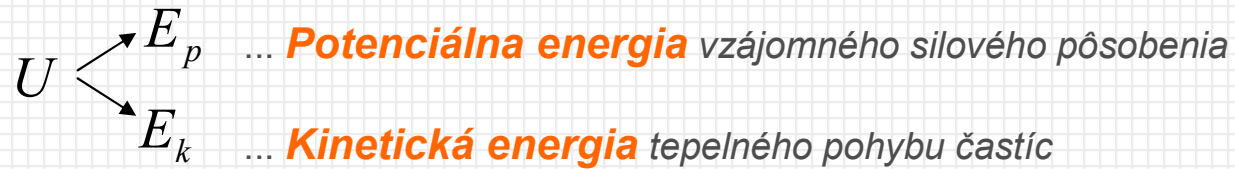


Termodynamika

- *Vnútorná energia plynov,*
- *1. veta termodynamická,*
- *Izochorický dej,*
- *Izotermický dej,*
- *Izobarický dej,*
- *Adiabatický dej,*
- *Práca plynu pri termodynamických procesoch,*
- *Carnotov cyklus,*
- *Entropia*

Vnútorná energia sústavy



$$U = E_p + E_k$$

$$\Delta U = U_1 - U_0$$

$$\Delta U = 0 \quad \dots \text{Vnútorná energia sústavy sa nemení}$$

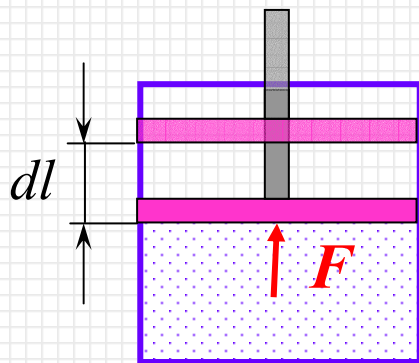
$$\Delta U > 0 \quad \dots \text{Vnútorná energia sústavy rastie}$$

$$\Delta U < 0 \quad \dots \text{Vnútorná energia sústavy klesá}$$

$$\Delta U \rightarrow dU \quad dU \begin{cases} \rightarrow dA \dots \text{Dodaním formou mechanickej práce} \\ \rightarrow dQ \dots \text{Dodaním formou tepla} \end{cases}$$

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

$$\Delta U = A + Q$$

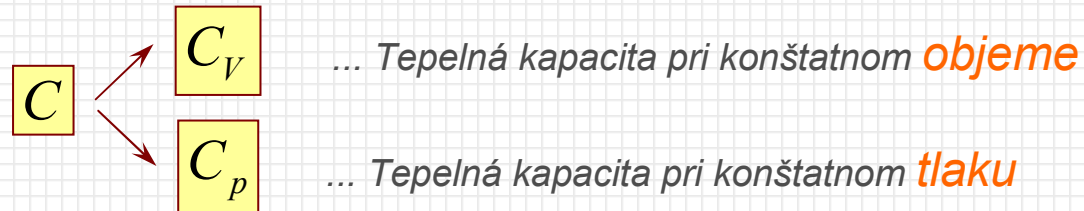
$$\Delta U = A' - Q$$

1. v. termodynamická Prírastok
vnútornej energie sa rovná súčtu sústave
dodaného tepla a dodanej 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 ?

$$dQ = CdT$$

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

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

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

Mayerov vzťah

$$C_p = C_V + R$$

$$pdV = RdT$$

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

R

Termodynamické procesy

dej

izotermický ... $T = \text{konšt.}$

$$pV = \text{konšt.}$$

Boylov-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 termodynamickej teploty ideálneho plynu konštantný

izochorický ... $V = \text{konšt.}$

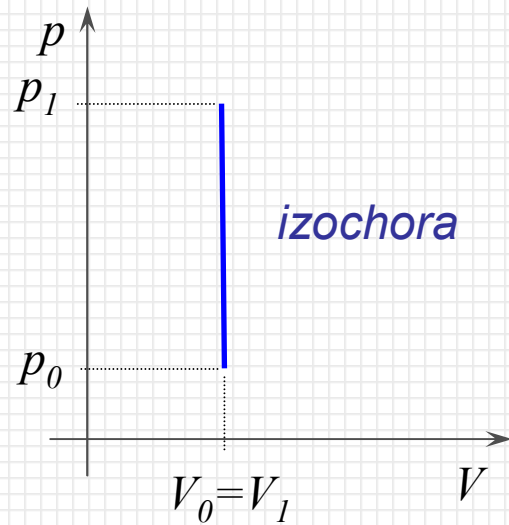
$$\frac{p}{T} = \text{konšt.}$$

Gay-Lussacov zákon (2) ... pri stálom objeme je podiel tlaku a termodynamickej 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:

$$dQ = dU + dA'$$

$$dU = C_V dT$$

$$dA' = p dV$$

$$dQ = C_V dT + p dV$$

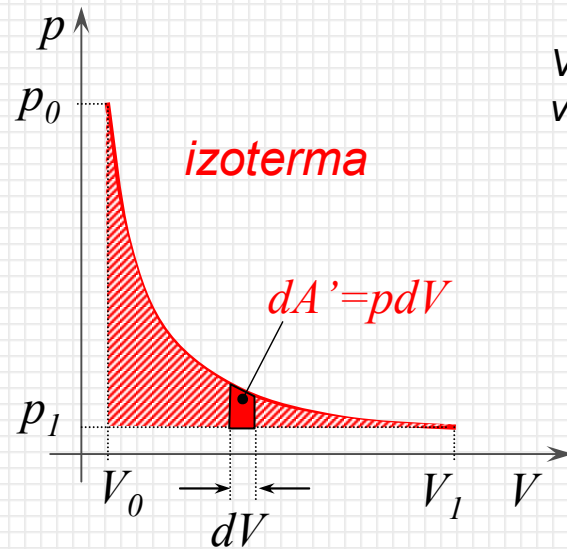
Pri izochorickom deji $dV = 0$

$$dQ = C_V dT$$

$$dQ = mc_V dT$$

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:

$$dQ = C_V dT + p dV$$

Pri izotermickom deji $dT = 0$

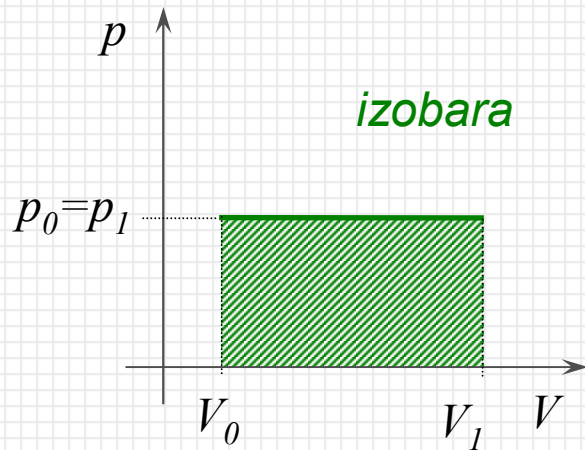
$$dQ = dA' = p dV$$

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

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

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

Izobarický dej, práca



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

$$dQ = dU + dA'$$

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

H

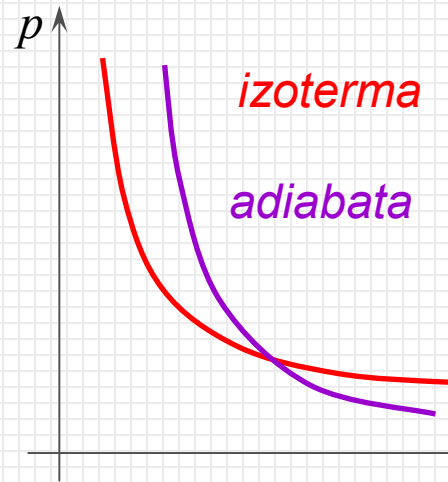
... entalpia

$$dQ = dH$$

$$H = U + pV$$

Teplo prijaté sústavou pri izobarickom deji sa rovná prírastku entalpie.

Adiabatický dej, Poissonova rovnica



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

$$dQ = 0$$

$$pdV + Vdp = nRdT$$

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

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

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

$$\gamma$$

... 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

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

$$V^\gamma p = \text{konšt.} \quad p = \frac{p_0 V_0^\gamma}{V^\gamma}$$

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

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

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

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

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

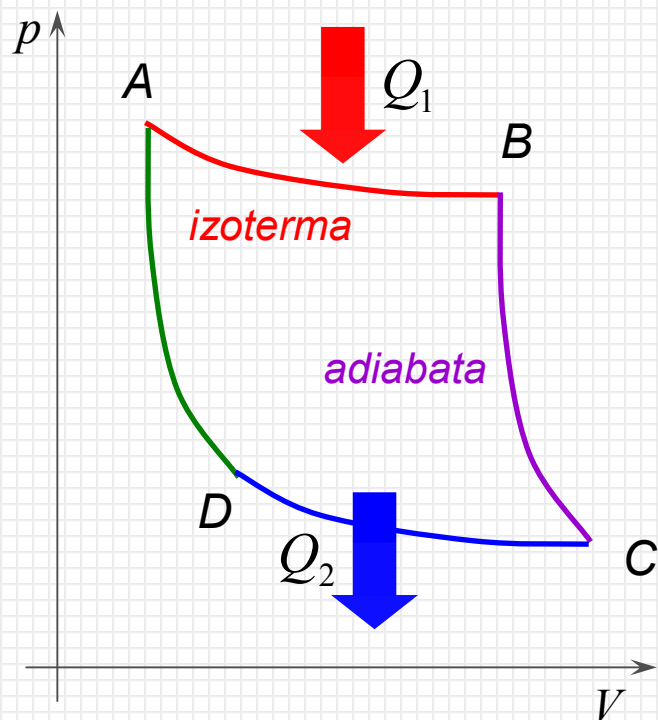
$$A' = \frac{nR}{1-\gamma} (T_1 - T_0)$$

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

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

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

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 konštatnej 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 .

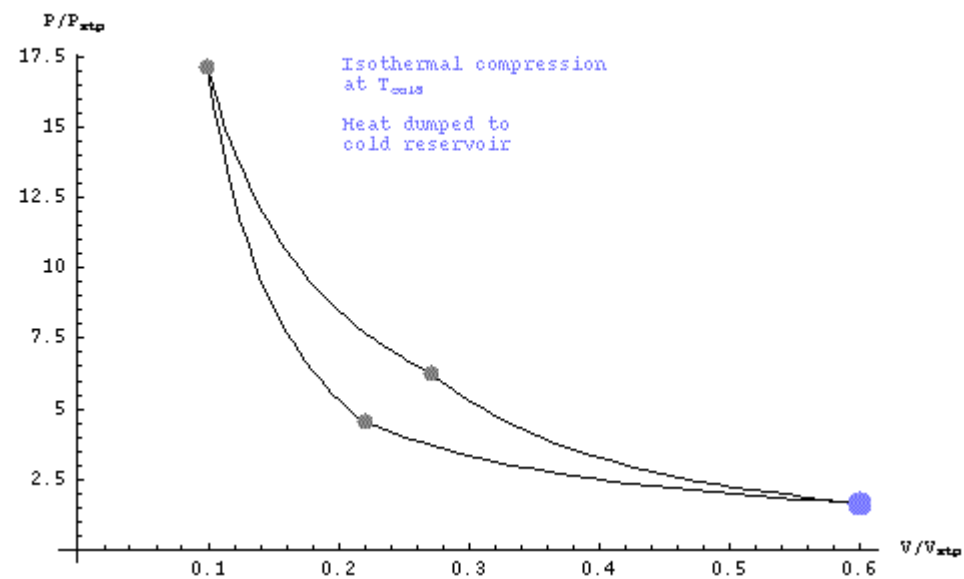
$$A'_{CD} = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} = Q_2$$

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

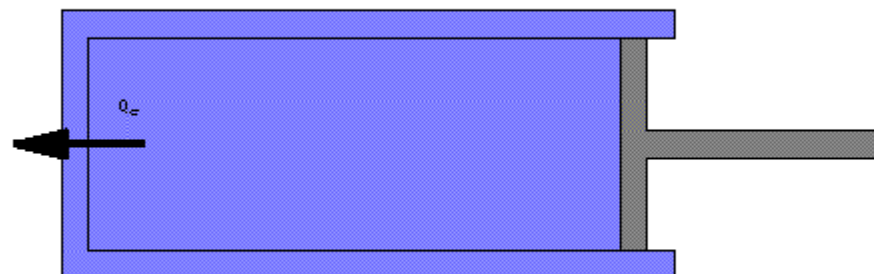
$$A'_{DA} = nC_V(T_1 - T_2)$$

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.*