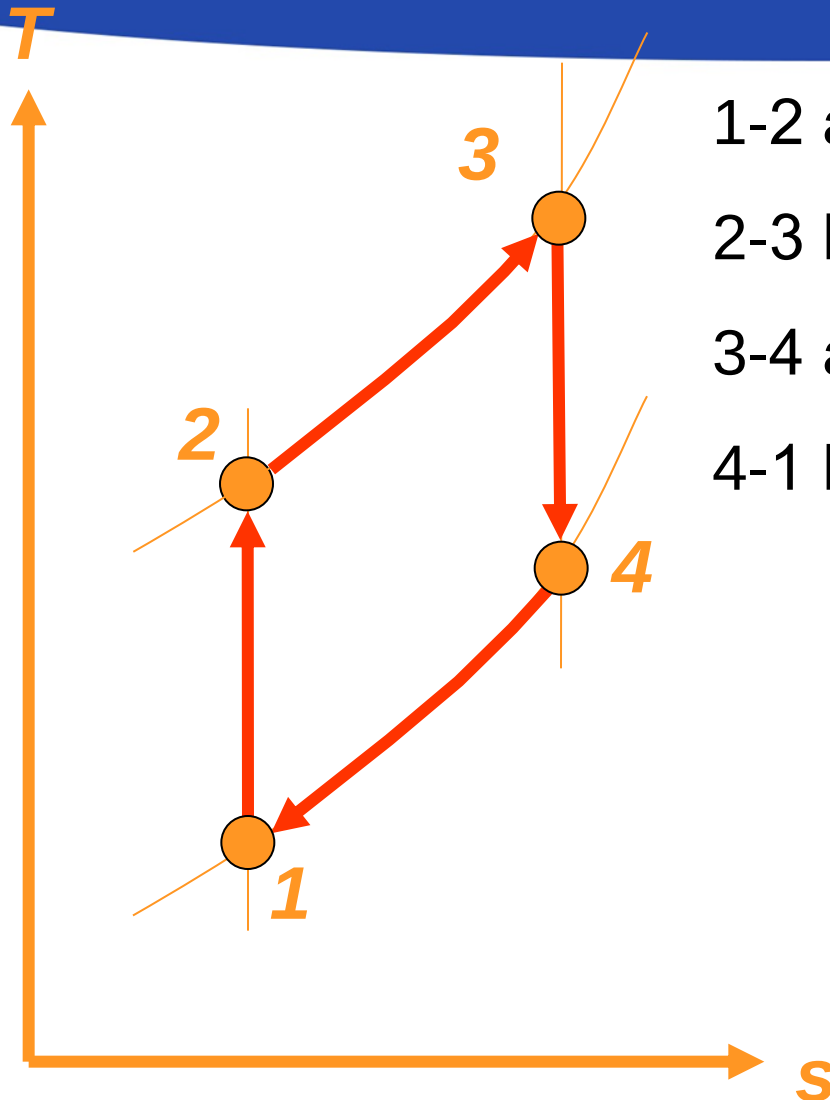
1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó térfogaton

3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó térfogaton

Az Ottó-körfolyamat a T - s koordinátarendszerben



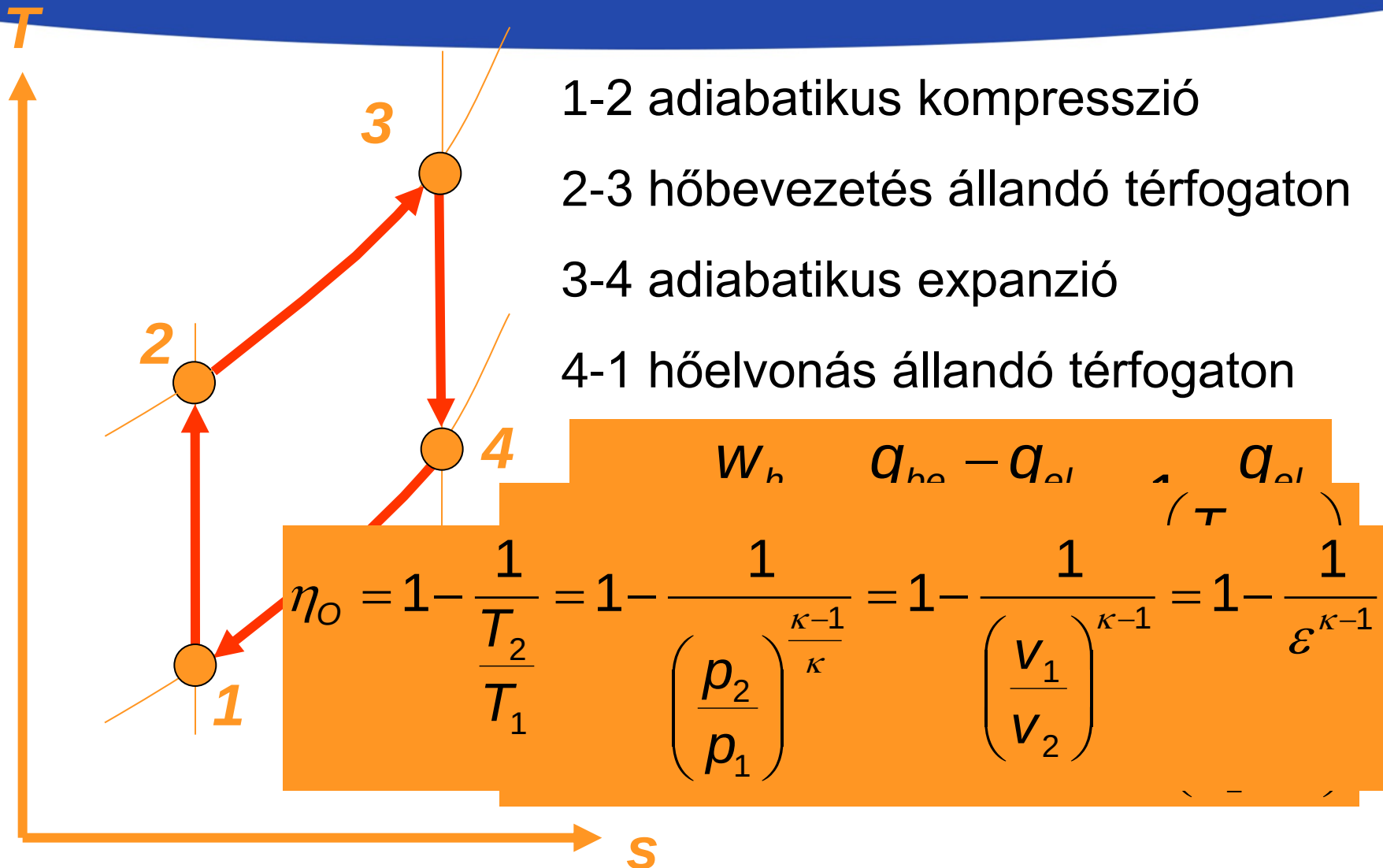
1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó térfogaton

3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó térfogaton

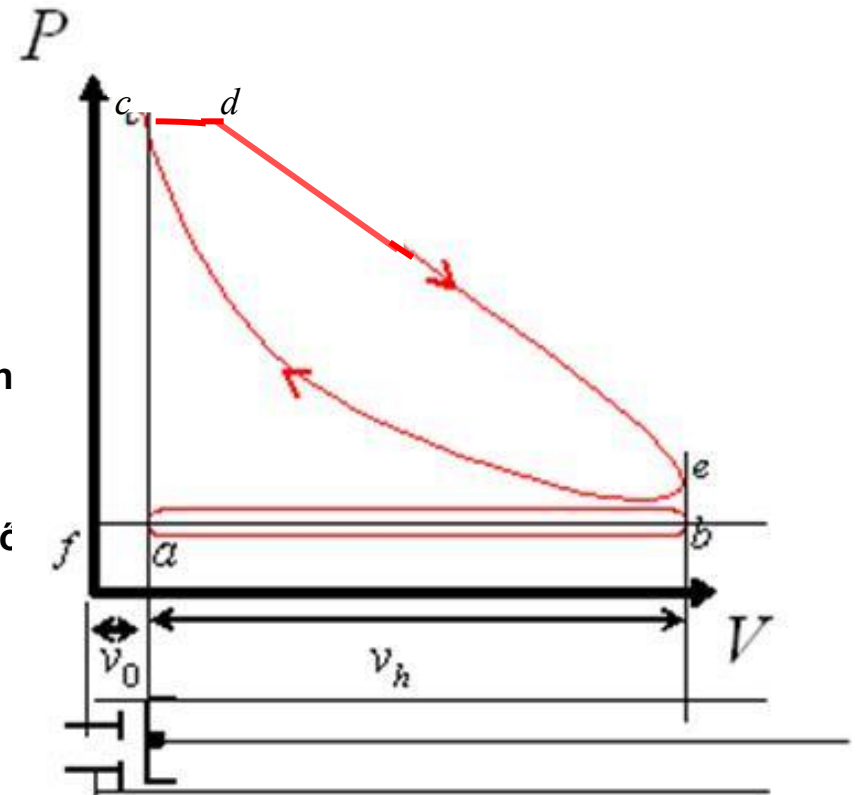
Az Ottó-körfolyamat termodinamikai hatásfoka



Diesel motor munkafolyamatai

- a-b. löket (1. ütem) levegő beszívása,
- b-c. löket (2. ütem) komprimálás,
- c-d. löket az üzemanyag folyamatos befecskendezése és elégetése állandó nyomáson
- d-e. löket (3. ütem) égéstermék expanziója,
- e-f. holt ponti állás, kipufogás,
- f-a. az égéstermék kitolása (4. ütem) a hengerből

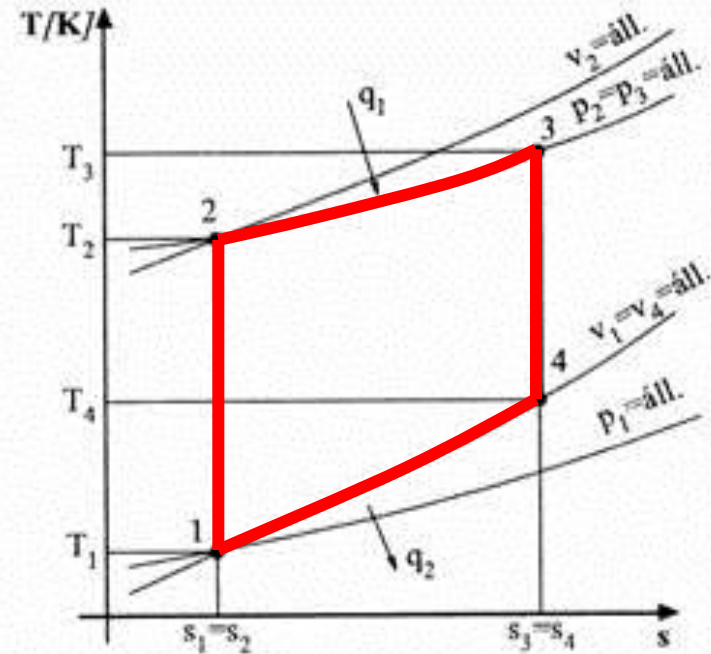
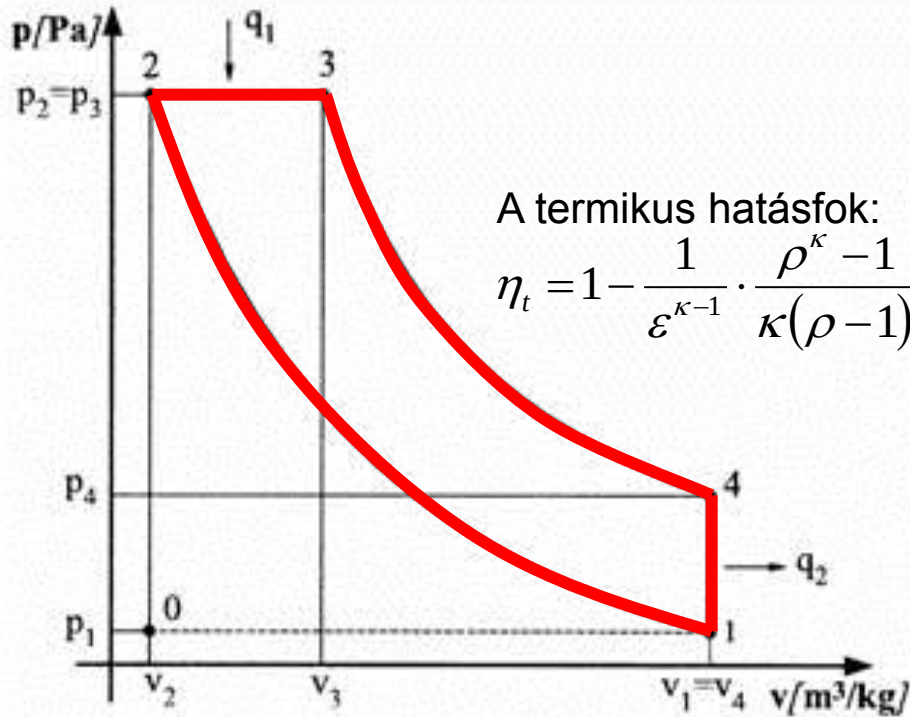
$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1}$$



Diesel körfolyamat animációja

<http://www.animatedengines.com/diesel.shtml>

Diesel - körfolyamat



A kompresszió-
viszony:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

Az előzetes
expánzióviszony

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

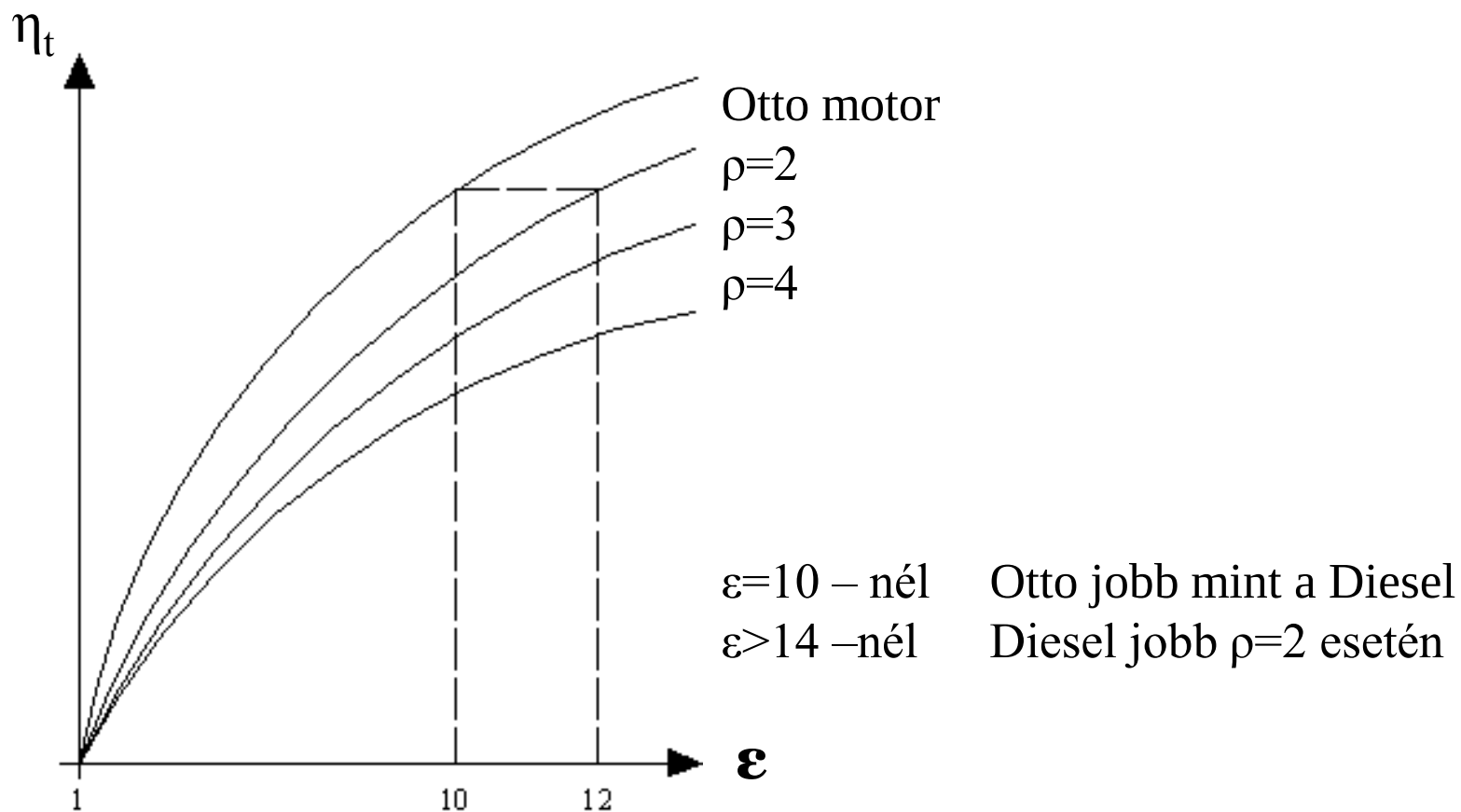
Az utólagos
expánzióviszony:

$$\delta = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3}$$

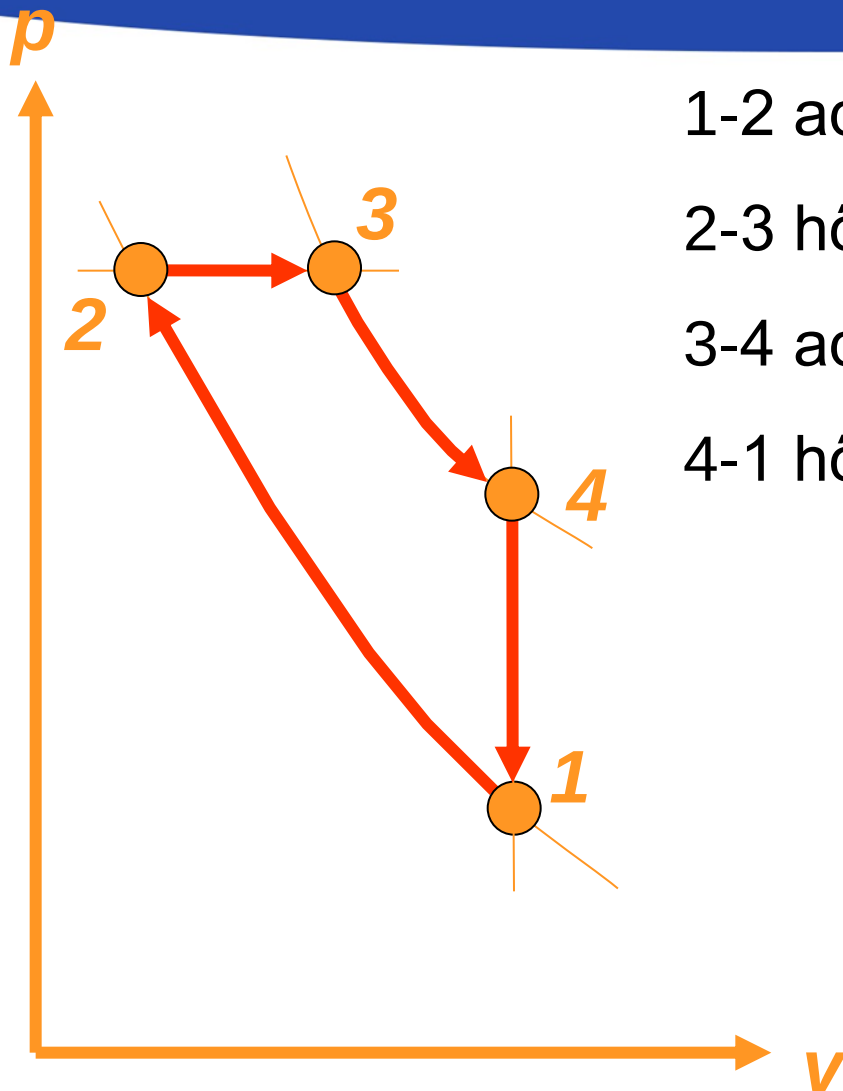
A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: adiabatikus kompresszió,
- 2 – 3.: izobár hőközlés,
- 3 – 4.: adiabatikus expánzió,
- 4 – 1.: izochor hőelvonás.

Hatásfok - kompresszió viszony Diesel körfolyamatnál



A Diesel-körfolyamat a p - v koordináta-rendszerben



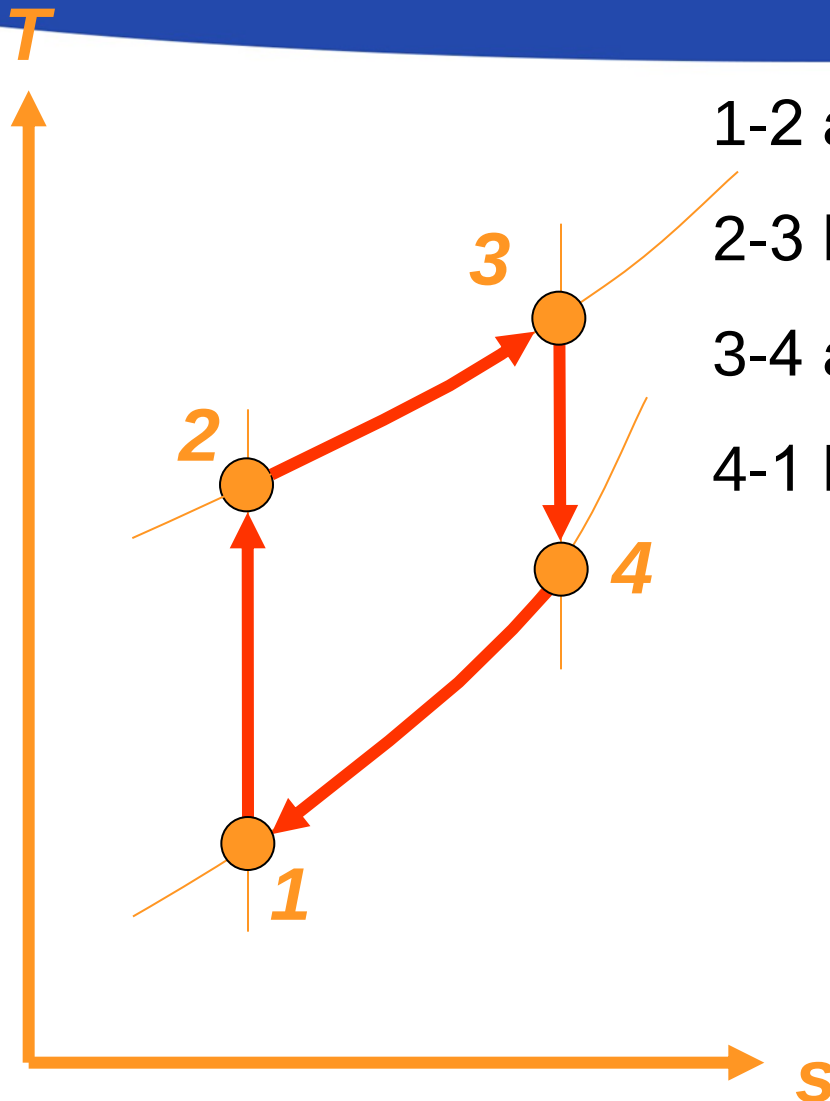
1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó nyomáson

3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó térfogaton

A Diesel-körfolyamat a T - s koordináta-rendszerben



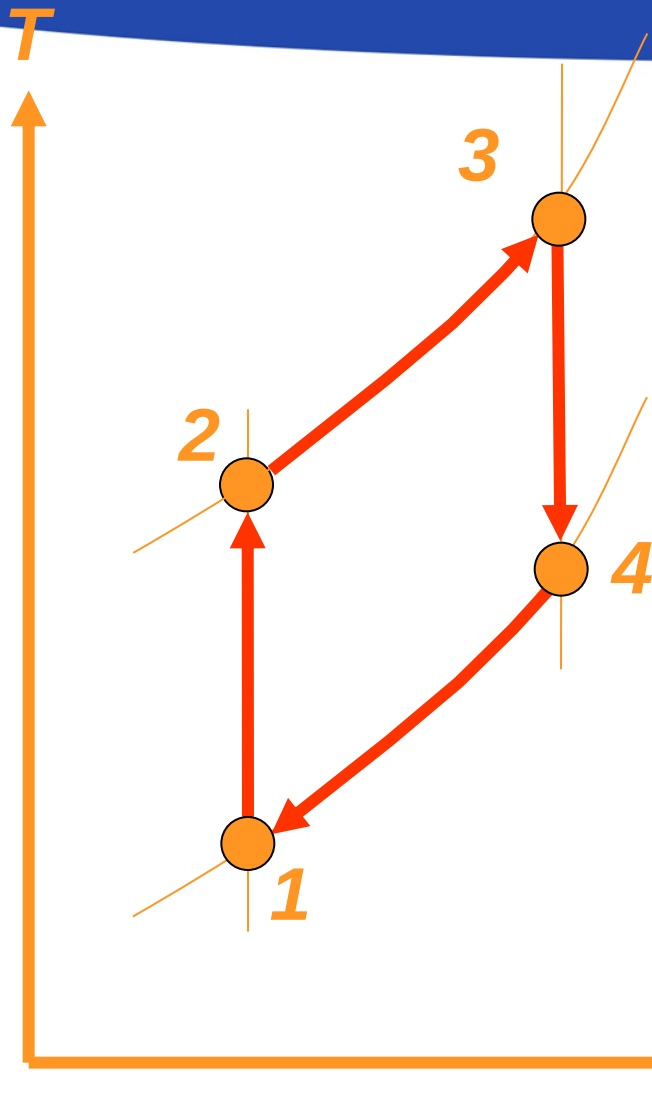
1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó nyomáson

3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó térfogaton

A Diesel-körfolyamat termodinamikai hatásfoka



1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó nyomáson

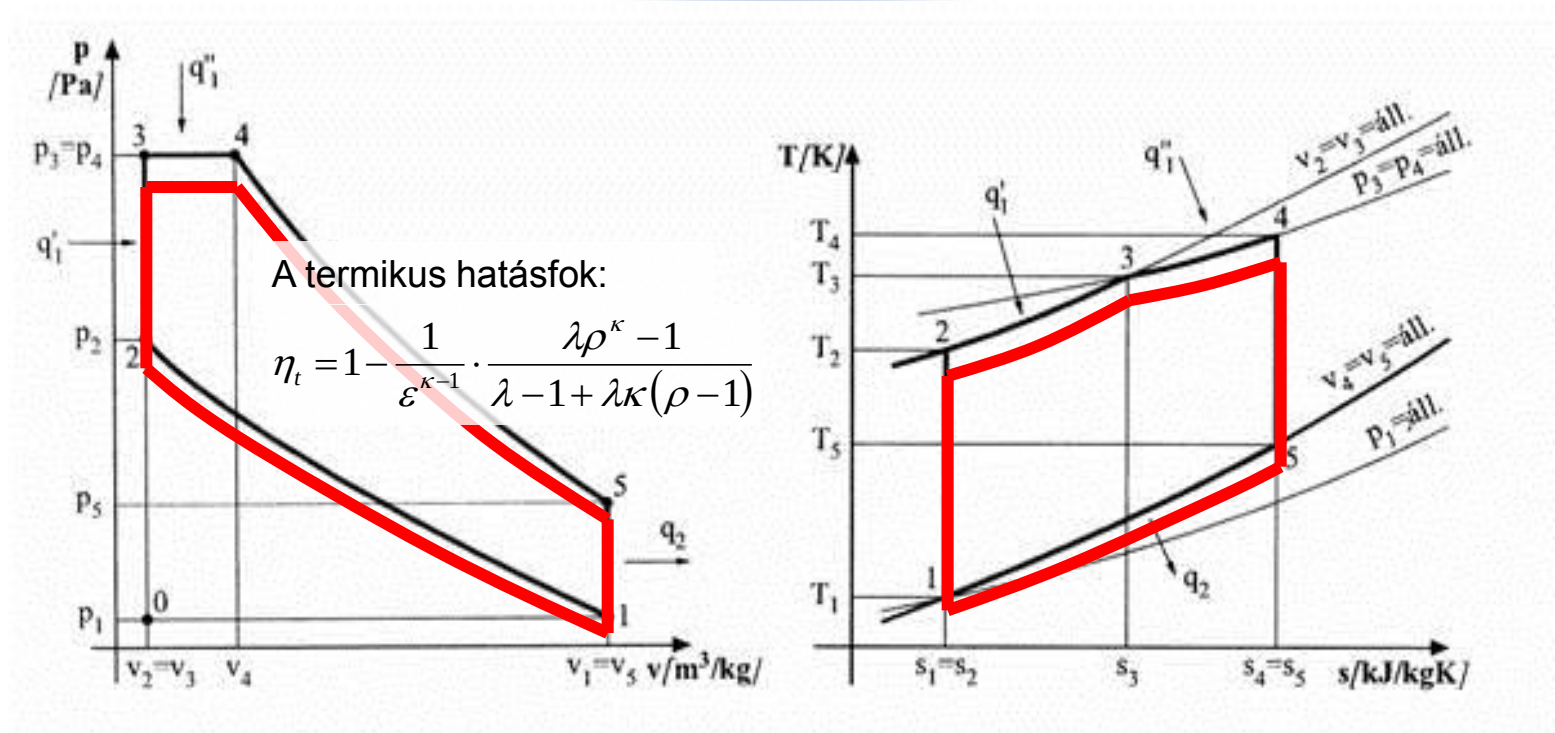
3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó térfogaton

$$\eta_D = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\left(\frac{T_3}{T_2} \right)^\kappa - 1 \right)}{\kappa \cdot T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{1}{\kappa \cdot \varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{(\rho^\kappa - 1)}{(\rho - 1)}$$

$(\rho = v_3/v_2)$ előzetes expanzió

Sabathé – körfolyamat



A kompresszió-
viszony:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

A nyomásemel-
kedési tényező:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

Az előzetes és az utólagos
expánzióviszony:

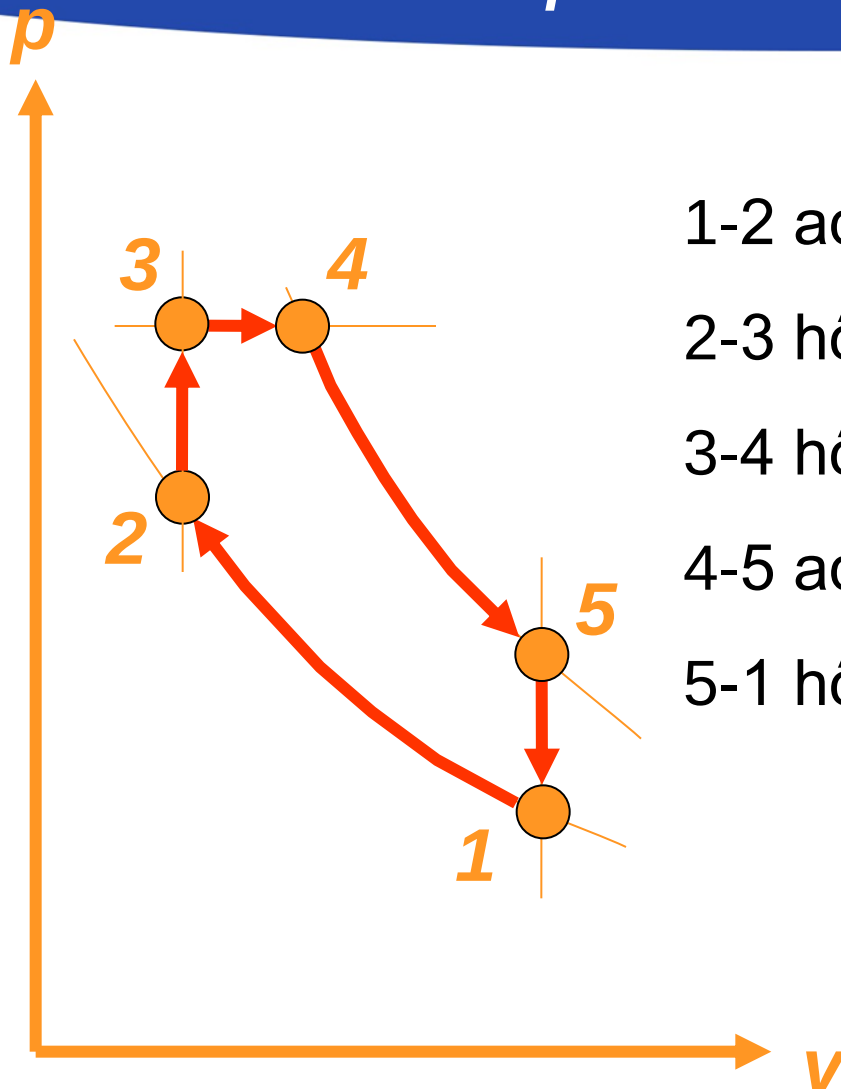
$$\rho = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\delta = \frac{V_5}{V_4} = \frac{v_5}{v_4}$$

A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: adiabatikus kompresszió,
- 2 – 3.: izochor hőközlés,
- 3 – 4.: izobár hőközlés,
- 4 – 5.: adiabatikus expánzió,
- 5 – 1.: izochor hőelvonás.

A Sabathé-körfolyamat a p - v koordináta-rendszerben



1-2 adiabatikus kompresszió

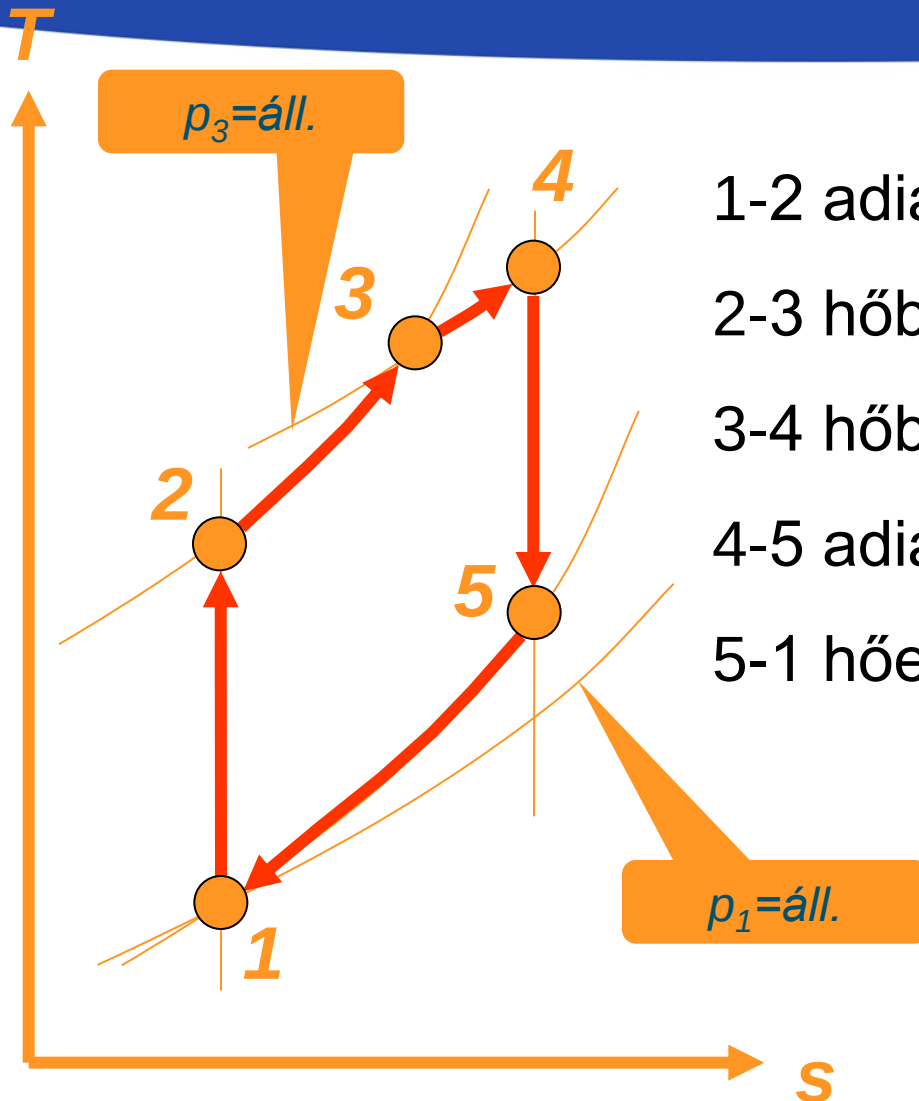
2-3 hőbevezetés állandó térfogaton

3-4 hőbevezetés állandó nyomáson

4-5 adiabatikus expanzió

5-1 hőelvonás állandó térfogaton

A Sabathé-körfolyamat a T - s koordináta-rendszerben



1-2 adiabatikus kompresszió

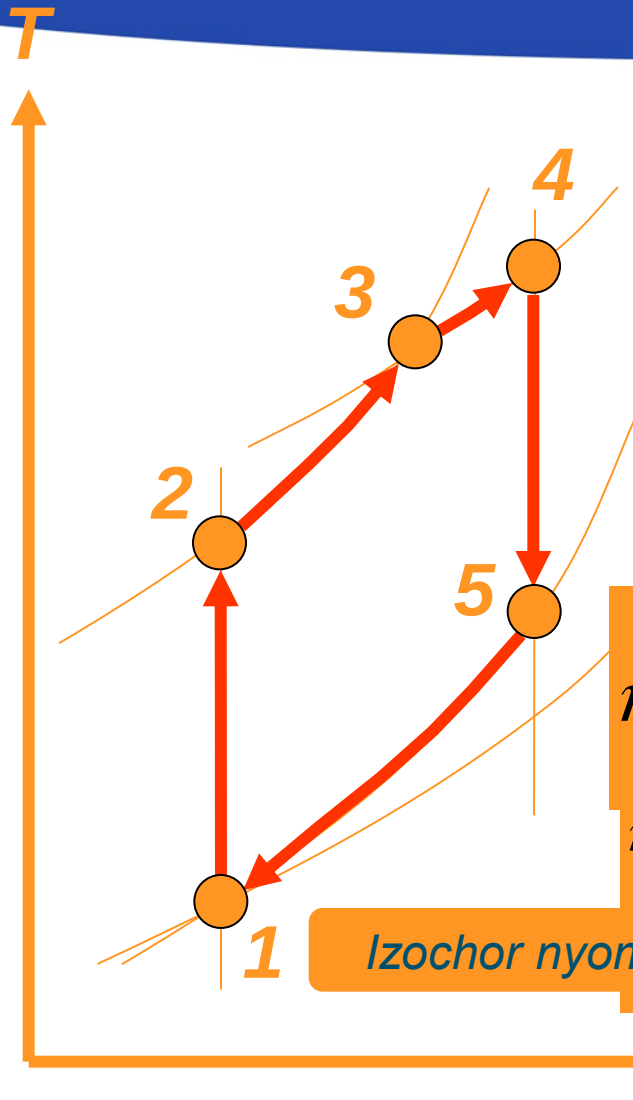
2-3 hőbevezetés állandó térfogaton

3-4 hőbevezetés állandó nyomáson

4-5 adiabatikus expanzió

5-1 hőelvonás állandó térfogaton

A Sabathé-körfolyamat termodinamikai hatásfoka



1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó térfogaton

3-4 hőbevezetés állandó nyomáson

4-5 adiabatikus expanzió

5-1 hőelvonás állandó térfogaton

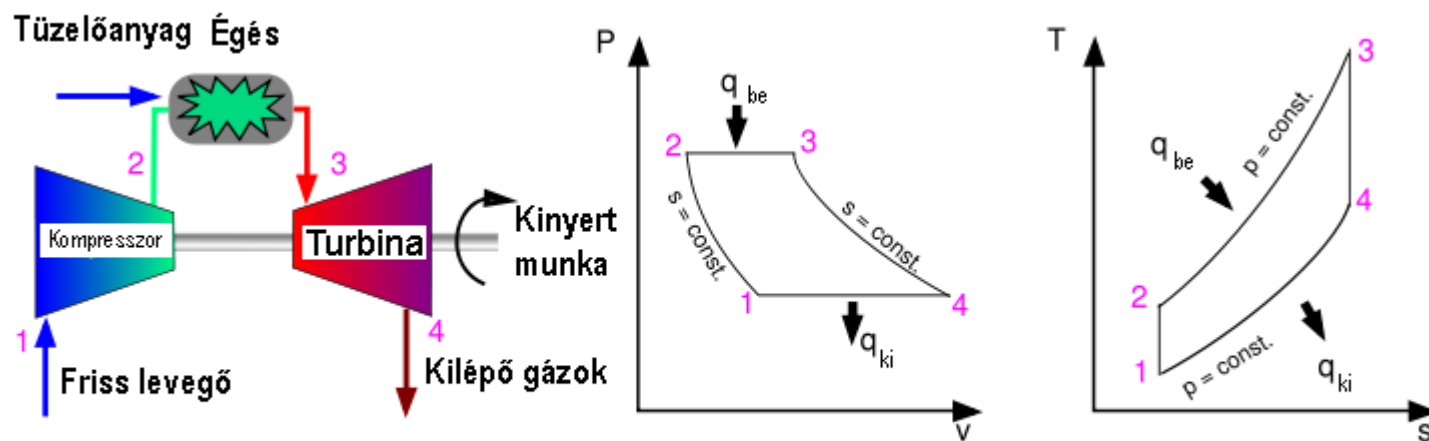
$$\eta_S = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^{\kappa} - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}$$

$$\eta_S = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\left(\frac{p_3}{p_2} - 1 \right) + \kappa \cdot \left(\frac{p_3}{r} \right) \left(\frac{v_4}{v_3} - 1 \right)}{\left(\frac{p_3}{p_2} - 1 \right) + \kappa \cdot \left(\frac{p_3}{r} \right) \left(\frac{v_4}{v_3} - 1 \right)}$$

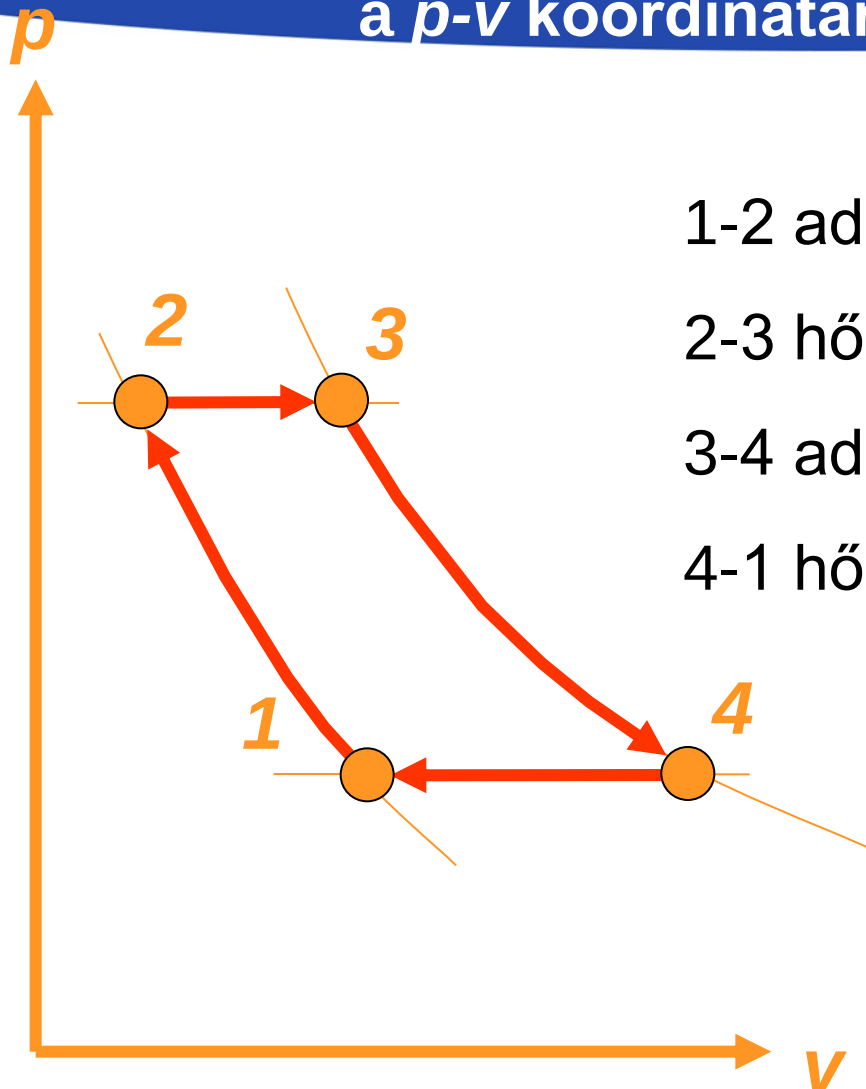
Izochor nyomásviszony

Izobár kompresszió-viszony

Brayton-Joule körfolyamat



A gázturbina-körfolyamat (Brayton-Joule) a p - v koordináta-rendszerben



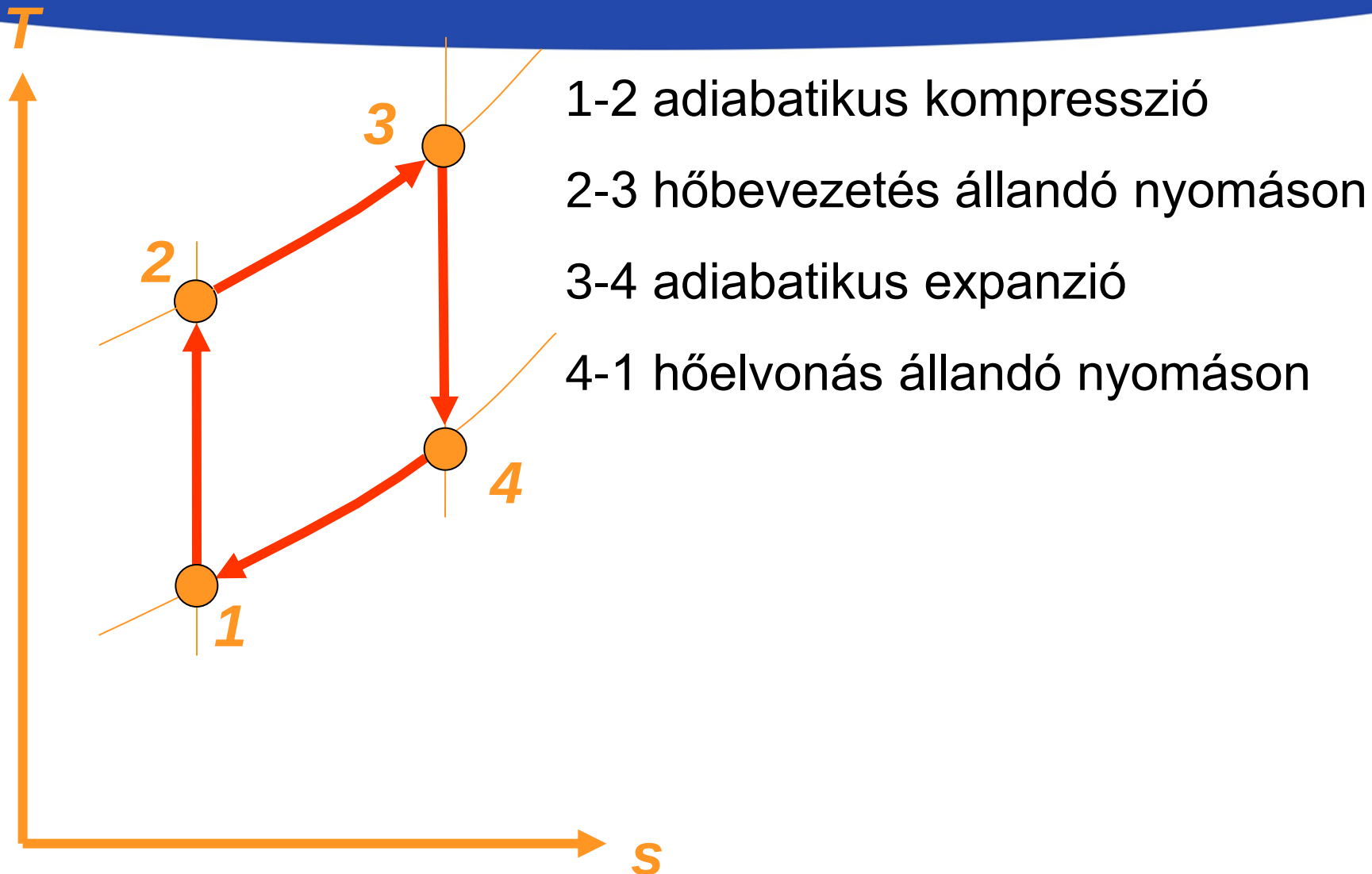
1-2 adiabatikus kompresszió

2-3 hőbevezetés állandó nyomáson

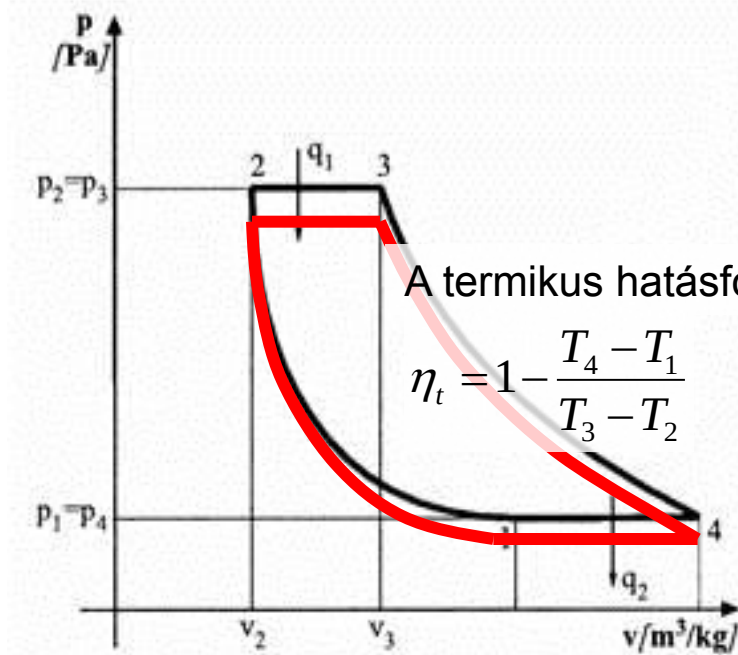
3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó nyomáson

A gázturbina-körfolyamat a T - s koordináta-rendszerben

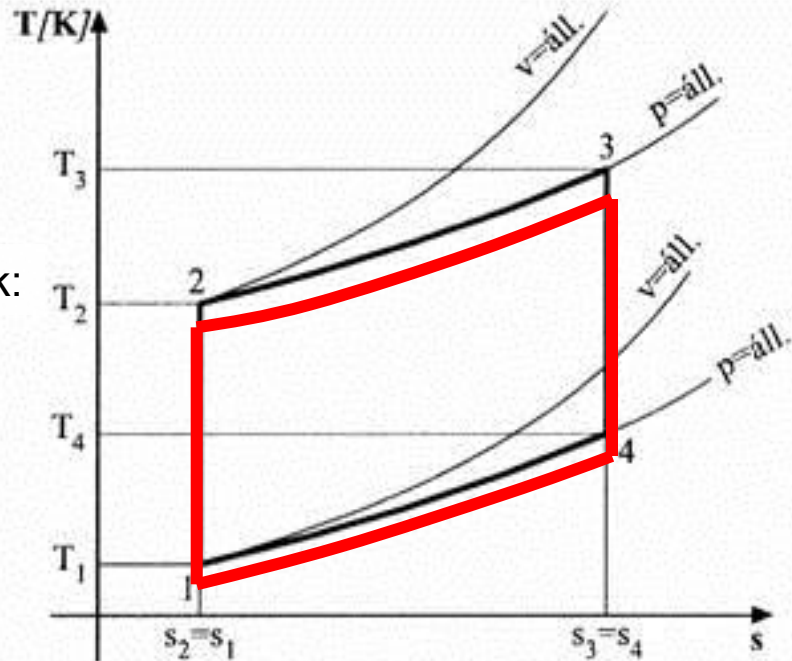


Izobár hőbevezetésű Brayton-Joule körfolyamat



A termikus hatásfok:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$



A kompresszió-
viszony:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

Az előzetes
expánzióviszony

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

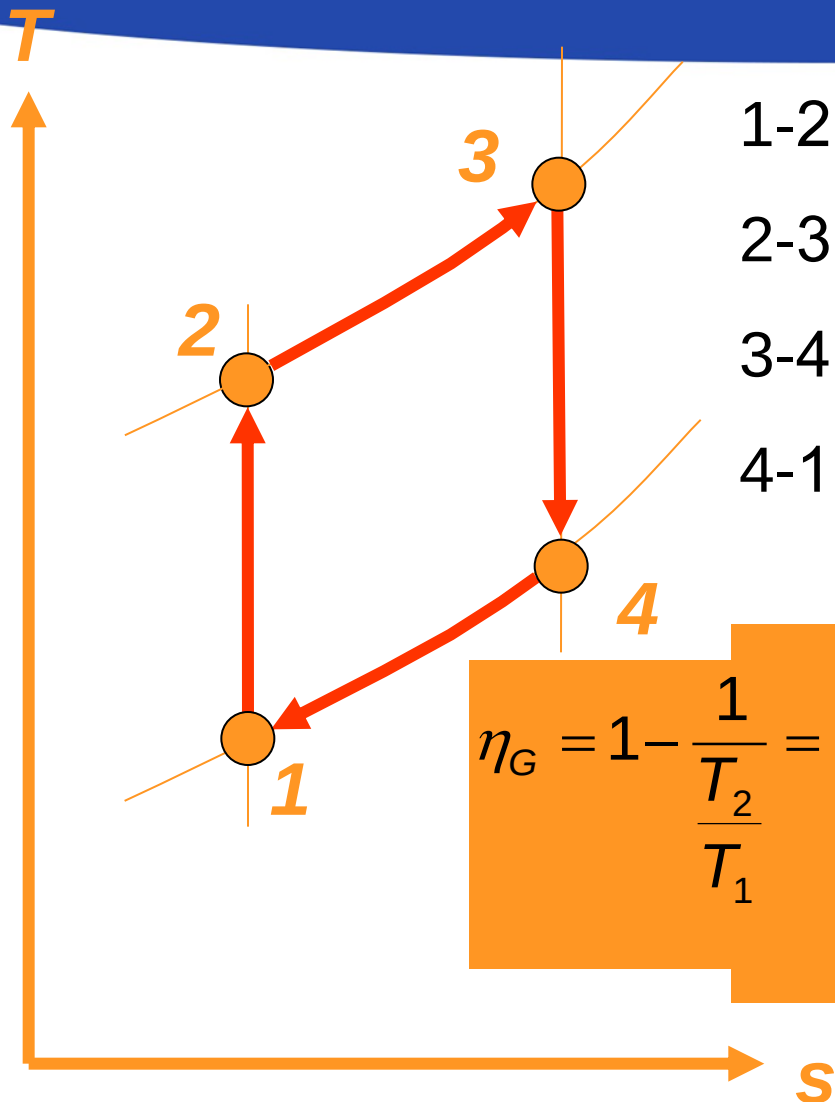
Az utólagos
expánzióviszony:

$$\delta = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3}$$

A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: adiabatikus kompresszió,
- 2 – 3.: izobár hőközlés,
- 3 – 4.: adiabatikus expánzió,
- 4 – 1.: izobár hőelvonás.

A gázturbina-körfolyamat termodinamikai hatásfoka



1-2 adiabatikus kompresszió

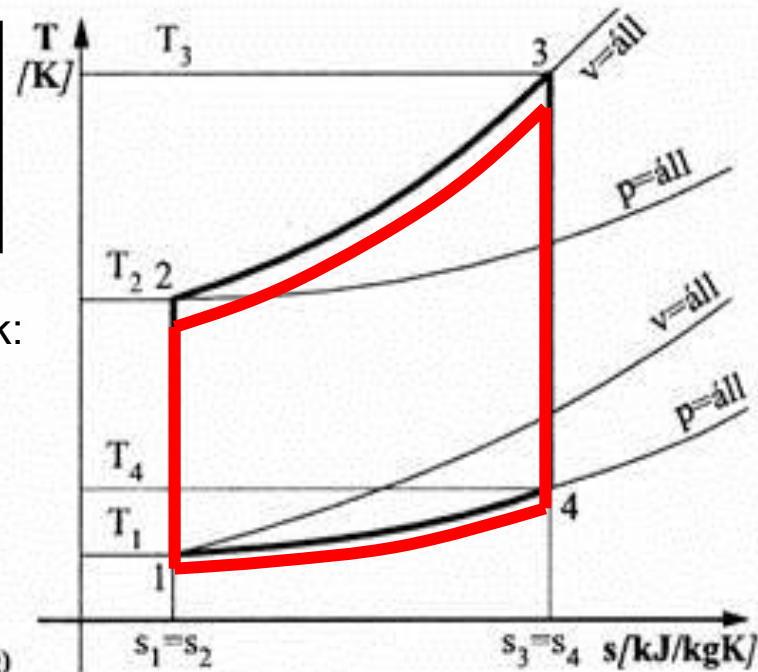
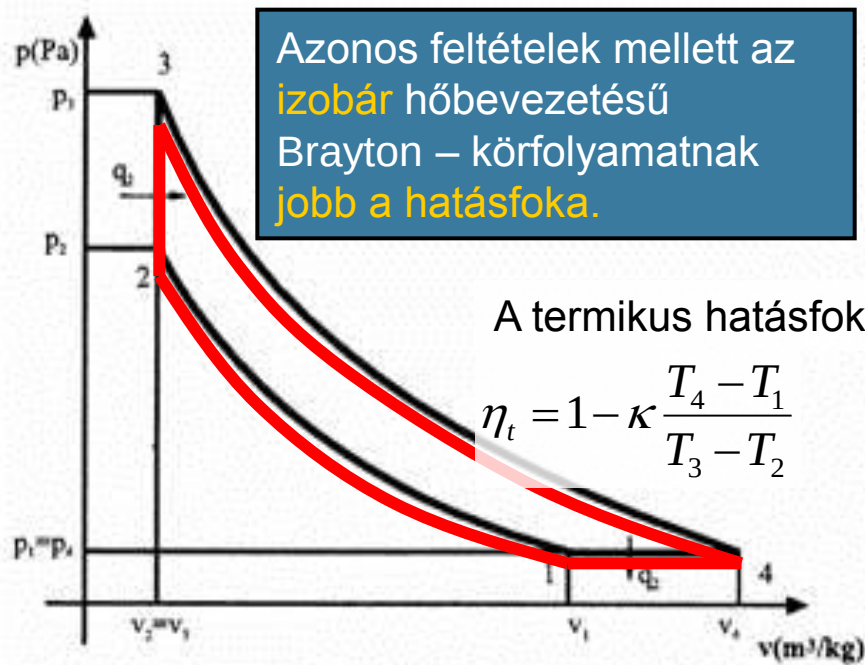
2-3 hőbevezetés állandó nyomáson

3-4 adiabatikus expanzió

4-1 hőelvonás állandó nyomáson

$$\eta_G = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Izochor hőbevezetésű Humphrey – körfolyamat



A kompresszió-
viszony:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

A nyomás-
emelkedési
tényező:

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

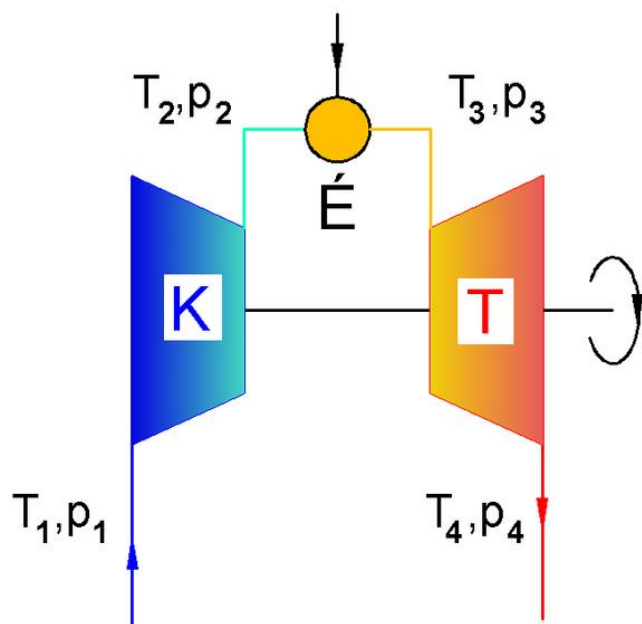
Az expanzió-
viszony:

$$\delta = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3}$$

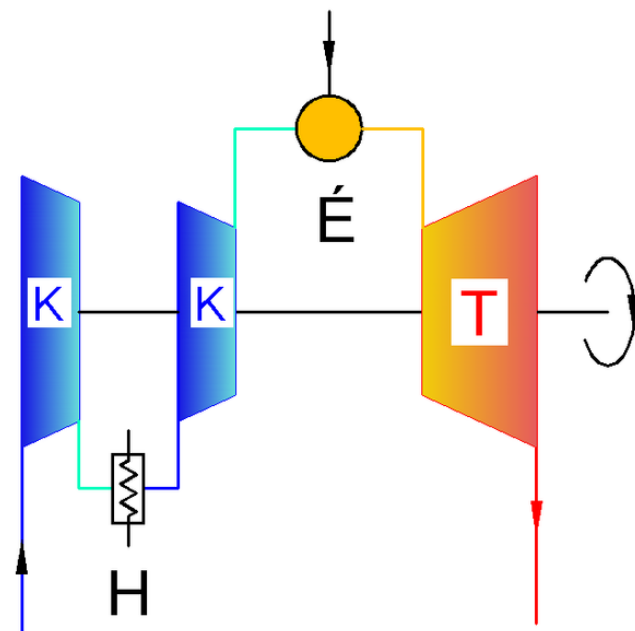
A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: adiabatikus kompresszió,
- 2 – 3.: izochor hőközlés,
- 3 – 4.: adiabatikus expanzió,
- 4 – 1.: izobár hőelvonás.

Gázturbina folyamatok

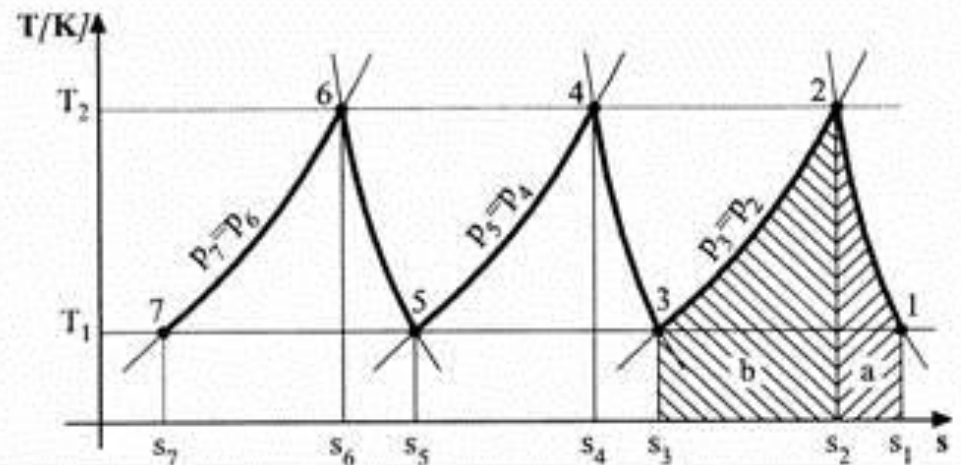
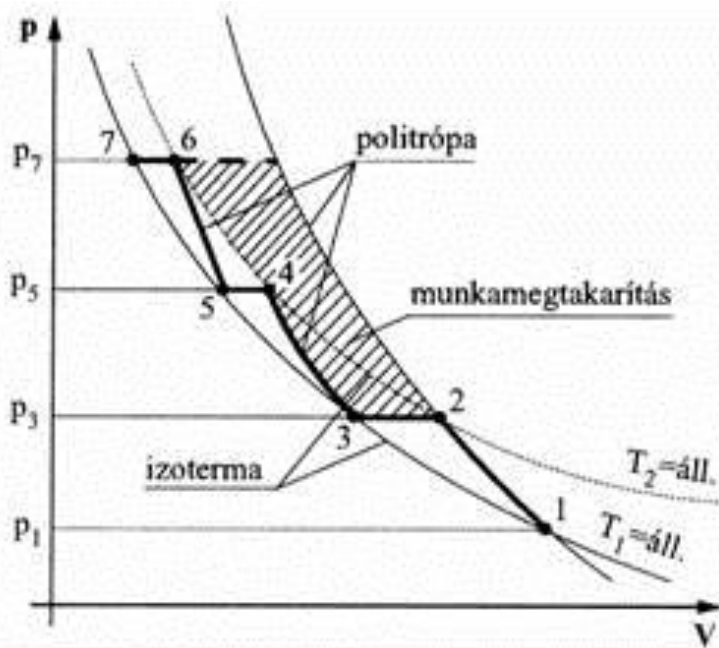


Egyszerű gázturbina



**Gázturbina
kompresszor fokozatok
közötti visszahűtéssel**

Többfokozatú politropikus kompresszió

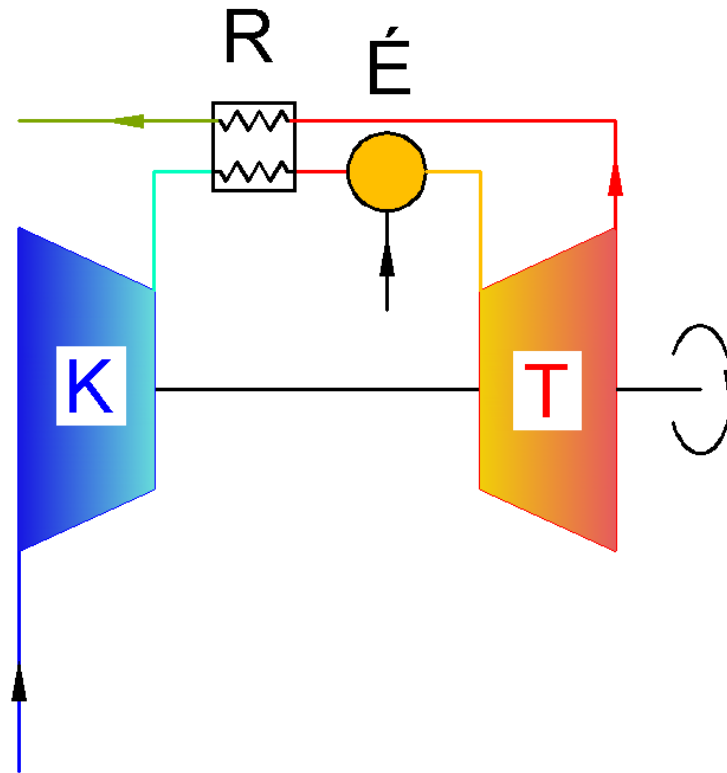


A több fokozat alkalmazásának célja:

- a szállítóképesség kedvező értéken tartása,
- kedvezőbb energetikai viszonyok kialakítása.

Az egyes fokozatok nyomásviszonyait 3 – 6 értékre szokás felvenni.

Gázturbina regeneratív hőcserélővel

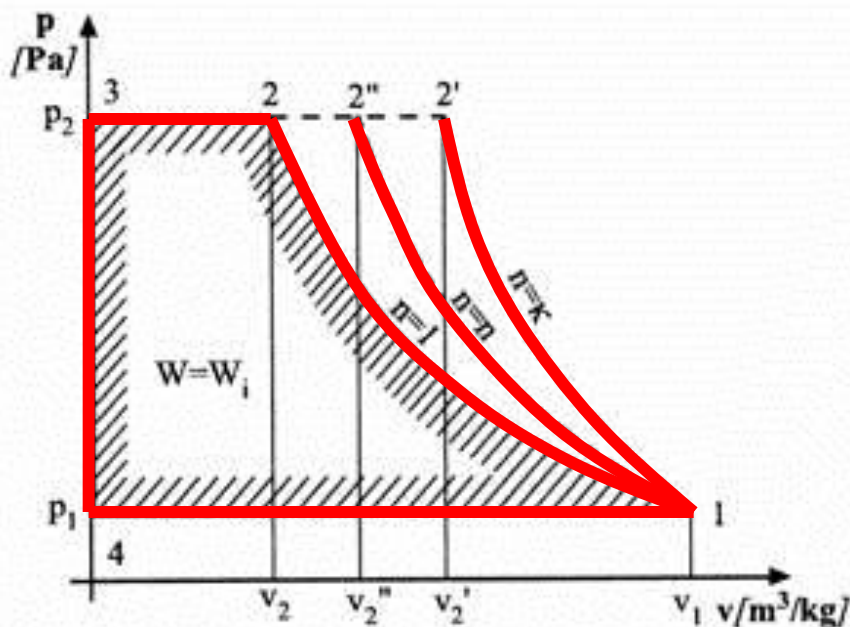


Gázturbina

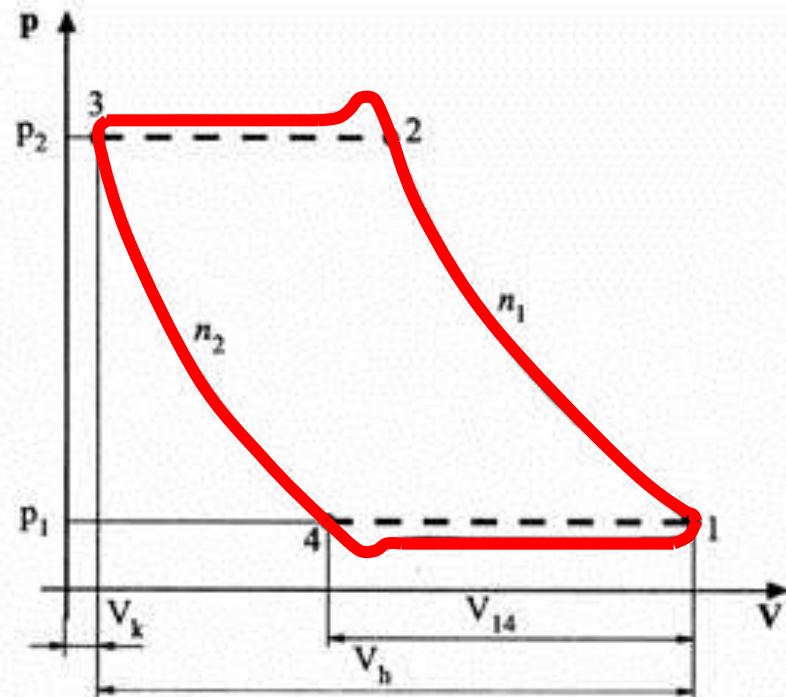


A gázturbina egy olyan hőerőgép, amelyben a levegővel kevert üzemanyag égéstermékei egy turbina lapátjain haladnak keresztül. A turbina egy kompresszort működtet, amely a levegőt szolgáltatja az égési folyamathoz. A gázturbinában keletkező égéstermékek mozgási energiája hasznosítható további turbinák hajtására, vagy az égéstermékeket egy fúvócsőben felgyorsítva reaktív hajtóműként működhet.

Elméleti (káros tér nélküli) és valóságos, dugattyús kompresszor körfolyamata



A dugattyús kompresszor **ideális** munkafolyamata



A valóságos kompresszor munkafolyamata

A hűtéstől függően az állapotváltozás lehet:

- izotermikus,
- politropikus,
- adiabatikus.

en a közeg
dinamikai

A körfolyamat állapotváltozásai:

- 1 – 2.: sűrítés,
- 2 – 3.: kitolás,
- 3 – 4.: nyomásesés,
- 4 – 1.: szívás.

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE