

- *Tepelný pohyb*
- *Tepelná rozťažnosť látok*
- *Stavová rovnica ideálneho plynu*
- *Vnútoraná energia plynov,*
- *1. veta termodynamická,*
- *Izochorický dej,*
- *Izotermický dej,*
- *Izobarický dej,*
- *Adiabatický dej,*
- *Práca plynu pri termodynamických procesoch,*
- *Carnotov cyklus,*
- *Entropia*

Tepelný pohyb



Difúzia

penikanie častíc jednej látky do druhej
najlepšie funguje u plynov
závisí od teploty
pr. parfum

Brownov pohyb

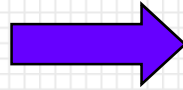
peľové zrnká vo vode
R. Brown 1827 (zrnká vyzerajú ako živé)
vysvetlenie 1905 Einstein = **nárazy molekúl vody**

Tepelný pohyb
= **kinetická energia**

(u tuhých látok a u kvapalín v dôsledku
silných väzieb je nízka)

Teplota

Ako charakterizovať tepelný stav telies?



teplota (t)

termodynamická teplota (T)

Teplota je fyzikálna veličina ... Vyvoláva subjektívne pocity závislé od tepelnej vodivosti látok.

kinetická energia (priemerná) = **teplota**

Teplotné stupnice

Celziova [$^{\circ}\text{C}$] ($0,01^{\circ}\text{C}$... v rovnováhe ľad a voda pri normálnom tlaku)

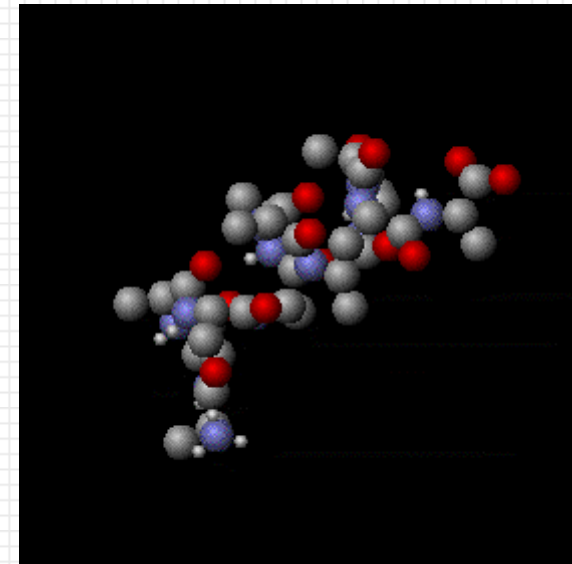
Kelvinova [K] (absolútna)

$$T_0 = 273,16\text{K}$$

... termodynamická teplota pri $0,01^{\circ}\text{C}$, čo je trojný bod vody

$$T[\text{K}] = 273,15 + t[^{\circ}\text{C}]$$

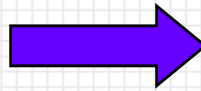
$$t[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15$$



Tepelné kmity proteínu alpha helix (Wikipedia)

Tepelná roztažnost tuhých látek

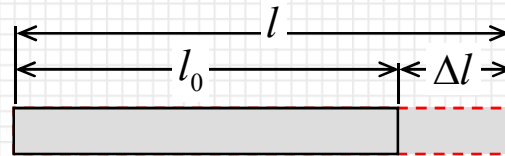
Tepelný pohyb v případě tuhých látek



Rozkmitání atomů okolo rovnovážných poloh

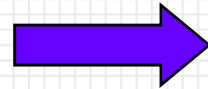
$$\Delta l \approx l_0 \approx \Delta T$$

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



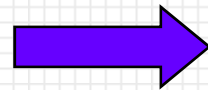
$$\Delta l = l - l_0$$

$$\frac{dl}{dT} \rightarrow \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

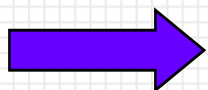


$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT}$$

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{l - l_0}{T - T_0}$$



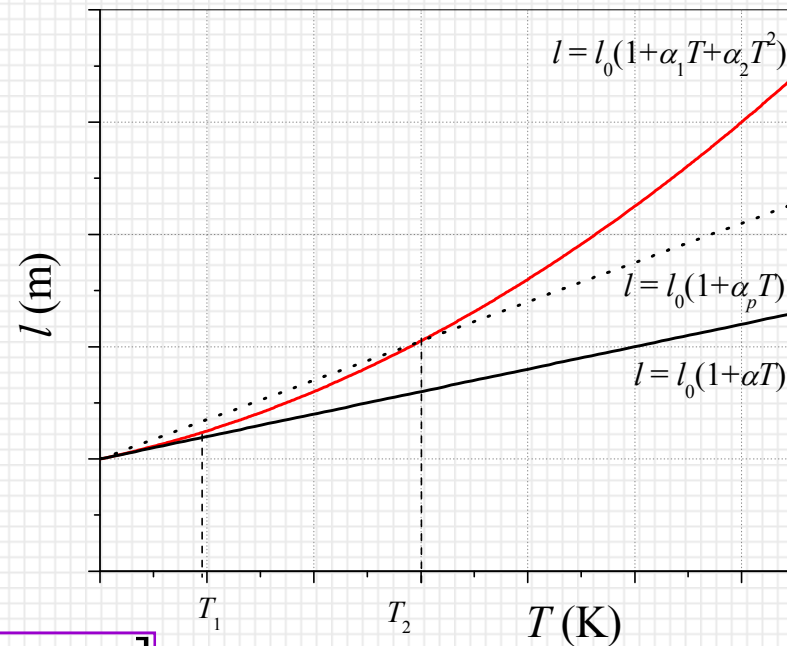
$$l = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$



$$l = l_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2)$$

... pre vyššie teploty

t. j. **zväčšenie rozmerov**



Tepelná rozťažnosť tuhých látok - pokračovanie

Materiál	$\alpha \cdot 10^{-6} (\text{K}^{-1})$
Hliník	24
Meď	17
Mosadz	19
Sklo	10
Zinok	29
Železo	12

V prípade objemovej rozťažnosti telies

$$V = l^3 = l_0^3 (1 + \alpha (T - T_0))^3$$

$$V = V_0 (1 + 3\alpha \Delta T + 3\alpha^2 \Delta T^2 + \alpha^3 \Delta T^3)$$

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 (1 + \beta \Delta T)}$$

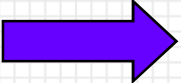
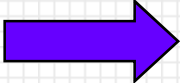
$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T)$$

$$\frac{1}{1 + \beta \Delta T} = 1 - \beta \Delta T + \beta^2 \Delta T^2 - \beta^3 \Delta T^3 + \dots$$

$\beta > 0$ vo väčšine prípadov, ale voda v intervale do $3,99^\circ\text{C}$ má $\beta < 0$

Pr. ortuťový teplomer

Teplo, tepelná kapacita

pohyb molekúl  kinetická energia molekúl  **Teplo (energia)**

Mechanickou energiou napr. trením sa mení usporiadaný pohyb na neusporiadaný pohyb molekúl.

Pri styku dvoch telies teplejšie odovzdáva kinetickú energiu (teplo) chladnejšiemu.

$$\Delta Q = c m \Delta T$$

$c \dots [Jkg^{-1}K^{-1}]$... merná tepelná kapacita

Merná tepelná kapacita je množstvo tepla, ktoré je potrebné na ohriatie (ochladenie) jedného kilogramu látky o jeden teplotný stupeň.

$$\Delta Q = C_k \Delta T$$

$C_k \dots [JK^{-1}]$... tepelná kapacita

Tepelná kapacita je teplo, ktoré je potrebné na ohriatie telesa o jeden teplotný stupeň .

Stavová rovnica ideálneho plynu

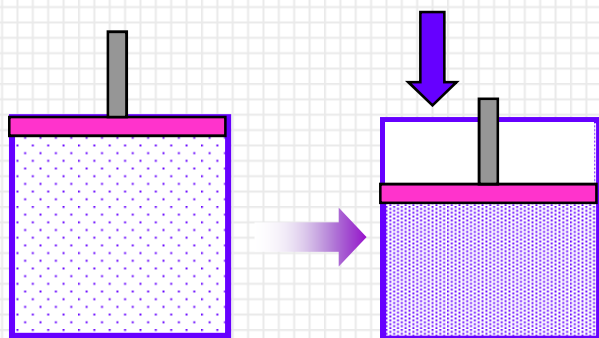
Ako charakterizovať plyn z hľadiska veličín p, V, T ?

p, V, T ... **stavové veličiny**, lebo popisujú stav plynu

$$\frac{pV}{T} = nR \quad \text{resp.} \quad \frac{pV}{T} = \text{konšt.}$$

$$R = 8,314 JK^{-1} mol^{-1}$$

$$R = 8314 JK^{-1} kmol^{-1}$$



stav 1

$$p_1, V_1, T_1$$

stav 2

$$p_2, V_2, T_2$$

n ... látkové množstvo [mol]
predstavuje množstvo látky s počtom molekúl
určeným tzv. Avogadrovým číslom ($6,023 \cdot 10^{23} mol^{-1}$)

Vnútoraná energia sústavy



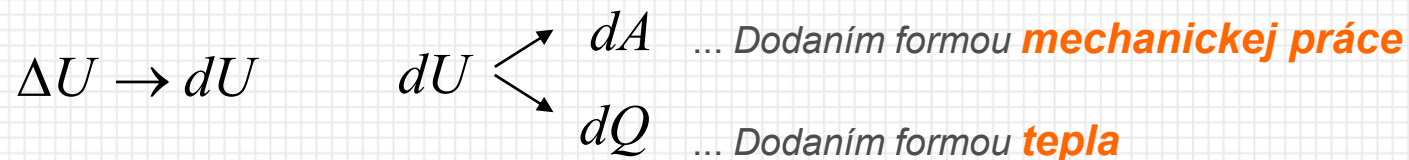
$$U = E_p + E_k$$

$$\Delta U = U_1 - U_0$$

$\Delta U = 0$... Vnútoraná energia sústavy sa nemení

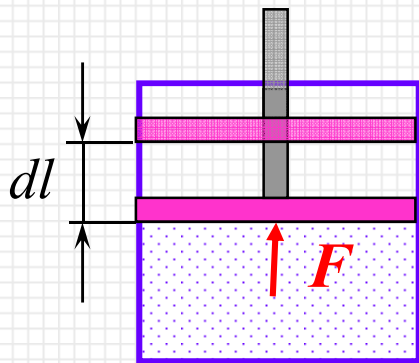
$\Delta U > 0$... Vnútoraná energia sústavy rastie

$\Delta U < 0$... Vnútoraná energia sústavy klesá



Práca plynu, 1. veta termodynamická

1. Energia plynu dodaná formou práce



A ... Ak prácu koná **vonkajšia sila**

$A' = -A$... Ak prácu koná **plyn**

Práca plynu:

$$dA' = Fdl \quad \longrightarrow \quad = pSdl \quad \longrightarrow \quad = pdV$$

$$A' = \int_{V_0}^{V_1} pdV$$

2. Energia plynu dodaná formou tepla

Q ... Teplo **dodané** sústave

$-Q$... Teplo **odovzdané** sústavou

$$\Delta U = Q + A$$

$$\Delta U = Q - A'$$

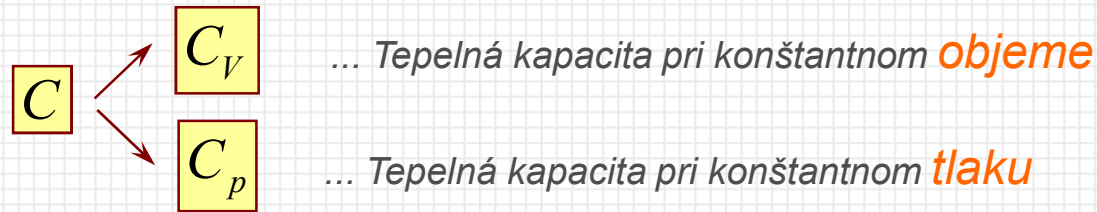
1. v. termodynamická Prírastok vnútornej energie sa rovná súčtu sústave dodaného tepla a dodanej práce.
(príp. odovzdanej práce)

$$dU = dA + dQ$$

Pre kruhový dej platí

$$\oint dU = 0$$

Tepelné kapacity látok, Mayerov vzťah



? Aký je vzťah medzi C_p a C_V ?

$$dQ = CdT$$

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V$$

$$dQ = dU + pdV = dU, (dV = 0) \Rightarrow \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT}$$

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p = \left(\frac{dU + pdV}{dT} \right)_p = \frac{dU}{dT} + \left(p \frac{dV}{dT} \right)_p = C_V + \left(p \frac{dV}{dT} \right)_p$$

Mayerov vzťah

$$C_p = C_V + R$$

$$pdV = RdT \Rightarrow \left(p \frac{dV}{dT} \right)_p = R$$

Termodynamické procesy

dej

izotermický ... $T = \text{konšt.}$

$$pV = \text{konšt.}$$

Boylev-Mariottov zákon ... pri stálej teplote je súčin tlaku a objemu ideálneho plynu konštantný

izobarický ... $p = \text{konšt.}$

$$\frac{V}{T} = \text{konšt.}$$

Gay-Lussacov zákon (1) ... pri stálom tlaku je podiel objemu a termodynamической teploty ideálneho plynu konštantný

izochorický ... $V = \text{konšt.}$

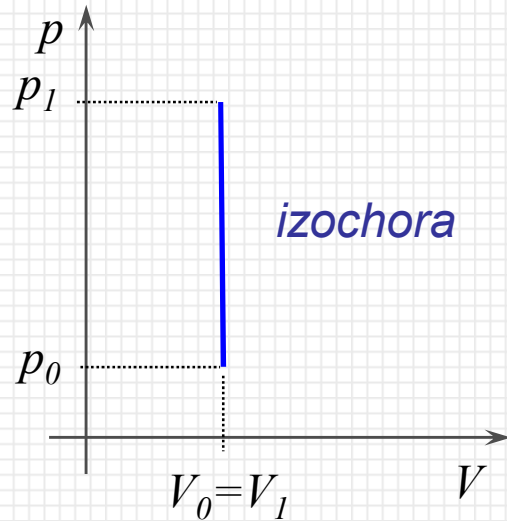
$$\frac{p}{T} = \text{konšt.}$$

Gay-Lussacov zákon (2) ... pri stálom objeme je podiel tlaku a termodynamической teploty ideálneho plynu konštantný

Daltonov zákon ... Výsledný tlak zmesi plynov sa rovná súčtu parciálnych tlakov zložiek zmesi

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

Izochorický dej, práca



Vo všeobecnosti teplo dodané sústave spôsobí zvýšenie vnútornej energie a vykonanie práce:

$$dQ = dU + dA'$$

$$dU = C_V dT$$

$$dA' = p dV$$

$$dQ = C_V dT + p dV$$

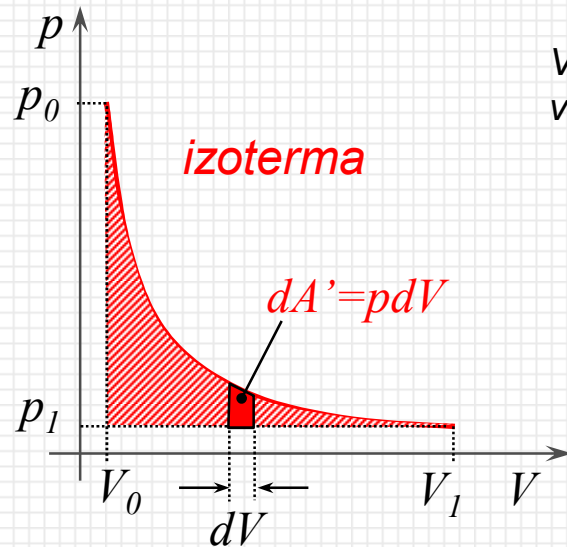
Pri izochorickom deji $dV = 0$

$$dQ = C_V dT$$

$$dQ = mc_V dT$$

Teplo dodané sústave pri izochorickom deji spôsobí len **zmenu vnútornej energie**.

Izotermický dej, práca



Vo všeobecnosti teplo dodané sústave spôsobí zvýšenie vnútornej energie a vykonanie práce:

$$dQ = C_V dT + pdV$$

Pri izotermickom deji $dT = 0$

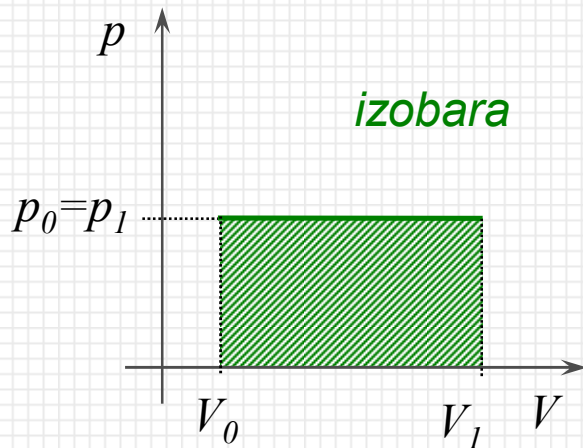
$$dQ = dA' = pdV$$

$$p = \frac{nRT_0}{V}$$

$$Q = A' = \int_{V_0}^{V_1} pdV \quad \longrightarrow \quad A' = nRT_0 \int_{V_0}^{V_1} \frac{dV}{V}$$

$$A' = nRT_0 \ln \frac{V_1}{V_0}$$

Izobarický dej, práca



Vo všeobecnosti teplo dodané sústave spôsobí zvýšenie vnútornej energie a vykonanie práce:

$$dQ = dU + dA'$$

$$dQ = d(U + pV)$$

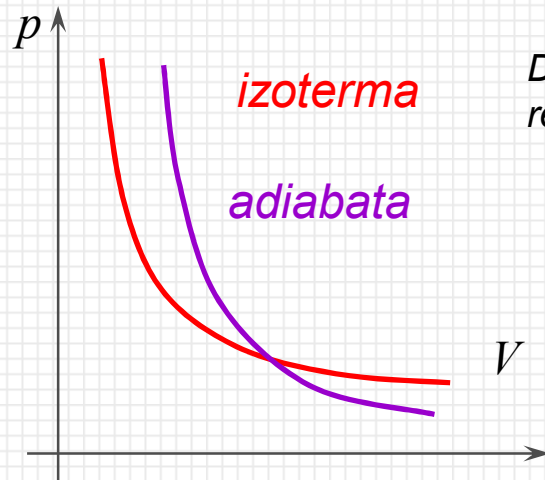
H ... entalpia

$$dQ = dH$$

$$H = U + pV$$

Teplo prijaté sústavou pri izobarickom deji sa rovná prírastku entalpie.

Adiabatický dej, Poissonova rovnica



Dej bez výmeny tepla sústavy s okolím,
resp. dej prebiehajúce veľmi rýchlo.

$$dQ = 0$$

$$pdV + Vdp = RdT$$

$$dT = \frac{pdV + Vdp}{R}$$

$$0 = C_V \frac{pdV + Vdp}{R} + pdV \quad / \frac{R}{C_V}$$

$$0 = pdV \underbrace{\frac{C_V + R}{C_V}}_{\gamma} + Vdp$$

γ

... Poissonova konštanta

$$0 = \int \gamma \frac{dV}{V} + \int \frac{dp}{p}$$

Poissonova rovnica

$$\ln C = \gamma \ln V + \ln p$$



$$V^\gamma p = \text{konšt.}$$

Adiabatický dej, práca pri adiabatickej expanzii

$$A' = \int_{V_0}^{V_1} p dV$$

$$V^\gamma p = \text{konšt.}$$

$$p = \frac{p_0 V_0^\gamma}{V^\gamma}$$

$$A' = p_0 V_0^\gamma \int_{V_0}^{V_1} \frac{1}{V^\gamma} dV$$

$$A' = \frac{p_0 V_0^\gamma}{1-\gamma} (V_1^{1-\gamma} - V_0^{1-\gamma})$$

$$A' = \frac{1}{1-\gamma} (p_0 V_0^\gamma V_1^{1-\gamma} - p_0 V_0^\gamma V_0^{1-\gamma}) \quad p_0 V_0^\gamma = p_1 V_1^\gamma$$

$$A' = \frac{1}{1-\gamma} (p_1 V_1^\gamma V_1^{-\gamma} V_1 - p_0 V_0^\gamma V_0^{-\gamma} V_0)$$

$$A' = \frac{1}{1-\gamma} (p_1 V_1 - p_0 V_0)$$

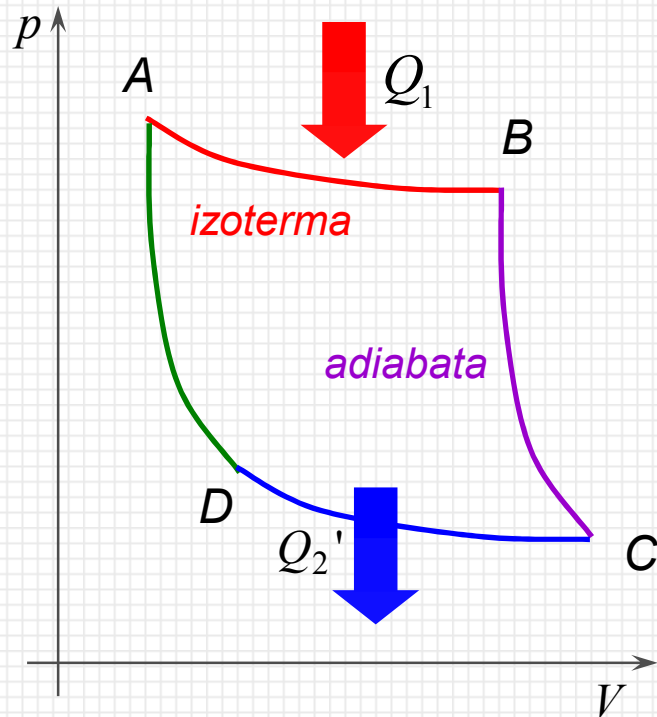
$$A' = \frac{nR}{1-\gamma} (T_1 - T_0)$$

$$\gamma = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V}$$

$$A' = \frac{nR}{1 - 1 + \frac{R}{C_V}} (T_1 - T_0)$$

$$A' = nC_V (T_1 - T_0)$$

Carnotov cyklus



Izotermická expanzia
Adiabatická expanzia
Izotermická kompresia
Adiabatická kompresia

Kruhový dej, pri ktorom plyn koná prácu na úkor svojej vnútornej energie.

$$A' = A'_{AB} + A'_{BC} + A'_{CD} + A'_{DA}$$

$$A'_{AB} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} = Q_1$$

Ohrievač dodáva teplo Q_1 a plyn koná prácu pri konštantnej teplote T_1 .

$$A'_{BC} = nC_V(T_2 - T_1)$$

Rozpínanie plynu pokračuje ale keďže dodané teplo je nulové teplota klesne z T_1 na T_2 .

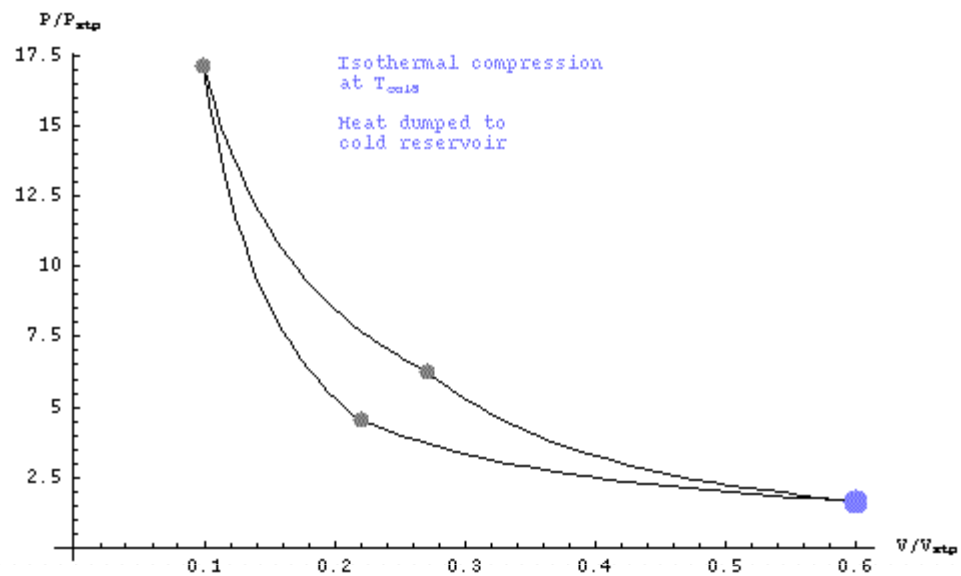
$$A'_{CD} = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} = Q_2'$$

Ohrievač odoberá teplo Q_2 , pričom dochádza ku kompresii plynu pri konštantnej teplote T_2 .

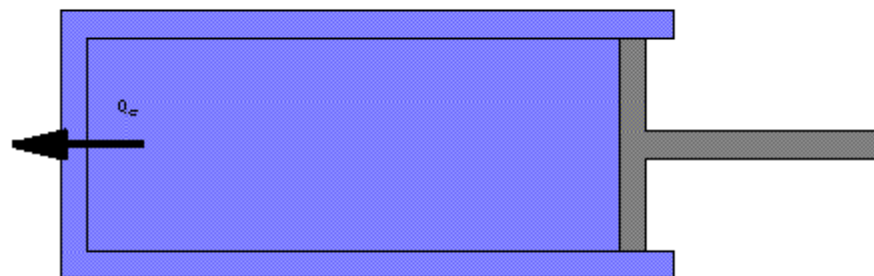
$$A'_{DA} = nC_V(T_1 - T_2)$$

Kompresia plynu pokračuje ale keďže odvádzané teplo je nulové teplota vzrastie z T_2 na T_1 .

Carnotov cyklus



Diathermal walls



http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/carnot.htm

Účinnosť Carnotovho deja, 2. veta termodynamická

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1}$$

Tepelný stroj ... periodicky sa opakujúci kruhový dej so systematickou premenou tepla na prácu.

$$\eta = \frac{nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}}{nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

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

Účinnosť tepelného stroja je daná len rozdielom teploty **ohrievača** a **chladiča**.

Napr. pre rozdiel teplôt 0°C a 100°C je účinnosť $\eta = 26,8\%$

Nie je teda možný tepelný stroj premieňajúci všetko teplo na prácu. Toto vyjadruje **2. veta termodynamická**: Nie je možné zostrojiť periodicky pracujúci stroj, ktorý by len odoberal teplo zo zásobníka a konal rovnocennú prácu.