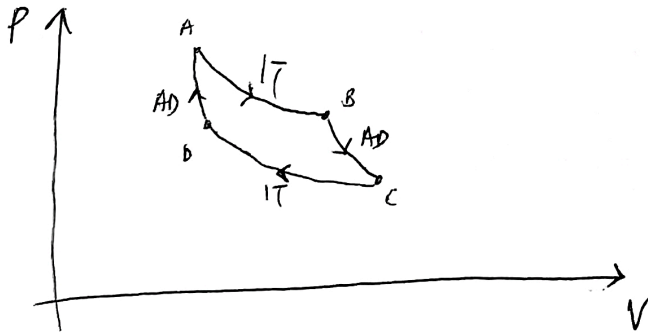


Altri cicli di interesse rilevante

• Ciclo di Carnot ("il più efficiente" 1824)

Sadi Carnot

2 isoterme + 2 adiabatiche



(James)

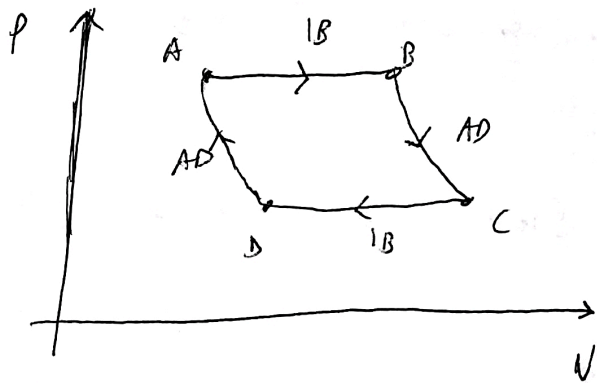
(George)

(John)

• Ciclo di Joule / ciclo di Brayton

(1872 - Barber 1791)

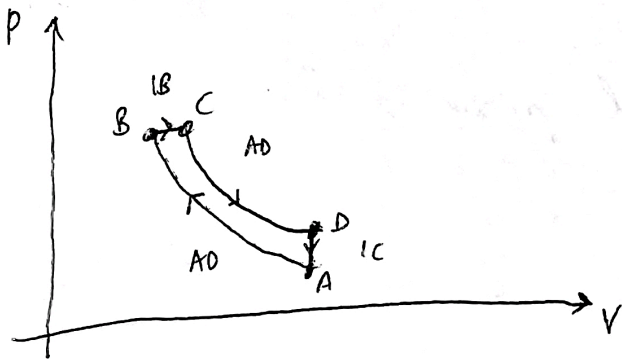
2 adiabatiche + 2 isobore



• Ciclo di ~~Otto~~ Diesel

Rudolf Diesel (1893)

2 adiabatiche + isobara + isocora



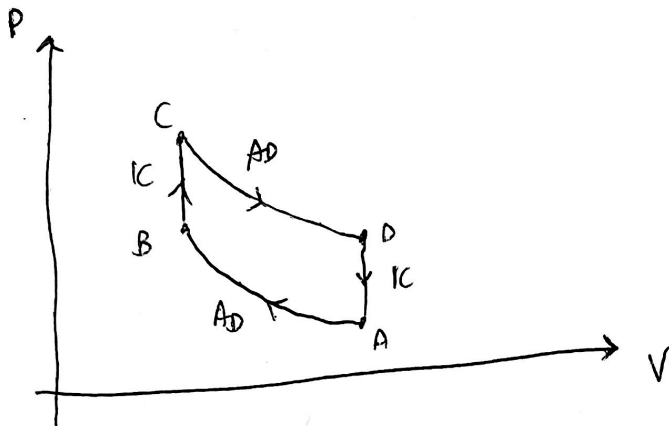
alla base del funzionamento del motore Diesel,

lo studieremo anche in seguito

(a breve)

• Ciclo di Otto

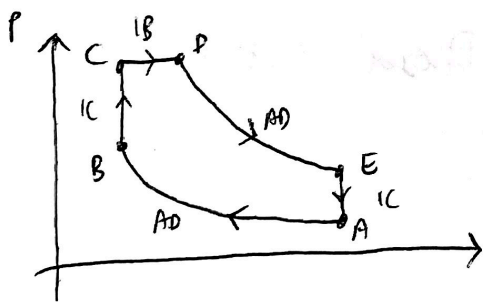
2 adiabatiche + 2 isocore



Alla base dei motori a benzina (anche questo lo studieremo meglio a breve)

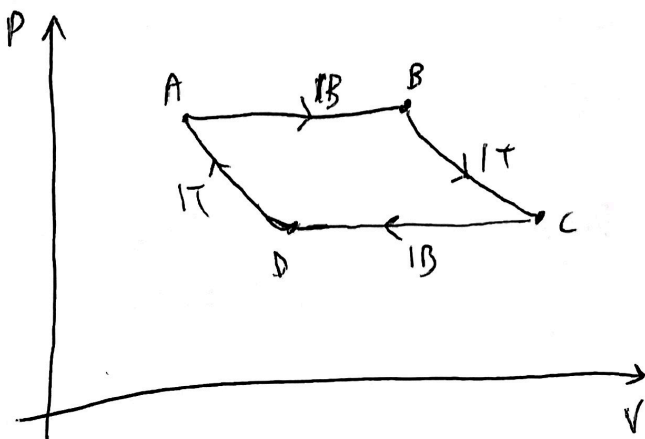
• Ciclo di Sabatini / dual combustion / mixed / limited pressure / Selliger
 Introdotta da ^(Gustav) Trinkler? (anno incerto)

Combina Otto e Diesel, che si ricompongono nel limite in cui viene eliminata una ~~isobara~~ isobara • ricorre



2 adiabatiche + 2 isocore + 1 isobara

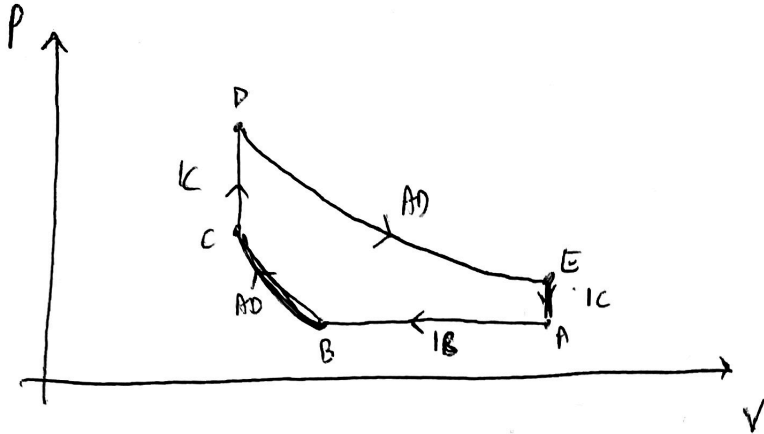
• (Secondo) Ciclo di Ericsson ^(Johann) (1853) → il primo è il ciclo di Joule



2 isoterme + 2 isobare

• Ciclo di Miller ^(Ralph) (1957)

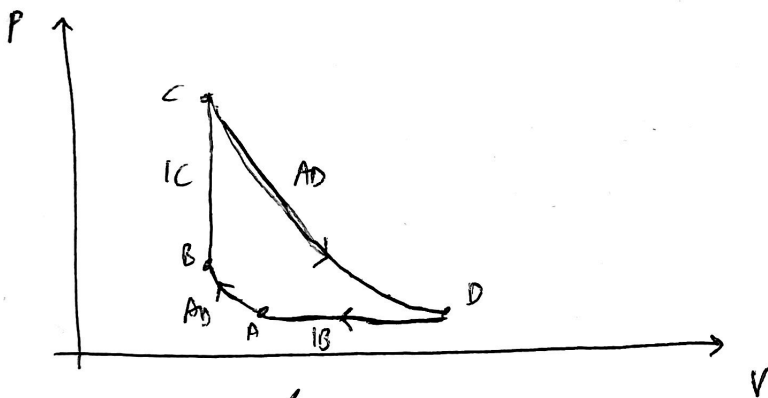
Simile a Sabatini ma con isobara spostata in fondo



2 adiabatiche + 2 isocore
+ 1 isobara

• Ciclo di Humphrey

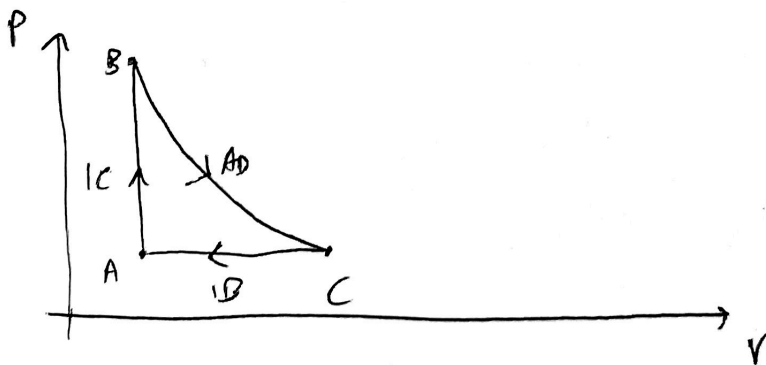
Variante di ciclo di Joule con ~~1 isobara~~ → 1 isocora → 1 isocora



2 adiabatiche
+ 1 isobara + 1 isocora

(Jean Joseph Etienne)

• Ciclo di Lenoir (1860)



1 isocora + 1 adiabatica + 1 isobara

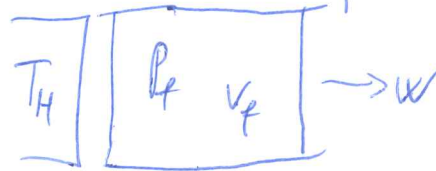
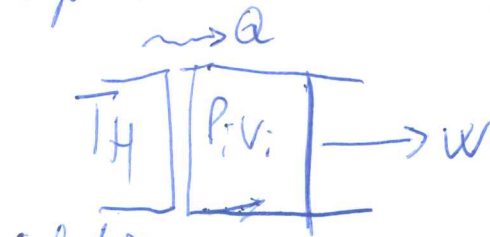
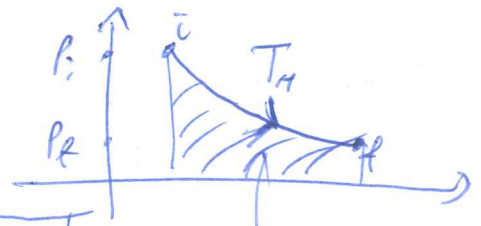
E molti altri!

Es.: Bell/Coleman, Stodolard, Manson, Atkinson, Scuderi, Rankine

Macchine termiche

● Ciclo termodinamico è un esempio di macchina termica, ovvero un dispositivo che può produrre lavoro meccanico grazie alle interazioni con apparati meccanici, assorbendo calore da ~~serbatoi~~ serbatoi "caldi" e cedendolo a serbatoi "freddi" in modo da poter periodicamente ritornare al punto di partenza.

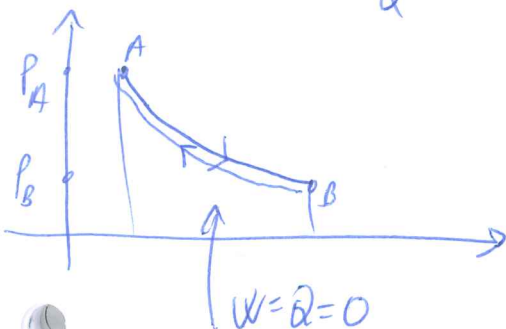
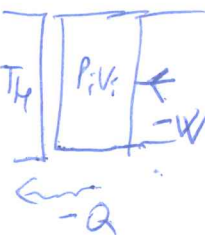
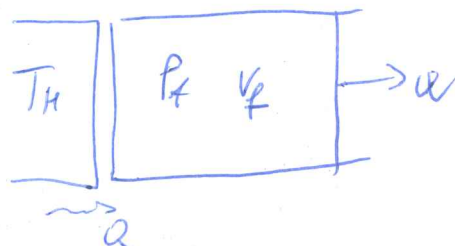
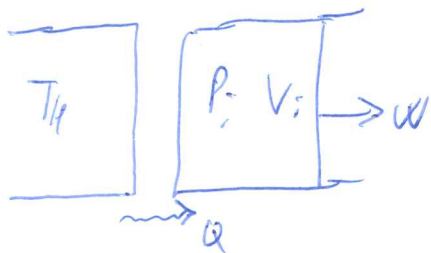
● Prototipo "inutile" di macchina termica
espansione isoterma quasistatica



... preleva calore da H ... e lo trasforma integralmente in lavoro
... ma deve continuare a espandersi! → ingombrava

● Altro prototipo "inutile" è ciclico

● come sopra, più il processo inverso



$$\Delta U = 0, \quad Q = W = 0$$

↑ inevitabile fintanto che si lavora a una sola temperatura

$$W = nR T_H \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) + nR T_H \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) = 0 \quad Q = W = 0$$

Affinché una macchina termica ^{utilica} sia "utile" deve produrre lavoro (area in diagramma P-V, percorso in senso orario, $\neq 0$), a spese di una quantità di energia termica netta $Q=W$ (dato che $\Delta U=0$ in quanto trasformazione è ciclica). ~~Separiamo~~

Separiamo

$$Q = Q_{IN} + Q_{OUT} = Q_{IN} - |Q_{OUT}|$$

\uparrow ≥ 0 , assorbito \nwarrow < 0 , ceduto

Primo principio della termodinamica

$$0 = \Delta U = Q - W = Q_{IN} - |Q_{OUT}| - W \Rightarrow \boxed{W = Q_{IN} - |Q_{OUT}|}$$

Q_{OUT} ceduto all'ambiente \leftarrow
e non utilizzabile per produrre lavoro

non tutta l'energia termica assorbita è convertita in lavoro/energia meccanica

Serve più di una sorgente termica

~~Assorbe Q_{IN} e cede Q_{OUT}~~



"preleva" Q_{IN} , "scarica" Q_{OUT} , e produce lavoro

$$W = Q_{IN} - |Q_{OUT}|$$

Rendimento : quantifica l'"efficienza" del sistema

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_{IN}} = \frac{Q_{IN} - |Q_{OUT}|}{Q_{IN}} = 1 - \frac{|Q_{OUT}|}{Q_{IN}}}$$

Per definizione vogliamo $W \geq 0 \rightarrow Q_{IN} \geq |Q_{OUT}|$

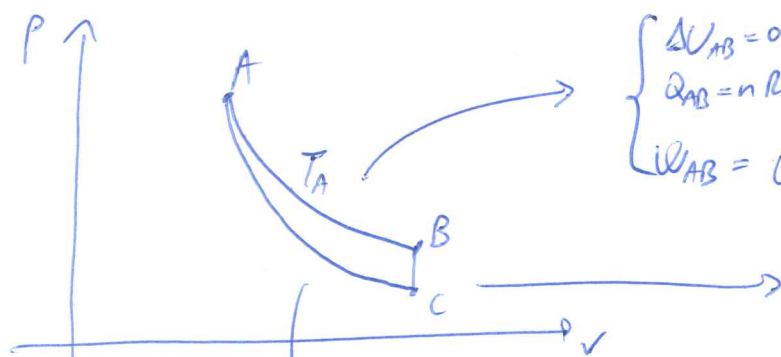
$$\Rightarrow \boxed{0 \leq \eta \leq 1}$$

$\eta=0$: macchina inutile

$\eta=1$: rendimento massimo, ma richiede $|Q_{out}|=0$ o $Q_{in}=\infty$
impossibile da raggiungere in casi reali

In pratica $\eta \ll 1$ (la termodinamica si sviluppò nell'1800 anche per cercare di quantificare η per la rivoluzione industriale)

• Esempio visto precedentemente: IT-IC-AD



$$\begin{cases} \Delta U_{AB} = 0 \\ Q_{AB} = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) > 0 \text{ assorbito!} \\ W_{AB} = Q_{AB} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_{BC} = nC_V(T_C - T_A) \\ Q_{BC} = nC_V(T_C - T_A) \\ W_{BC} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_{CA} = nC_V(T_A - T_C) \\ Q_{CA} = 0 \\ W_{CA} = nC_V(T_C - T_A) \end{cases}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}} = \frac{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) - nC_V(T_A - T_C)}{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = 1 - \frac{C_V(T_A - T_C)}{RT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$$

$Q_{in} = Q_{AB}$

Definiamo $r = \frac{V_B}{V_A} > 1$

Durante adiabatica $TV^\gamma = \text{const}$ $\left[\gamma = \frac{C_P}{C_V} > 1\right]$

$$\Rightarrow \frac{T_A - T_C}{T_A} = 1 - \frac{T_C}{T_A} = 1 - \left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{\gamma-1} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} = 1 - r^{1-\gamma}$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{C_V}{R} \frac{1 - r^{1-\gamma}}{\ln r}, \quad r > 1, \gamma > 1$$

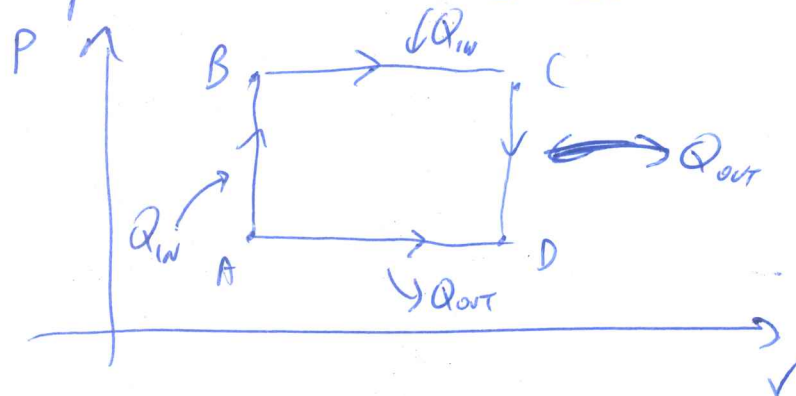
$r \rightarrow \infty$: $V_B \gg V_A, T_C \rightarrow 0$
 $V_C \gg V_A$

$r \rightarrow 1$: $V_B \rightarrow V_A, T_C \rightarrow T_A$
 $V_C \rightarrow V_A$

~~...~~
 $r \rightarrow \infty$
 $\eta \rightarrow 1$

~~...~~
 $r \rightarrow 1$
 $\eta \rightarrow 0$

• Esempio visto precedentemente: IC-IB-IC-IB



$$\frac{P_B}{P_A} = \frac{P_C}{P_D} = \alpha > 1$$

$$\frac{V_C}{V_B} = \frac{V_D}{V_A} = \beta > 1$$

$$Q_{AB} = nC_V T_A (\alpha - 1) > 0$$

$$Q_{BC} = nC_P T_A \alpha (\beta - 1) > 0 \Rightarrow Q_{in}$$

$$Q_{CD} = -nC_V T_A \beta (\alpha - 1) < 0$$

$$Q_{DA} = -nC_P T_A (\beta - 1) < 0 \Rightarrow Q_{out}$$

$$Q_{in} = Q_{AB} + Q_{BC} = nT_A [(\alpha - 1)c_V + \alpha(\beta - 1)c_V] > 0$$

$$Q_{out} = Q_{CD} + Q_{DA} = -nT_A [\beta(\alpha - 1)c_V + (\beta - 1)c_P] < 0$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \frac{\beta(\alpha - 1)c_V + (\beta - 1)c_P}{(\alpha - 1)c_V + \alpha(\beta - 1)c_P} = 1 - \frac{\beta(\alpha - 1) + \gamma(\beta - 1)}{(\alpha - 1) + \gamma\alpha(\beta - 1)}$$

$\gamma = \frac{c_P}{c_V}$

Mettiamo numeri concreti

$$\alpha = \beta = 2, \text{ gas monoatomico} \rightarrow \gamma = \frac{5}{3}$$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{2 \times 1 + \frac{5}{3} \times (2 - 1)}{2 - 1 + \frac{5}{3} \times 2 \times (2 - 1)} = 1 - \frac{2 + \frac{5}{3}}{1 + \frac{10}{3}} = 1 - \frac{\frac{11}{3}}{\frac{13}{3}} = 1 - \frac{11}{13} = \frac{2}{13}$$

$$\eta = \frac{2}{13} \approx 15.4\%$$

