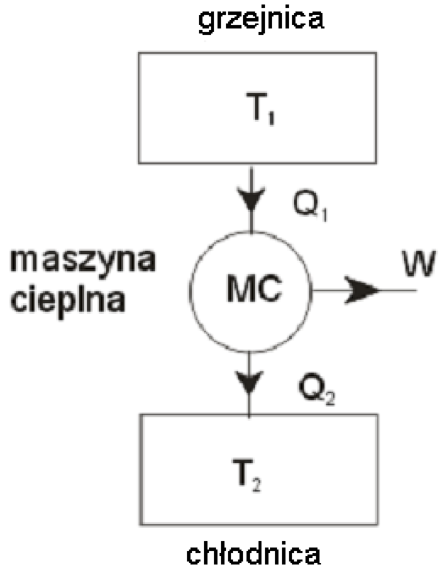
Sprawność maszyn cieplnych.

Z II zasady termodynamiki wynika:

Zamiana ciepła na pracę przez cyklicznie działającą maszynę cieplną jest możliwa tylko przy wykorzystaniu dwóch zbiorników ciepła o różnych temperaturach T_1 i T_2 .



$$T_1 > T_2$$

Ciało robocze po wykonaniu cyklu roboczego powraca do stanu początkowego

$$\Delta U = 0$$

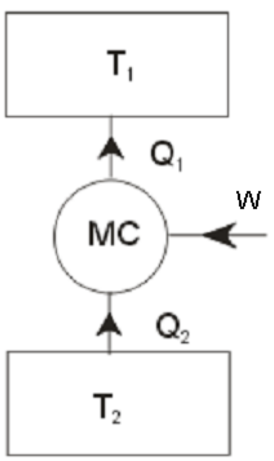
Z I zasady termodynamiki dla jednego cyklu mamy:

$$W = Q_1 - Q_2$$

gdzie W oznacza pracę wykonaną przez układ, Q_1 – ciepło pobrane przez ciało robocze z grzejnicy a Q_2 – ciepło oddane do chłodnicy.
Zdefiniujmy wielkość η:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$ - jest to **sprawność** maszyny cieplnej

Rozważamy procesy kwazistatyczne.



← Można odwrócić cykl pracy maszyny cieplnej, otrzymując w ten sposób maszynę chłodniczą albo pompę cieplną.
Dla maszyny chłodniczej:

$$\varepsilon_C = \frac{Q_2}{W}$$ - skuteczność chłodzenia,

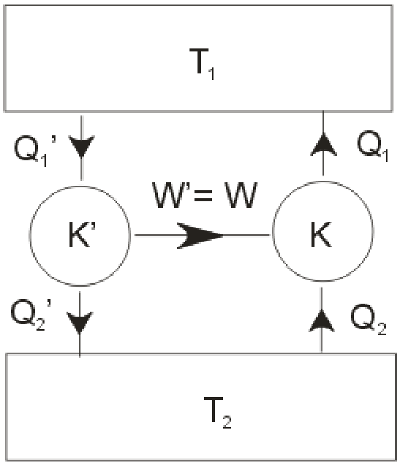
$$\varepsilon_C = \frac{1-\eta}{\eta}$$

Dla pompy cieplnej:

$$\varepsilon_q = \frac{Q_1}{W} = \frac{1}{\eta}$$ - skuteczność pompy cieplnej

Twierdzenie Carnota:

Sprawność dowolnego cyklu odwracalnego zależy tylko od temperatur T_1 i T_2 , a nie zależy od ciała roboczego ani od konstrukcji maszyny.



Sprzęgnijmy układy tak, aby W'=W.

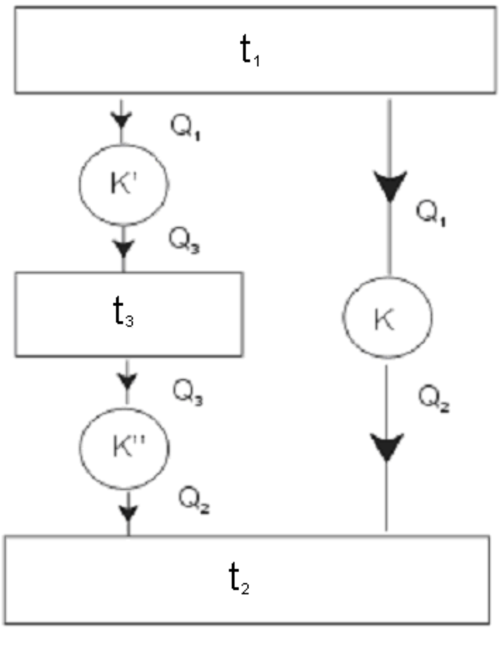
Załóżmy η'>η :

$$\frac{W'}{Q_1'} > \frac{W}{Q_1} \Rightarrow Q_1' < Q_1 \Rightarrow Q_2' < Q_2$$

Praca wykonana przez układ $W' - W = 0$. Jedynym skutkiem działania tego układu byłoby przenoszenie ciepła $Q_2 - Q_2' = Q_1 - Q_1' > 0$ z chłodnicy do grzejnicy. Ale to przeczy II zasadzie termodynamiki. Podobne rozważania można wykonać dla η'<η, co również prowadzi do sprzeczności.
Pozostaje zatem tylko możliwość η'=η !

Absolutna skala temperatur.

Kelvin wprowadził absolutną skalę temperatur. Rozważmy sytuację jak na rysunku poniżej.



$t_1 > t_3 > t_2$

„t" oznacza tu temperaturę nieskalowaną.

$\frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \eta$, z twierdzenia Carnota: $\frac{Q_2}{Q_1} = f(t_1, t_2)$

Łączny efekt działania cykli K' i K" jest taki sam jak cyklu K .

$$\frac{Q_3}{Q_1} = f(t_1, t_3) \quad , \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(t_3, t_2)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{Q_2 / Q_1}{Q_3 / Q_1} = \frac{f(t_1, t_2)}{f(t_1, t_3)}$$
$$\Downarrow$$
$$f(t_3, t_2) = \frac{f(t_1, t_2)}{f(t_1, t_3)}$$

Sprawność cyklu K" nie zależy od t_1 , a zatem:

$$f(t_3, t_2) = \frac{g(t_2)}{g(t_3)}$$

Możemy teraz ustalić absolutną skalę temperatury przez warunek :

$$g(t) = cT$$

gdzie T – **temperatura absolutna**.

Tak więc:

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

Wtedy sprawność maszyny cieplnej możemy napisać jako:

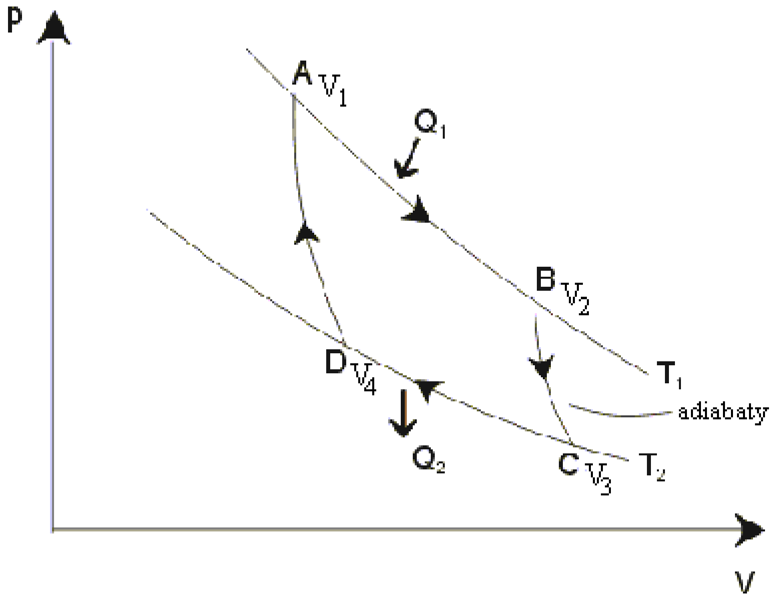
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{- wzór Kelvina}$$

Przypisanie wybranemu punktowi określonej wartości temperatury T definiuje całą skalę:

$$T' = \frac{Q'}{Q} T$$

Cykl Carnota.

W rzeczywistości pomiar nie jest możliwy, gdyż nie dysponujemy odwracalnymi maszynami cieplnymi, możemy jednak rozważyć cykl Carnota, gdzie ciałem roboczym jest gaz doskonały.



A→ B : rozprężamy izotermicznie gaz w temperaturze T_1 od objętości V_1 do V_2 , dostarczając ciepło Q_1 :

$$U_A = U_B, \qquad \Delta U = 0$$

Praca wykonana przez gaz jest równa dostarczonemu ciepłu:

$$W_{AB} = Q_1 = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

B→C : adiabatyczne rozprężanie gazu:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad (\ast)$$

Gaz wykonuje pracę kosztem swojej energii wewnętrznej:

$$\Delta U = U_C - U_B$$

C→D : izotermiczne sprężanie gazu. Praca zewnętrzna zużyta na sprężenie gazu równa się ciepłu oddanemu przez gaz do chłodnicy:

$$W_{CD} = Q_2 = RT_2 \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$

D→A : sprężanie adiabatyczne gazu:

$$T_2 \nearrow T_1 , \quad \Delta U = U_A - U_D > 0$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \quad (\ast\ast)$$

$$\text{z } (\ast) \text{ i } (\ast\ast) \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

Tak więc :

$$W_{CD} = Q_2 = RT_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Sprawność cyklu

$$\eta = 1 - \frac{Q_2(ukl)}{Q_1(zew)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\ast\ast\ast)$$

Sprawność cyklu Carnota jest oczywiście identyczna ze sprawnością wynikającą ze wzoru Kelvina.
Skala termometru gazowego z gazem doskonałym jest identyczna ze skalą temperatury bezwzględnej Kelvina.

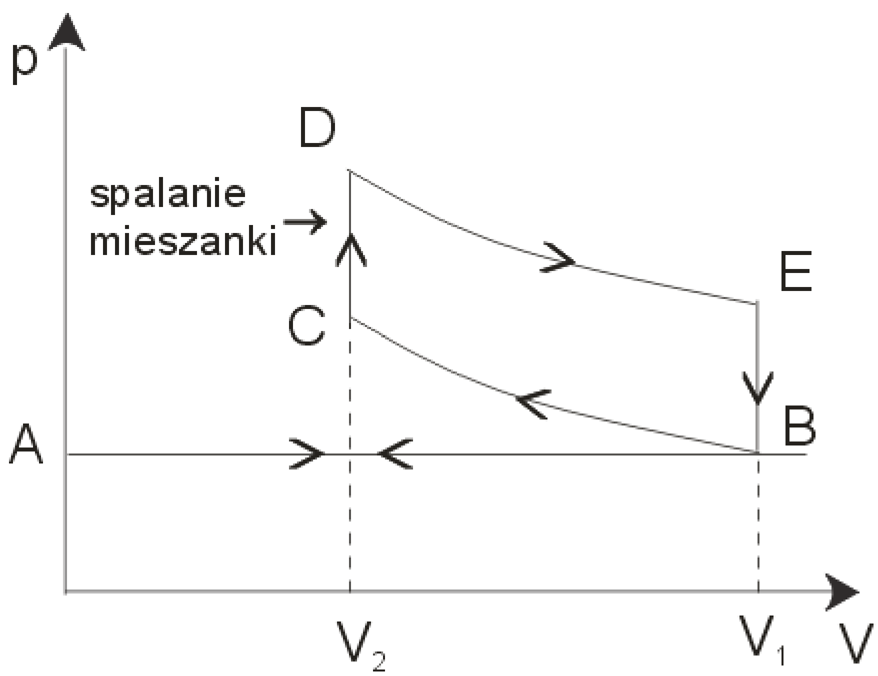
Absolutna skala temperatur:

Wybrany punkt – punkt potrójny wody: 273,16 ^{0}K

Skala Celsjusza: t = T – T_0 [°C], T_0 = 273,15 ^{0}K

T_0 jest zdefiniowana jako temperatura topnienia lodu przy ciśnieniu normalnym.

Cykl Otto.



I suw: A→B - mieszanka zasysana jest do wnętrza silnika,

II suw: B→C - adiabatyczne sprężanie mieszanki od objętości V_1 do V_2,

III suw: C→D→E→B - zapłon mieszanki, wydzielanie ciepła następuje praktycznie w stałej objętości a następnie spaliny rozprężają się adiabatycznie do objętości V_1, otwarcie zaworu wylotowego,

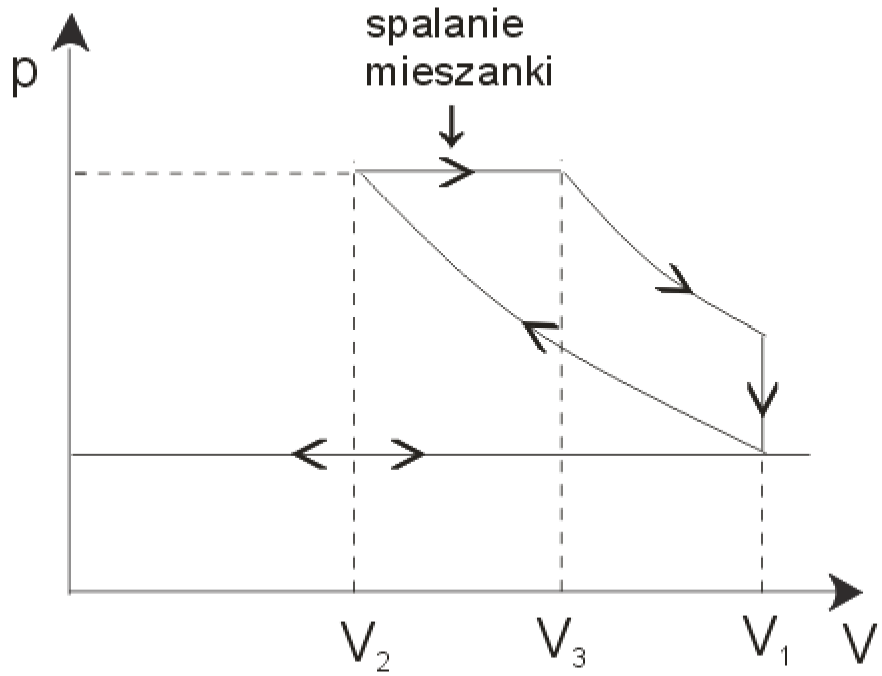
IV suw: B→A - usunięcie spalin na zewnątrz.

Jeśli zastosujemy tutaj wzory opisujące odwracalne przemiany izoparametryczne, to mamy:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

gdzie $r = \dfrac{V_1}{V_2}$ jest to **stopień sprężania**.

<u>Cykl Diesla.</u>



Teoretyczna sprawność takiego procesu:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left(\dfrac{V_3}{V_1}\right)^{\gamma} - \left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma}}{\left(\dfrac{V_3}{V_1}\right) - \left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)}$$

Dla rzeczywistych silników ta sprawność jest mniejsza, gdyż zachodzące w nich procesy są nieodwracalne:

$$\eta_{nieodwr} < 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta_{odwr}$$

Demonstracja: ptak pijący wodę jako przykład silnika cieplnego.