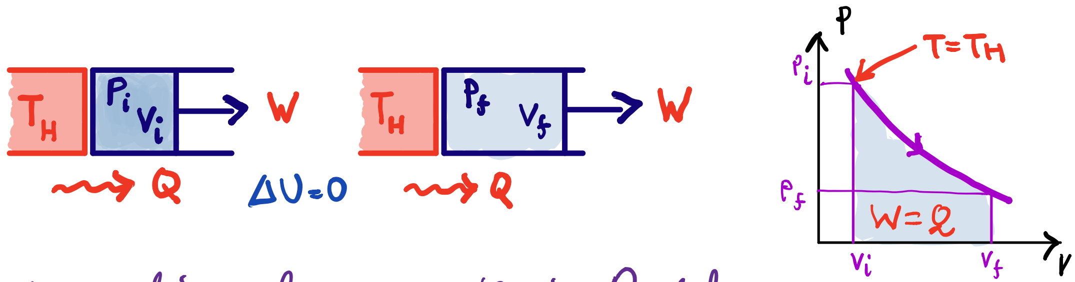
La produzione CICLICA di lavoro è ciò che ci si aspetta da una MACCHINA TERMICA operante grazie a meccanismi in grado di trasformare / trasferire verso/dal sistema energia in forme differenti.

Prototipo «inutile» di macchina termica:

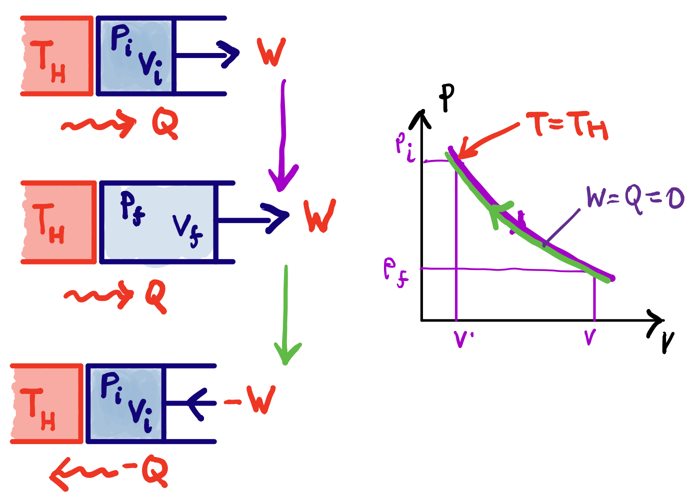
espansione isoterma quasi-statica di un gas ideale



Questa macchina preleva energia termica Q dal serbatoio a temperatura T_H e la trasforma integralmente in lavoro meccanico W grazie all'espansione isoterma del gas.
Quindi FUNZIONA ma per continuare a produrre lavoro deve CONTINUARE A ESPANDERSI. Quindi deve essere una macchina un (bel) po' ingombrante

Prototipo ancora «inutile» di macchina termica CICLICA:

Si utilizza ancora il gas ideale a contatto con un serbatoio termico.
Si produce lavoro nella espansione come prima, poi però si torna al punto di partenza per costruire un ciclo ripetibile (e non dover continuare a espandere il gas).
In questo modo $\Delta U = 0$ ma nella compressione di ritorno si compie un lavoro sul gas che eguaglia esattamente quello prodotto all'andata: il lavoro totale è nullo e questo è inevitabile fintantoché si opera con una sola temperatura.



L'idea di macchina ciclica «utile» si può realizzare con un sistema in grado di produrre lavoro (quindi essere rappresentato da un diagramma ciclico con area non nulla e percorso in senso orario nelle coordinate P-V). Questo avverrà a spese di una quantità di energia termica netta $Q=W$: il calore Q però viene separato nelle parti positiva e negativa, ovvero – per convenzione – assorbita e ceduta, ovvero

$$Q = \overset{>0}{Q_{IN}} + \overset{<0}{Q_{OUT}} = \overset{>0}{Q_{IN}} - |Q_{OUT}|^{>0}$$

Il I principio diventa $Q = Q_{IN} - |Q_{OUT}| = W$ ovvero

non tutta l'energia termica assorbita (Q_{IN}) è convertita in energia meccanica: l'energia $|Q_{OUT}|$ è ceduta all'ambiente e dunque non è utilizzata per la produzione di lavoro.

Per riuscire a operare in questo modo UN'UNICA SORGENTE TERMICA NON E' SUFFICIENTE.

Una macchina di questo tipo «preleva» energia Q_{IN}, «scarica» energia $|Q_{OUT}|$ e produce lavoro

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

in ogni ciclo di funzionamento. Si quantifica la «bontà» di questo sistema introducendo il RENDIMENTO

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_{IN}}}$$

la macchina è performante se, a parità di energia «prelevata», produce più lavoro.

Per il I principio $$\boxed{\eta = \frac{Q_{IN} - |Q_{OUT}|}{Q_{IN}} = 1 - \frac{|Q_{OUT}|}{Q_{IN}}}$$

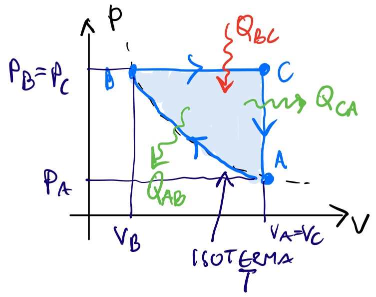
NB: $|Q_{OUT}|$ e Q_{IN} sono quantità positive e $W = Q_{IN} - |Q_{OUT}| \geq 0$ per cui è anche $Q_{IN} \geq |Q_{OUT}|$, per cui

$$\underline{0 \leq \eta \leq 1}$$

Se $\eta = 0$ in sostanza la macchina è «inutile» come quella discussa prima.
Il rendimento massimo ($\eta = 1$) è compatibile con il I principio MA richiede che $|Q_{OUT}| = 0$ (o $Q_{IN} = \infty$) e questi casi sono limiti irraggiungibili in situazioni reali.
In realtà il limite superiore per η è ben lontano da 1.

Analisi di un ciclo termodinamico quasi-statico

$n=1$ $\quad T=300\,K$ $\quad V_A=20\,\ell$
gas monoatomico $\quad V_B=10\,\ell$
$\Rightarrow P_A=nRT/V_A=1.23$ atm



Trasformazioni quasi-statiche di un gas ideale monoatomico.
Si parte da A e si comprime lentamente il gas a contatto con un termostato ideale a temperatura T:
il volume diminuisce da V_A a V_B e la pressione aumenta da P_A a P_B dello stesso fattore.

Viene ceduto calore a spese di lavoro subito dal gas secondo le relazioni

$A\to B$ $\quad T=\text{cost}$, $\; T_A=T_B=T$ $\quad \Delta U_{AB}=Q_{AB}-W_{AB}=0,\quad Q_{AB}=W_{AB}=nRT\ln\frac{V_B}{V_A}<0$ $\;\to -1.7$ kJ

Arrivati a B si mette il gas a contatto con una serie di termostati che lo riscaldano fino a una temperatura maggiore di T mantenendo costante la pressione: per farlo il gas si espande assorbendo calore e producendo lavoro. Si lascia che l'espansione continui finché il volume è pari a quello iniziale, $V_C=V_A$. Vale che

$B\to C$ $\quad P=\text{cost}$, $\; P_B=P_C$ $\quad \Delta U_{BC}=nc_V(T_C-T_B)$ $\to +3.7$ kJ, $\quad W_{BC}=P_B(V_C-V_B)$ $\to +2.5$ kJ, $\quad Q_{BC}=nc_p(T_C-T_B)>0$ $\to +6.2$ kJ

Si calcola $\quad P_B=\frac{P_AV_A}{V_B}=\frac{nRT}{V_B}=2.46$ atm $\qquad T_C=\frac{P_CV_C}{nR}=\frac{T}{V_B}V_C=2T=600\,K$

Arrivati a C il pistone viene bloccato e si raffredda il gas mettendolo a contatto con una serie di termostati fino a raggiungere la temperatura di partenza. Perché ciò avvenga il gas cede calore e diminuisce la sua energia interna secondo le

$C\to A$ $\quad V=\text{cost}$, $\quad W_{CA}=0$, $\quad \Delta U_{CA}=Q_{CA}=nc_V(T_A-T_C)<0$ $\to -3.7$ kJ

Si osserva che $\quad \Delta U_{TOT}=\Delta U_{AB}+\Delta U_{BC}+\Delta U_{CA}=0+nc_V(T_C-T_B)+nc_V(T_A-T_C)=0$
[è un ciclo]

e $\quad Q_{TOT}=Q_{AB}+Q_{BC}+Q_{CA}=\overbrace{nRT\ln\frac{V_B}{V_A}}^{<0}+\overbrace{nc_p(T_C-T_B)}^{>0}+\overbrace{nc_V(T_A-T_C)}^{<0}=0.8$ kJ

$W_{TOT}=W_{AB}+W_{BC}+W_{CA}=nRT\ln\frac{V_B}{V_A}+nR(T_C-T_B)=0.8$ kJ

Si divide il calore in ASSORBITO (+) e CEDUTO (−): $\quad Q_{IN}=Q_{BC}=nc_p(T_C-T_B)=+6.2$ kJ
$Q_{CED}=Q_{AB}+Q_{CA}=nRT\ln\frac{V_B}{V_A}+nc_V(T_A-T_C)=-5.4$ kJ

Si calcola il rendimento $\quad \eta=\frac{W}{Q_{IN}}=\frac{Q_{IN}+Q_{CED}}{Q_{IN}}=1-\frac{|Q_{CED}|}{Q_{IN}}=1-\frac{RT\ln V_A/V_B+c_V(T_C-T_A)}{c_p(T_C-T_B)}=$ $\quad (\eta\to 0.13)$

$=\frac{\gamma-1}{\gamma}\left(1-\frac{\ln V_A/V_B}{V_A/V_B-1}\right)=0.13$

NB $\eta\to 0$ per $V_A/V_B\to 1$
$\eta\to\frac{\gamma-1}{\gamma}$ per $V_A/V_B\to\infty$