Primo Principio della Termodinamica

Lezione 12/10/2021

Contenuti della lezione

- Definizione delle forme di energia di un sistema
- Calore e lavoro come forme di energie di scambio
- Meccanismi di trasferimento dell’energia
- Primo Principio della Termodinamica
- Trasformazioni termodinamiche notevoli

L’energia è una proprietà estensiva di un sistema.

L’energia totale di un sistema può essere conservata nel sistema e può essere vista come somma di forme di energia *statiche*.

Postulato dell’energia*

L’ energia è una proprietà termodinamica estensiva (che gode della proprietà additiva) e conservativa

Postulato dell’energia

L’ energia è una proprietà termodinamica estensiva (che gode della proprietà additiva) e conservativa

- **L’ energia non può essere generata** $E_{gen} = 0$
- **L’ energia non può essere distrutta** $E_{dis} = 0$

Questo significa che **durante una trasformazione**, cioè un processo in cui un sistema termodinamico scambia calore e lavoro, **l’energia totale del sistema si converte da una forma a un’altra, ma né si genera né si distrugge**

Energia

Cosa succede a E_t se il sistema è sottoposto ad una sollecitazione termica e/o meccanica?

Il sistema subisce una trasformazione, ossia passa da uno stato di equilibrio iniziale a uno stato di equilibrio finale, dopo aver scambiato calore e/o lavoro:

$$E_{t,i} \longrightarrow E_{t,f}$$

Detta **U** l’energia interna di un sistema termodinamico

Energia cinetica

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Energia potenziale

$$E_P = mgz$$

ENERGIA TOTALE DI UN SISTEMA

$$E = U + E_c + E_P = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

ENERGIA TOTALE DI UN SISTEMA PER UNITÀ DI MASSA

$$e = \frac{E}{m} \qquad (\mathrm{kJ/kg})$$

Energia

Essa può essere trasmessa secondo tre diverse modalità:

a) Modalità **calore**

b) Modalità **lavoro**

1. Si parla di energia trasmessa sotto forma di calore se la causa è una differenza di temperatura

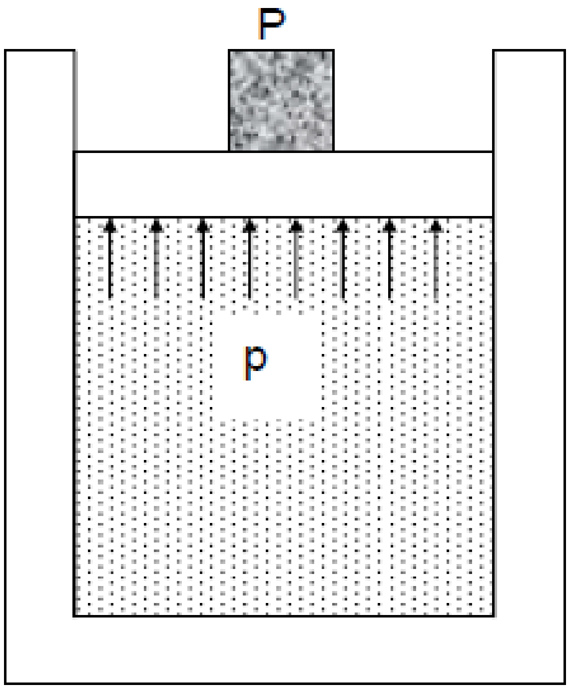
2. Si parla di energia trasmessa sotto forma di lavoro se la causa è l’azione di una forza (pressione) risultante diversa da zero

Lavoro termodinamico

Si consideri un sistema che si trova nelle seguenti condizioni:

•**Sistema chiuso**: massa di gas contenuta in un sistema cilindro-pistone

•**Sistema non isolato**: scambia lavoro con l’esterno mediante espansione o compressione dovuta al movimento del pistone. Nel caso in cui il gas si espande il lavoro è compiuto dal sistema sull’esterno (lavoro uscente), mentre nel caso di compressione del gas, il lavoro è subito dal sistema da parte dell’ambiente esterno (lavoro entrante).



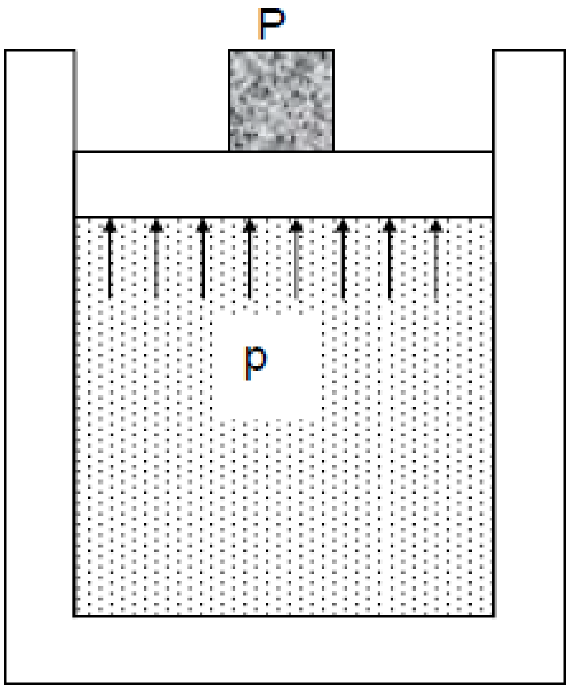
P indica una generica forza applicata al pistone. In questo caso la indico con **P** perché rappresenta il peso del corpo sul coperchio.
Essa genera una risultante di verso opposto che tende a contrastare la compressione. Se la risultante ha la stessa intensità della forza **P** il pistone rimane immobile.
In condizioni di equilibrio, la pressione **p** esercitata dal gas sulla superficie interna del pistone equivale all’azione esercitata sul lato esterno dalla forza peso **P** del pistone stesso.

Lavoro termodinamico

Supponiamo che la forza agente sul pistone sia il suo peso sul coperchio, che, pertanto, indichiamo con **P = mg**.

La forza **P** genera una risultante di verso opposto che tende a contrastare la compressione. Se la risultante ha la stessa intensità della forza **P** il pistone rimane immobile, cioè c'è equilibrio meccanico.

Nella condizione di equilibrio meccanico, indichiamo con A l'area di contatto tra gas e pistone e se $p = P/A$ e possiamo scrivere:



Forza esterna → **P = A p** ← **Risultante opposta**

Partendo dalla condizione di equilibrio iniziale, cioè

$$\mathbf{P = A\,p}$$

Ad ogni incremento o decremento di **P** (**ΔP**) corrisponde uno spostamento del pistone e, di conseguenza, un lavoro scambiato dal sistema con l'esterno.

Lavoro termodinamico

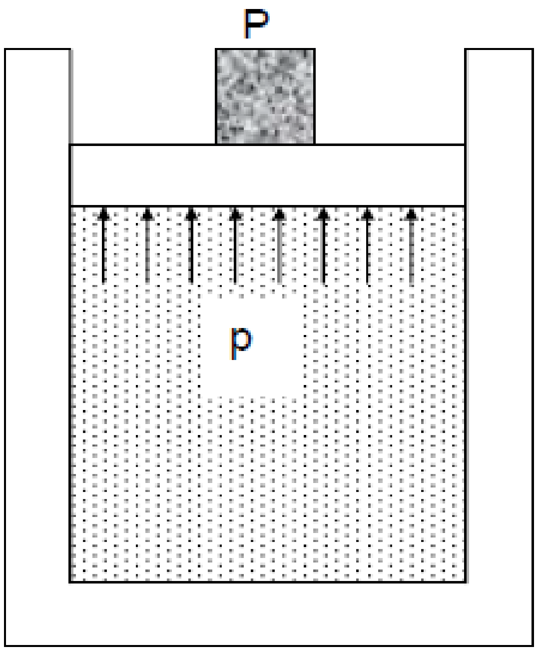
Supponiamo, in condizioni iniziali di equilibrio, di riscaldare il sistema.

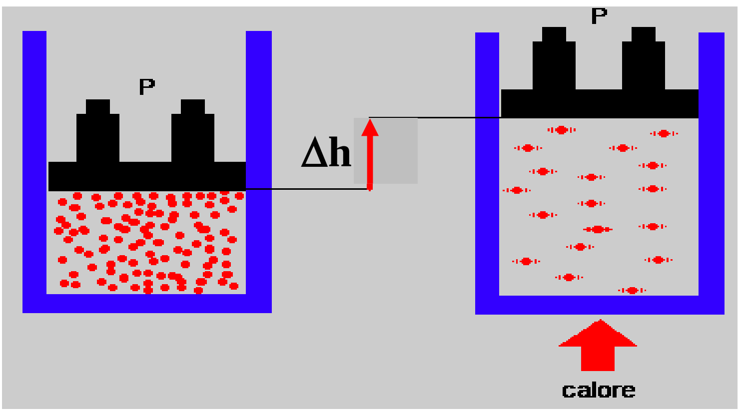
Cosa succede?

- Il sistema si espande

- Risultante diretta verso l'alto

- Lavoro compiuto dal sistema con l'esterno.





Lavoro termodinamico

Se $\mathbf{p = P/A}$

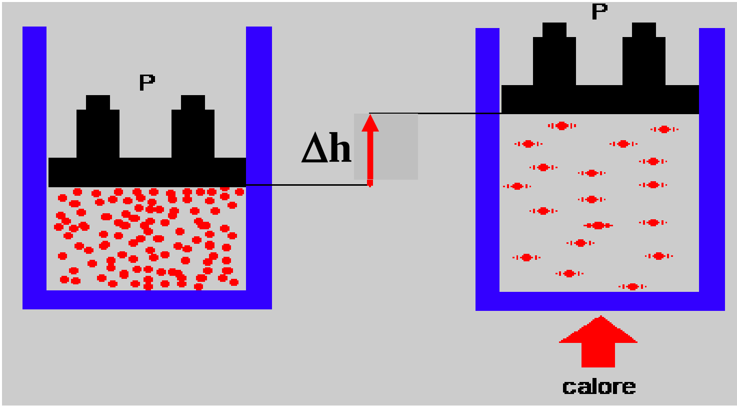
risulta $\mathbf{P = A \cdot p}$

Chiamiamo con $\mathbf{\Delta h}$ lo spostamento, ricordando che genericamente è L = F * s:

La forza **P** compie lavoro $\mathbf{L = P \cdot \Delta h.}$ Quindi il lavoro è:

$$\mathbf{L = P \cdot \Delta h = p \cdot A \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V}$$

essendo $\mathbf{\Delta V = A \cdot h}$ la variazione di volume conseguente

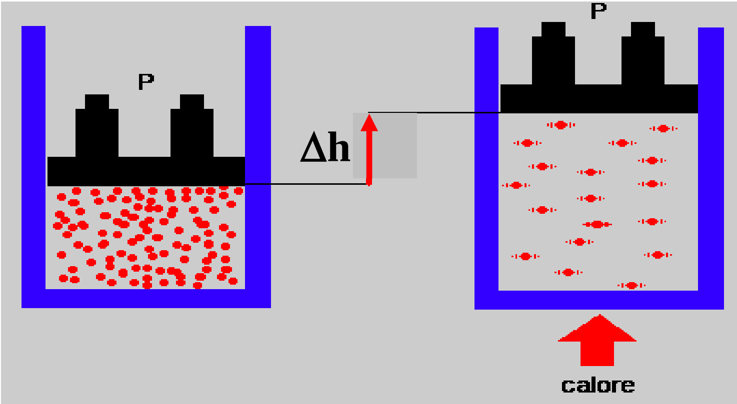


Lavoro termodinamico

$$\mathbf{L = P \cdot \Delta h = p \cdot A \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V}$$

Se $\mathbf{\Delta V = V_f - V_i}$

$$\mathbf{L = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_f - V_i)}$$



Questa espressione è valida se la trasformazione avviene a pressione **p** costante

Lavoro termodinamico

$$\mathbf{L = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_f - V_i)}$$

Il nostro obiettivo è riportare tramite relazioni e grafici il legame fisico tra di esse. Quindi dobbiamo considerare intervalli di tempo piccolissimi, a cui corrispondono variazioni piccolissime delle proprietà termodinamiche.

Dobbiamo adottare l'approccio dell'infinitesimo

Allora:

Ragionando in termini infinitesimi, chiamiamo **dx** lo spostamento del pistone.

La variazione di volume sarà:

$$\mathbf{dV = A \cdot dx}$$

Il lavoro sarà:

$$\mathbf{dL = P \cdot dx = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV}$$

dove **dV** è la variazione di volume nel cilindro, conseguente allo spostamento **dx**

Lavoro termodinamico

Se **M** è la massa del gas contenuto nel cilindro e **v** il suo volume specifico, si ha:

$$\mathbf{dL = p \cdot dV = p \cdot d(M \cdot v) = p \cdot M \cdot dv}$$

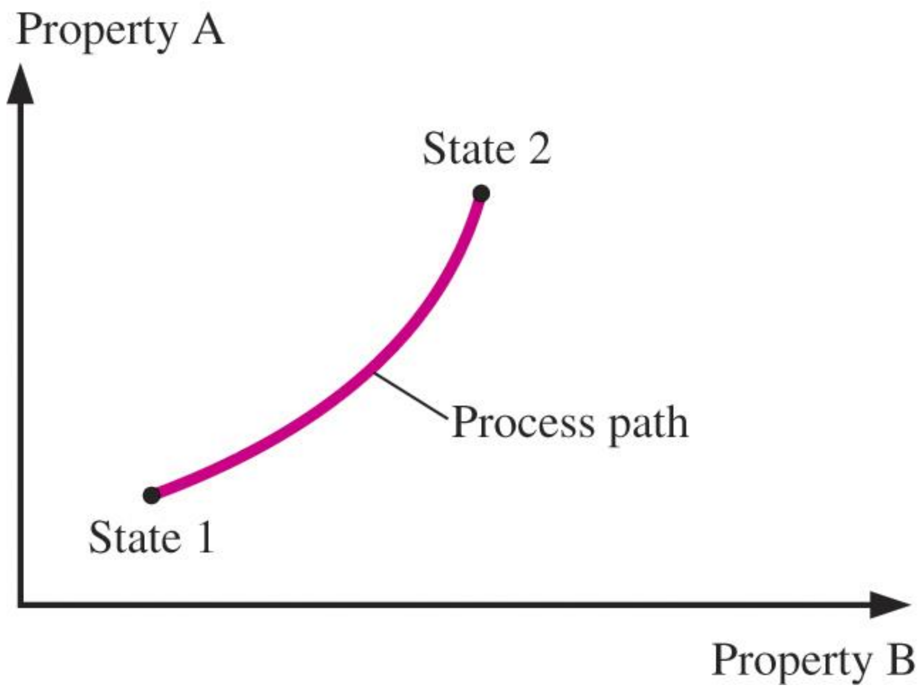
da cui è possibile ricavare il lavoro per unità di massa **d*l***, dividendo per la massa **M**:

$$\mathbf{d\boldsymbol{l} = p \cdot dv}$$

Trasformazione o processo: Cambiamento del sistema, in virtù del quale un sistema passa da uno stato di equilibrio a un altro.

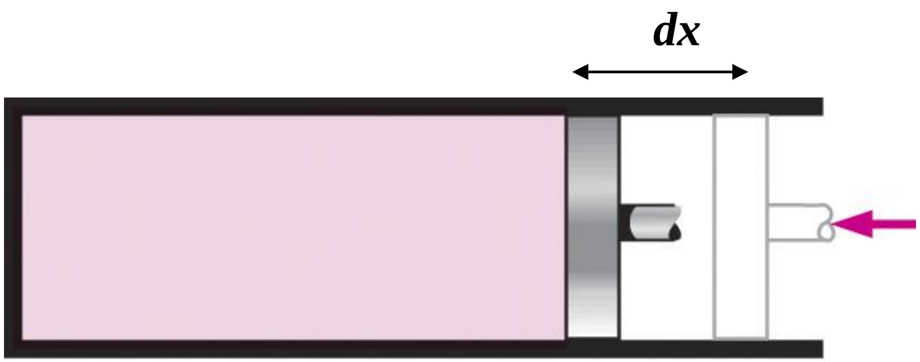
Percorso: La serie di stati attraverso cui un sistema passa durante una trasformazione.

Per descrivere un processo completamente, si devono conoscere gli stati iniziale e finale il percorso e le interazioni con l'ambiente.



Lavoro termodinamico

Per tracciare graficamente con una linea una trasformazione, si deve considerare come una successione di infiniti stati di equilibrio. Ogni stato sarà rappresentato da un punto nel piano p-V.

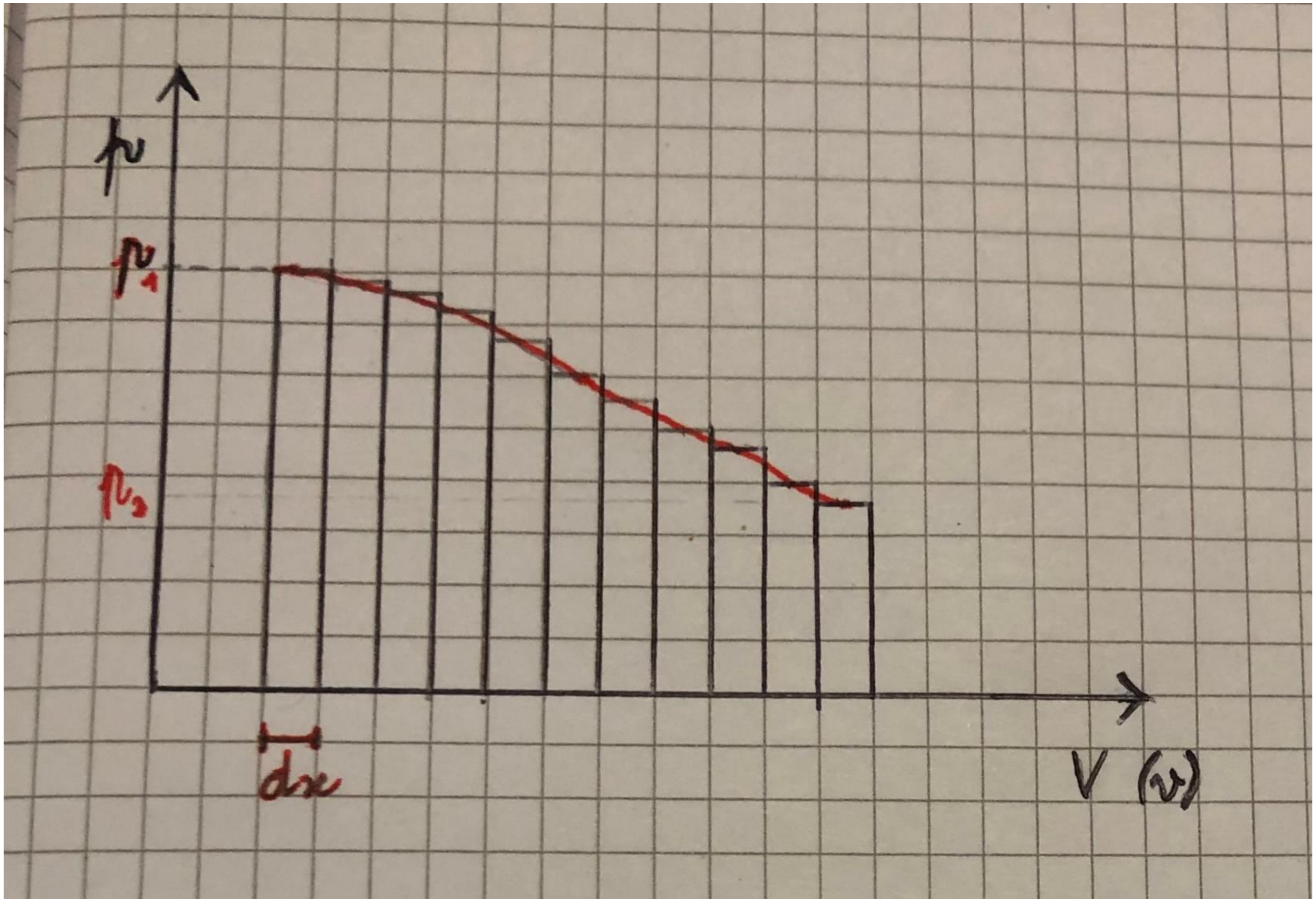


(a) Slow compression
(quasi-equilibrium)

Immaginiamo che per ogni spostamento infinitesimo dx questo sia talmente piccolo da considerare costante la pressione p

Lavoro termodinamico

Per tracciare graficamente con una linea una trasformazione, si deve considerare come una successione di infiniti stati di equilibrio. Ogni stato sarà rappresentato da un punto nel piano p-V.

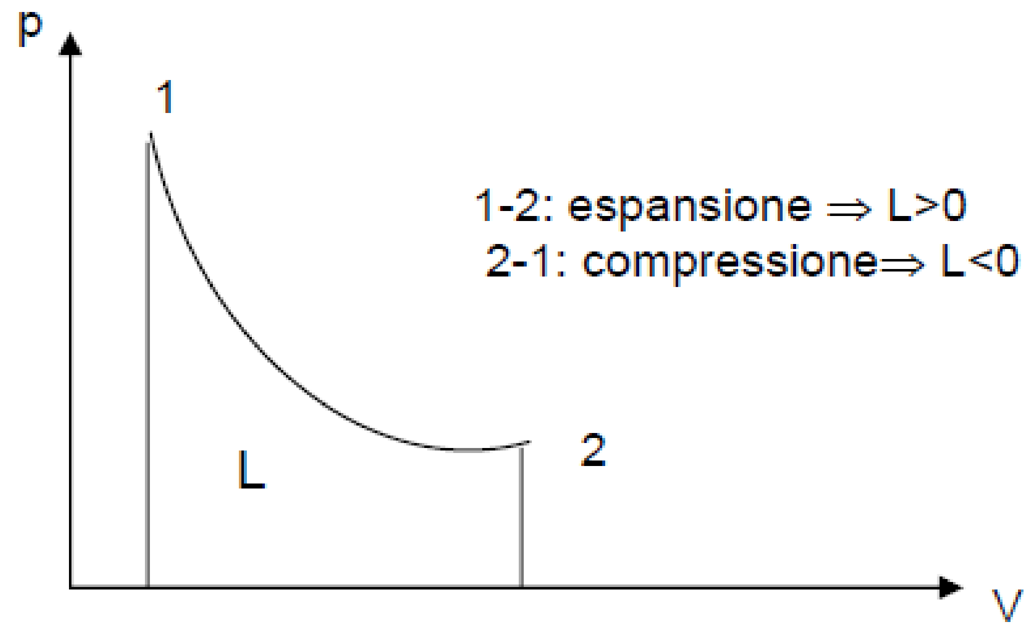


Lavoro termodinamico

In un diagramma p-V il lavoro di espansione/compressione di un gas è espresso dall'area sottesa dalla linea che indica la trasformazione sull'asse delle ascisse.

$$\mathbf{dL = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV}$$

$$\mathbf{d\mathit{l} = p \cdot dv}$$

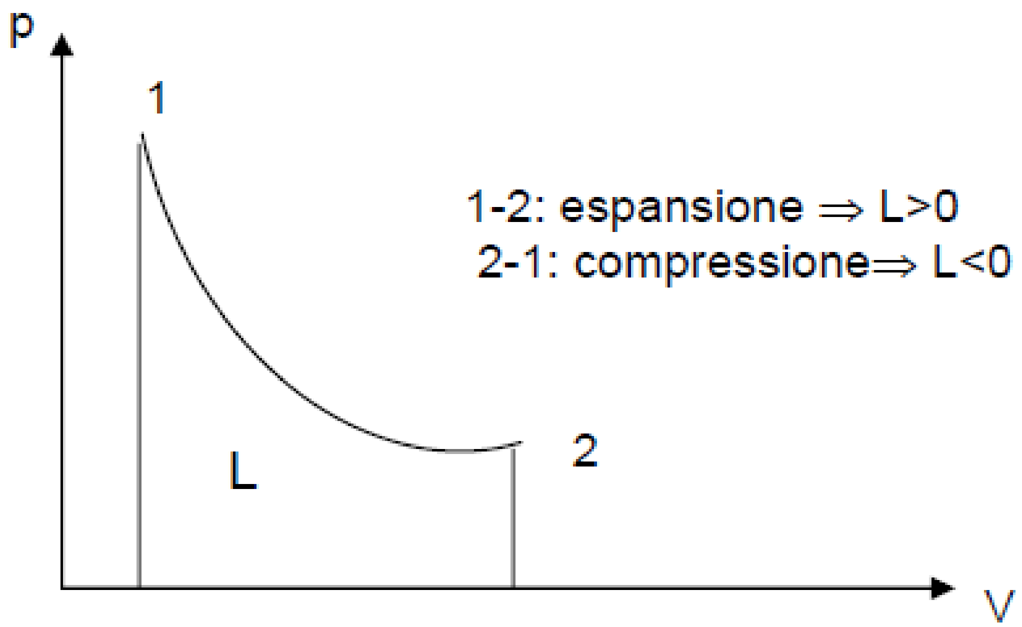


Lavoro termodinamico

dL = p·A·dx = p·dV

$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \qquad \text{(J)} \qquad \text{e} \qquad l_{12} = \int_1^2 p \cdot dv \qquad \text{(J/kg)}$$

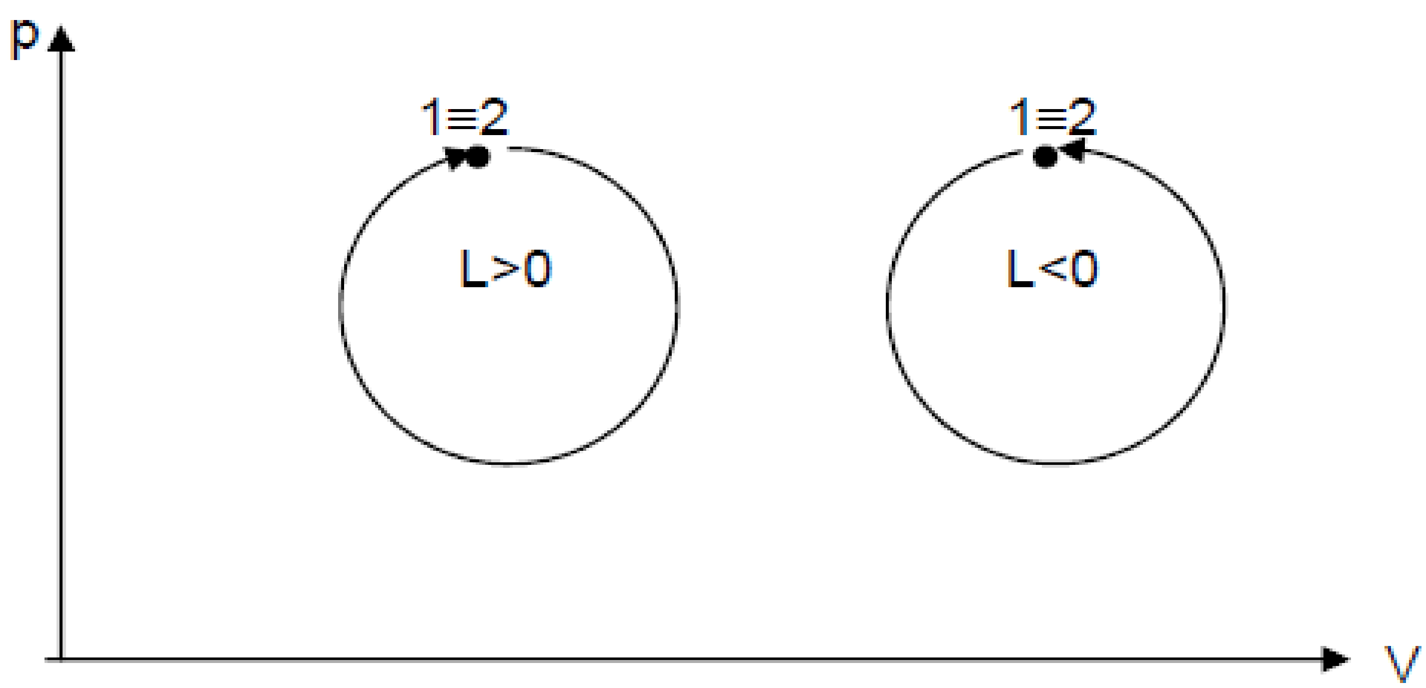
Il lavoro risulta positivo se la trasformazione comporta un aumento di volume (espansione), negativo in caso contrario (compressione).



Ciclo termodinamico

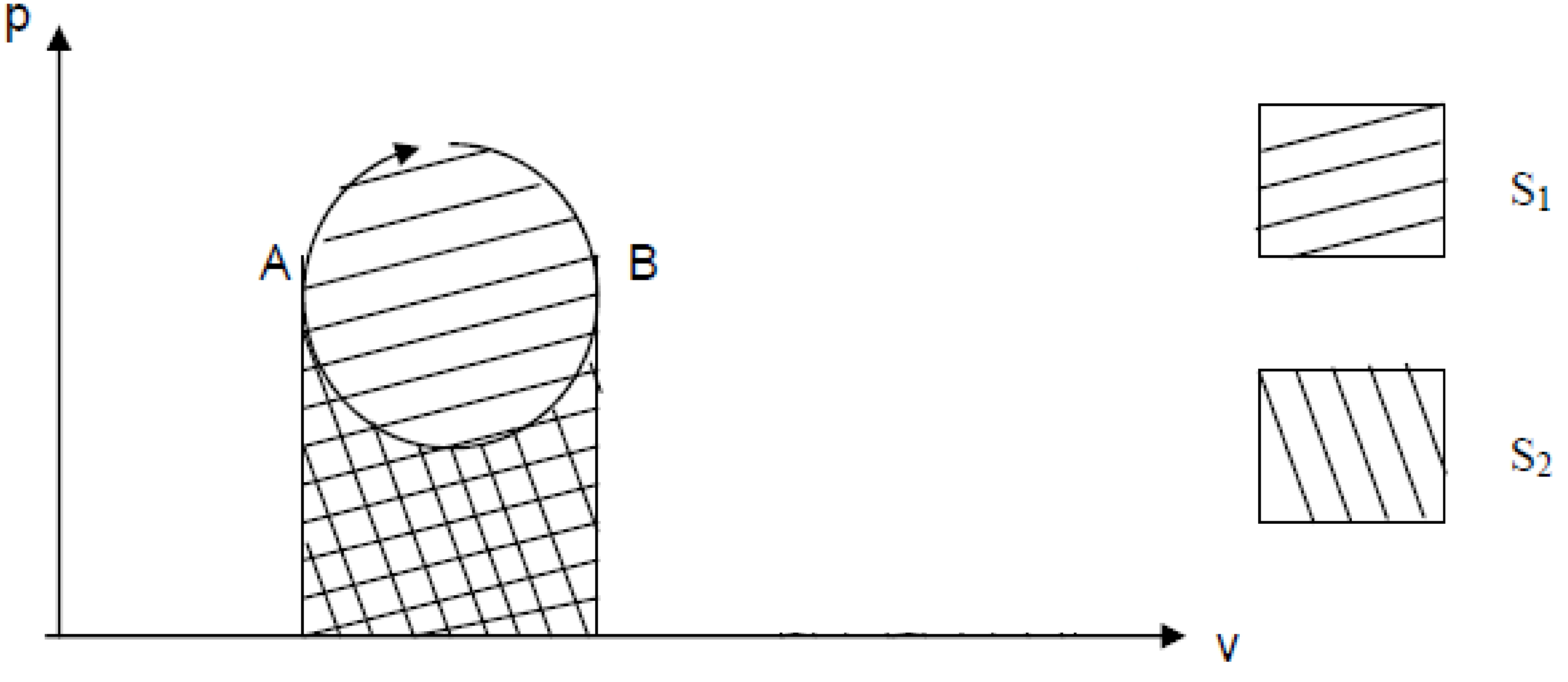
Cosa succede se il punto iniziale coincide con quello finale?

Se il punto iniziale e quello finale della trasformazione coincidono la trasformazione è chiusa o ciclica ed il lavoro risulta **positivo** se la trasformazione avviene in **senso orario**, **negativo** in caso **antiorario**.

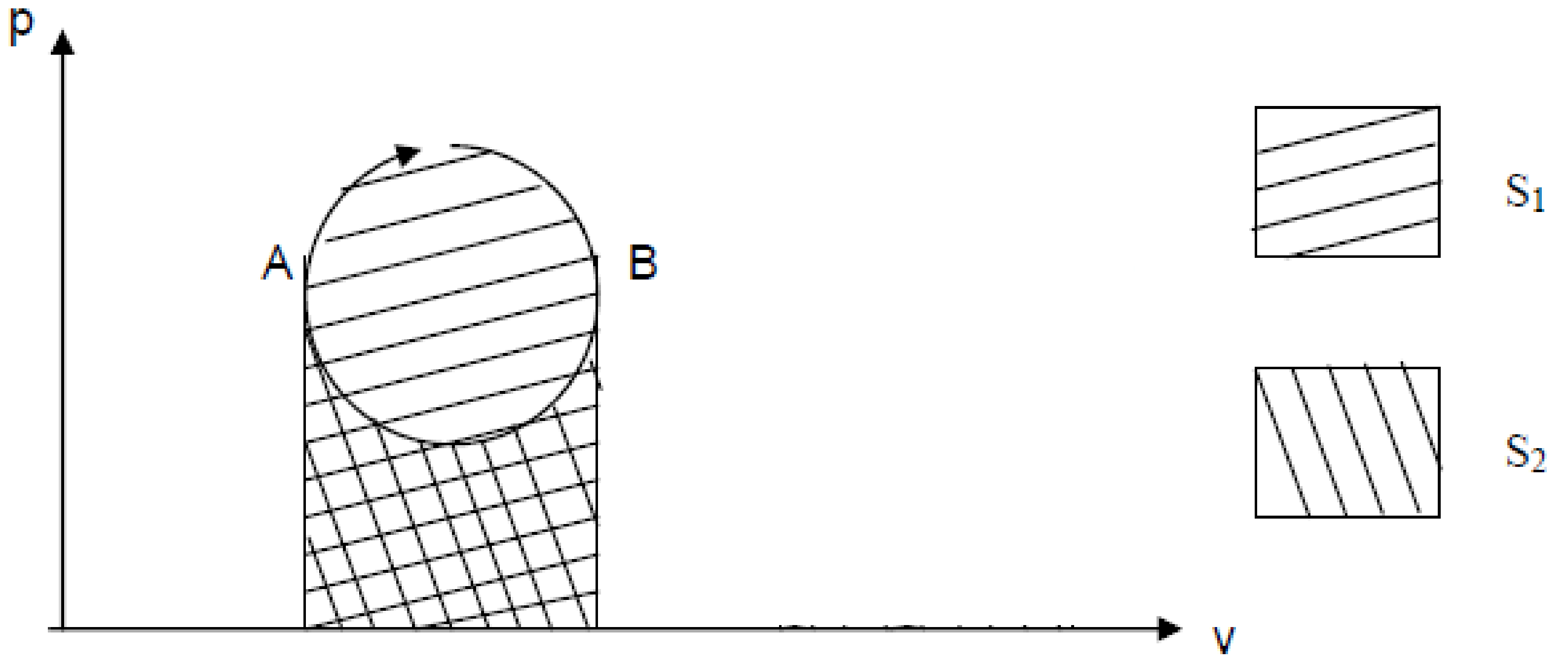


Ciclo termodinamico diretto

- Supponiamo di percorrere il ciclo in senso orario, cioè di compiere un ciclo diretto, e consideriamo i due rami componenti individuati tracciando le rette verticali tangenti al ciclo nei punti A e B.



Ciclo termodinamico diretto

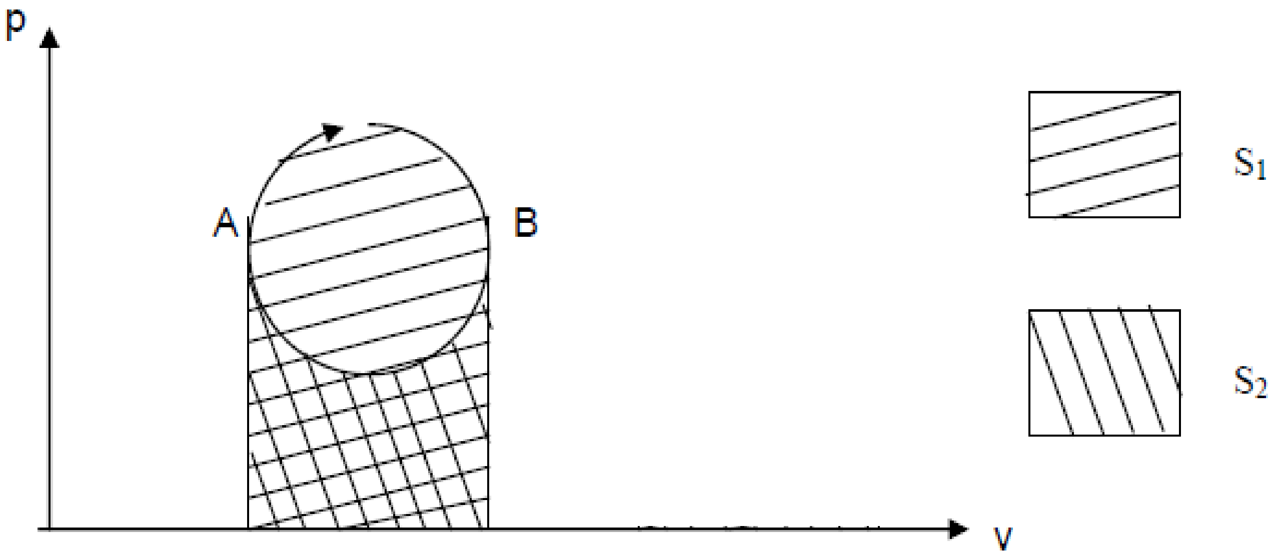


I tratti AB e BA sottendono rispetto all'asse delle ascisse due aree S_1 ed S_2, per cui possiamo scrivere:

$$L_{AB} = \int_A^B p dV = S_1 \qquad\qquad L_{BA} = \int_B^A p dV = S_2$$

È necessario conoscere dunque l'andamento di *p* in funzione di *V*.

Ciclo termodinamico diretto



$$L_{AB} = \int_A^B p dV = S_1$$

$$L_{BA} = \int_B^A p dV = S_2$$

Nel caso di ciclo diretto si ha $S_1 > S_2$ e, di conseguenza, $S_1 - S_2 > 0$.

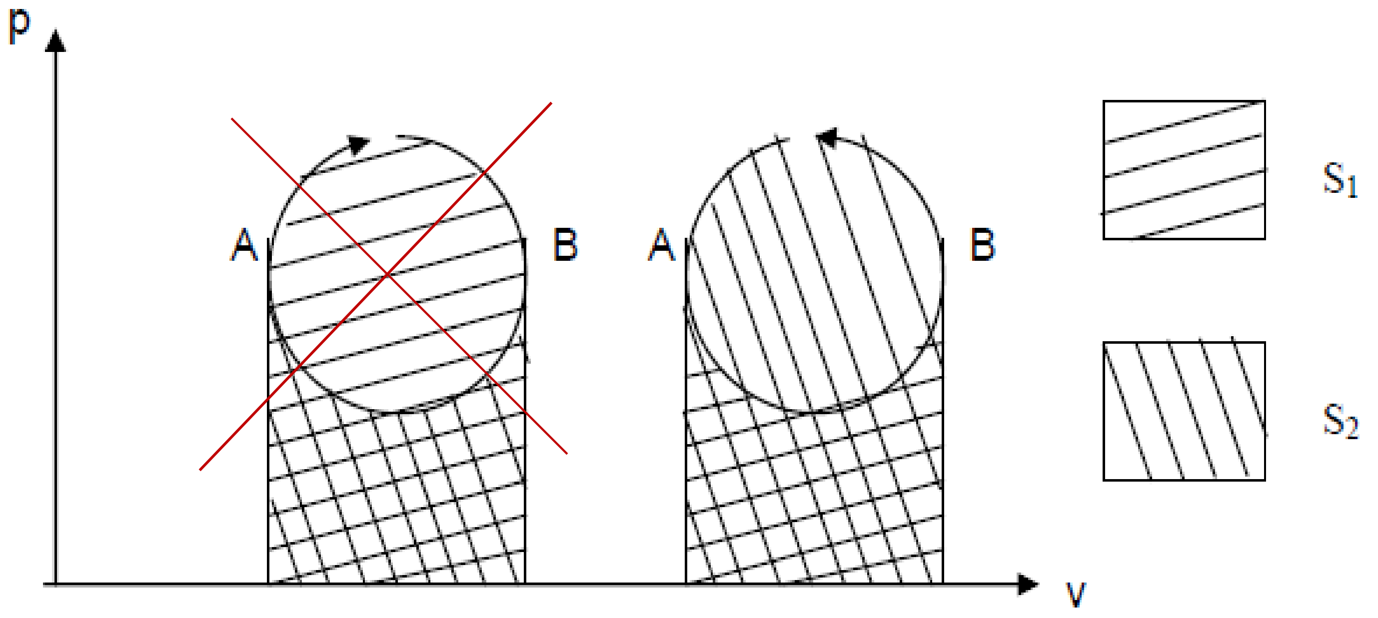
Quindi si ha anche:

$$L_{AB} - L_{BA} = S_1 - S_2 > 0$$

Allora $\boldsymbol{L_{ciclo} = L_{AB} - L_{BA} > 0}$

Ricordare che: se p aumenta e V diminuisce L è negativo (compressione)
se p diminuisce e V aumenta L è positivo (espansione)

Ciclo termodinamico inverso



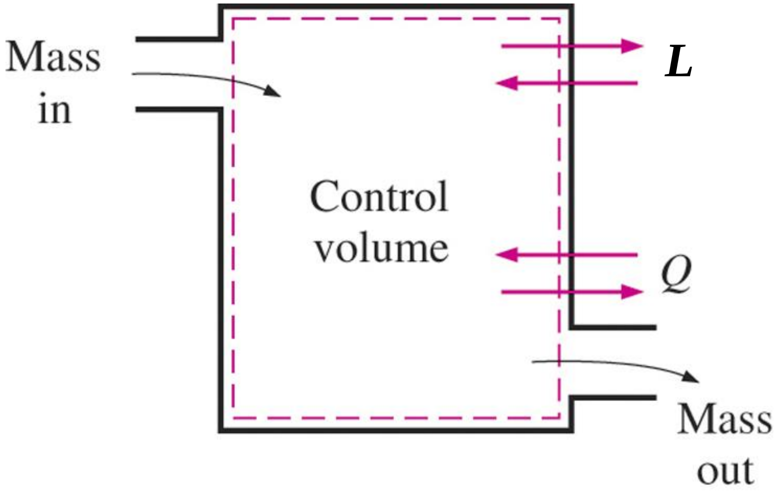
Nel caso di ciclo inverso, che prevede il verso di percorrenza antiorario, si ha $S_1 < S_2$ e, di conseguenza, $\mathbf{L}_{\boldsymbol{ciclo}}<0$.

$$L_{AB} = \int_A^B pdV = S_1 \qquad L_{BA} = \int_B^A pdV = S_2$$

$$L_{AB} - L_{BA} = S_1 - S_2 < 0$$

Meccanismi di trasferimento dell’energia

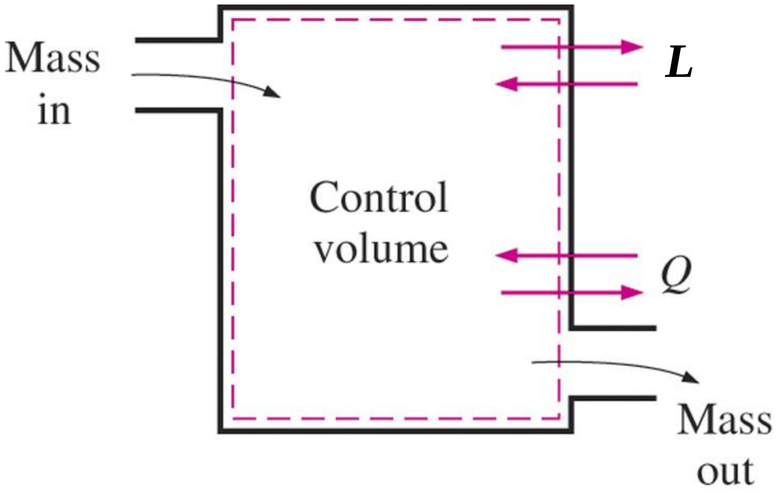
- Trasferimento di calore
- Lavoro
- Flusso di massa (la massa trasporta energia con sè)



Se il sistema è sottoposto ad una sollecitazione termica e/o meccanica, esso subisce una trasformazione, ossia passa da uno stato di equilibrio iniziale a uno stato di equilibrio finale, dopo aver scambiato calore e/o lavoro, e quindi la sua energia totale varia, cioè aumenta o diminuisce dopo aver scambiato calore e lavoro

Meccanismi di trasferimento dell’energia

La variazione di energia totale di un sistema (aumento o diminuzione) durante un processo è uguale alla differenza tra l’energia totale entrante e l’energia totale uscente durante il processo



Il bilancio di energia si scrive in generale:

Variazione dell’energia totale = Energia totale entrante – Energia totale uscente

Cos’è la variazione di energia totale?
Cos’è l’energia uscente?
Cos’è l’energia entrante?

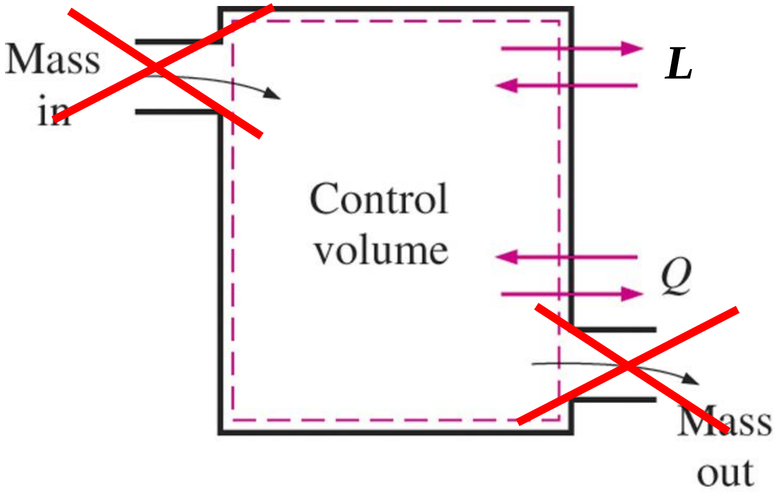
Meccanismi di trasferimento dell'energia

Variazione dell'energia totale =
= Energia totale entrante – Energia totale uscente

Se c'è una variazione di energia, questa dipende da un'interazione con l'ambiente. Tale variazione non proviene dal nulla:
- se c'è un aumento di energia significa che l'ambiente ha trasferito energia al sistema $\mathbf{\Delta E > 0}$
- se c'è una riduzione di energia significa che il sistema ha ceduto energia all'ambiente $\mathbf{\Delta E < 0}$

Si supponga che il sistema abbia energia totale iniziale $\mathbf{E_i = E_1}$ e passi ad un valore di energia finale $\mathbf{E_f = E_2}$. Perché questo è accaduto? Che è successo nel frattempo? Sicuramente ci sarà stata un'azione energetica compiuta da esso sull'ambiente e/o dall'ambiente su di esso, cioè ci saranno stati scambi (ingressi e/o uscite) di Q e L.

Meccanismi di trasferimento dell’energia (Sistema chiuso)



$$\begin{array}{c} E_1 \\ \downarrow \\ E_2 \end{array}$$

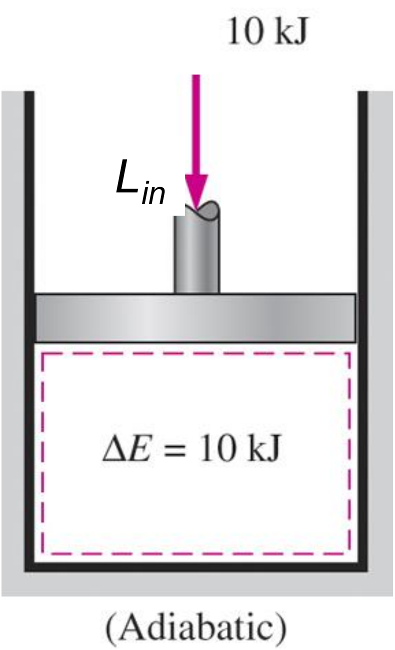
Per un sistema chiuso non ci sono flussi di massa, ma solo calore e lavoro

$$\Delta E = E_2 - E_1$$

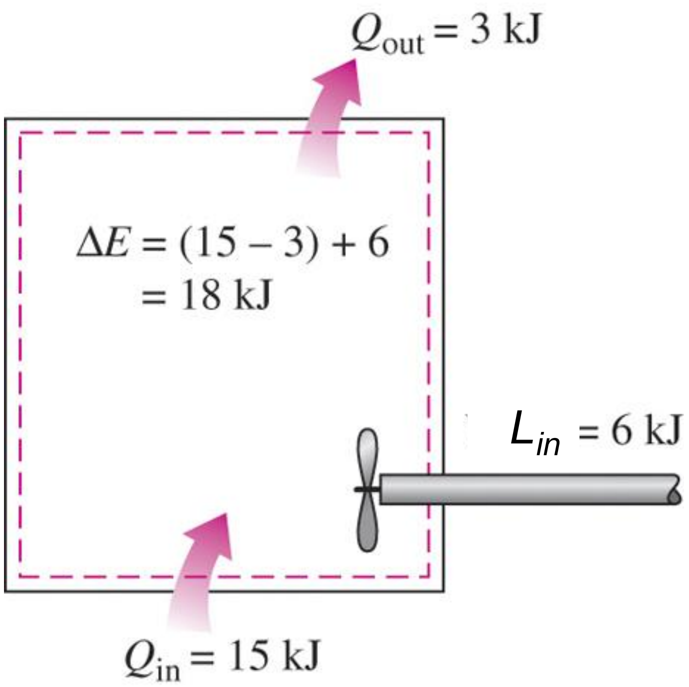
$$\Delta E = E_2 - E_1 = \underbrace{(Q_{in} - Q_{out})}_{\boldsymbol{Q}} + \underbrace{(L_{in} - L_{out})}_{\boldsymbol{L}}$$

Bilancio di energia

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - L_{out})$$



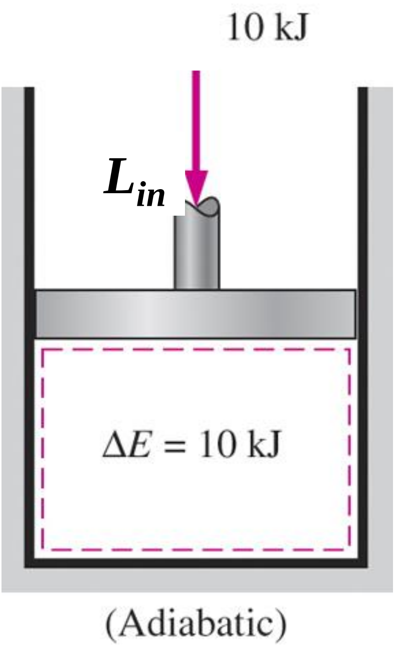
La variazione di energia totale del sistema è uguale alla somma del lavoro netto e del calore trasferito tra sistema e ambiente



Il lavoro fatto su un sistema adiabatico (Q = 0) è uguale all'aumento di energia totale del sistema

Bilancio di energia

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - L_{out})$$



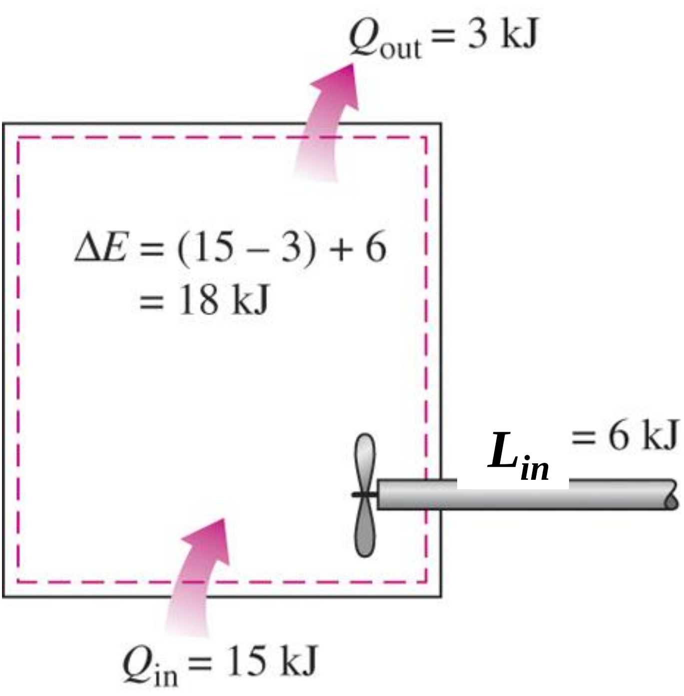
$$\Delta E = E_2 - E_1 = (\cancel{Q_{in} - Q_{out}}) + (L_{in} - \cancel{L_{out}})$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = L_i = 10\left[kJ\right]$$

Il lavoro fatto su un sistema adiabatico (Q = 0) è uguale all'aumento di energia totale del sistema

Bilancio di energia

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - L_{out})$$



$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - \cancel{L_{out}})$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 =$$

$$= (Q_i - Q_{out}) + L_i = (15 - 3) + 6\,[kJ]$$

La variazione di energia totale del sistema è uguale alla somma del lavoro netto e del calore trasferito tra sistema e ambiente

Variazione di Energia di un sistema

Cos'è **E**?

$$E = U + E_c + E_P = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

Durante il passaggio da uno stato iniziale 1 a uno finale 2, la variazione di energia totale del sistema è:

$$\Delta E = E_2 - E_1$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

Variazione di Energia di un sistema

$$E = U + E_c + E_P = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2}m(v_2{}^2 - v_1{}^2)$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1)$$

Variazione di Energia di un sistema

$$E = U + E_c + E_P = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

Se divido per la massa del sistema ***m***

$$\frac{E}{m} = \frac{U}{m} + \frac{E_c}{m} + \frac{E_P}{m} = u + e + e$$

⇓

Scrivo:

$$\Delta e = \Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p$$

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$\Delta e_c = \frac{1}{2}\left(v_2{}^2 - v_1{}^2\right)$$

$$\Delta e_p = g(z_2 - z_1)$$

Variazione di Energia di un Sistema Stazionario

$$E = U + E_c + E_P = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2}m(v_2{}^2 - v_1{}^2)$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1)$$

Sistemi stazionari

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2}m(v_2{}^2 - v_1{}^2) = 0, \quad v_2 = v_1$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1) = 0 \quad z_2 = z_1$$

Primo principio per sistemi chiusi

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - L_{out})$$

dove per convenzione:

- Q_{in} (assorbito) è positivo (>0)
- Q_{out} (ceduto) è negativo (<0)

Quindi Q_{in}- Q_{out} dà la somma algebrica tra calore entrante e uscente, ossia può essere positiva o negativa a seconda se è maggiore il calore entrante (Q_{in}) oppure quello uscente (Q_{out}).

- L_{in} (entrante) è negativo (<0)
- L_{out} (uscente) è positivo (>0)

Quindi L_{in}- L_{out} dà la somma algebrica tra lavoro entrante e uscente, ossia può essere positiva o negativa a seconda se è maggiore il lavoro uscente (L_{out}) oppure quello entrante (L_{in}).

Primo principio per sistemi chiusi

Quindi cambiamo i segni nell'equazione del bilancio energetico di un sistema chiuso, che pertanto diventa:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) + (L_{in} - L_{out})$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) - (L_{out} - L_{in})$$

Quindi:

$$+(L_{in} - L_{out}) = -(L_{out} - L_{in})$$

Primo principio per sistemi chiusi

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (Q_{in} - Q_{out}) - (L_{out} - L_{in})$$

$$pongo$$

$$Q = (Q_{in} - Q_{out})$$

$$pongo$$

$$L = (L_{out} - L_{in})$$

Allora

$$\Delta E = Q - L$$

Primo principio per sistemi chiusi (*dm* = 0 o massa costante)

ma sappiamo che:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

Pertanto, il Primo Principio della Termodinamica applicato a sistemi chiusi (nessuna massa scambiata con l'ambiente, m = costante), si formula nel seguente modo:

$$\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = Q - L$$

Primo principio per sistemi chiusi e stazionari (*dm* = 0, v = 0 o costante)

$$\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = Q - L$$

$$\Delta U + \cancel{\Delta Ec} + \cancel{\Delta Ep} = Q - L$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} m({v_2}^2 - {v_1}^2)$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1)$$

$\Rightarrow$

$\Delta U = m(u_2\text{-}u_1) = U_2\text{-}U_1$

$\Delta Ec = 0$, *essendo* $v_2 = v_1 = 0$

$\Delta Ep = 0$ *essendo* $z_2\text{-}z_1 = 0$

Primo principio per sistemi chiusi e stazionari (*dm* = 0, v = 0 o costante)

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} m({v_2}^2 - {v_1}^2)$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1)$$

$\Delta U = m(u_2\text{-}u_1) = U_2\text{-}U_1$

$\Delta Ec = 0$, *essendo* $v_2 = v_1 = 0$

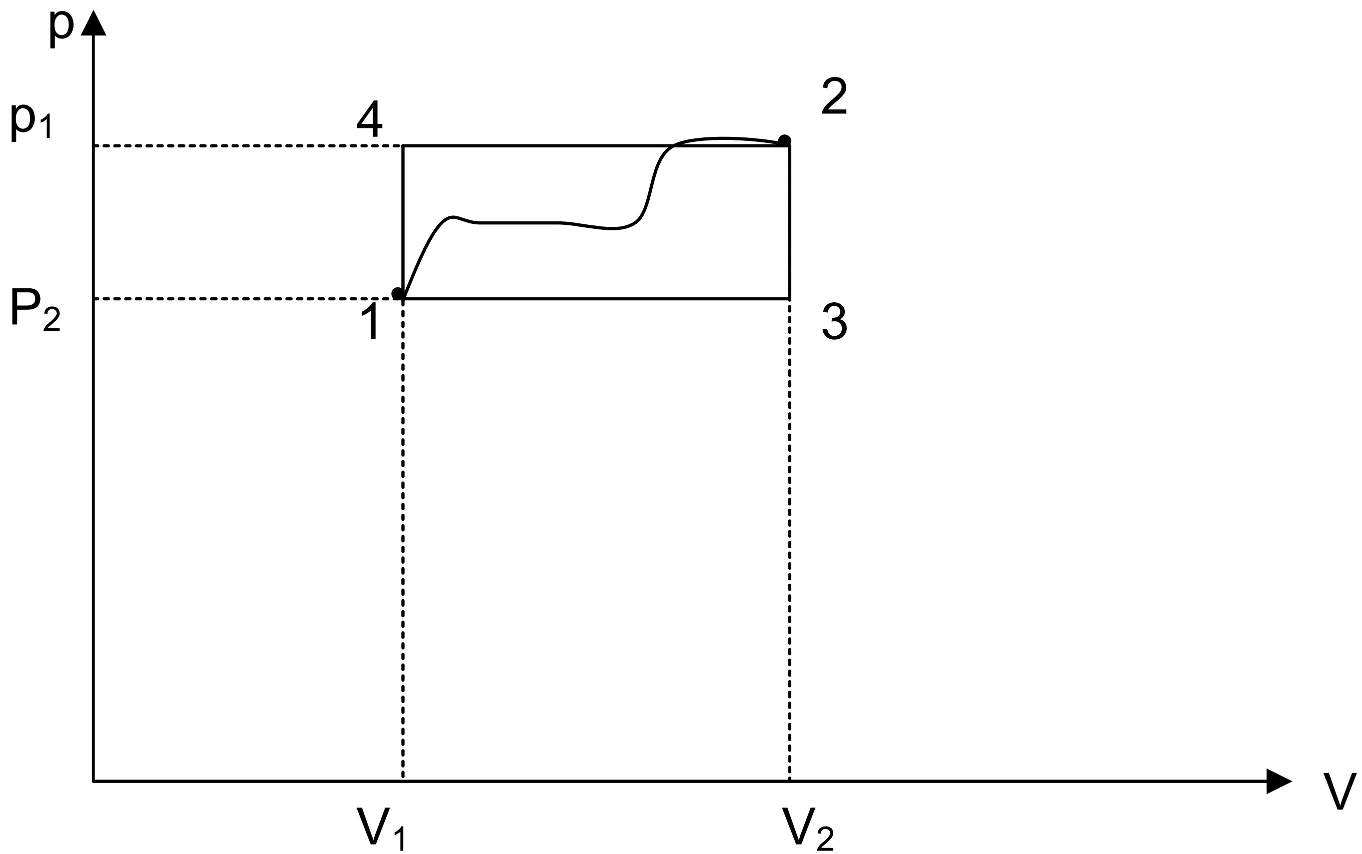
$\Delta Ep = 0$ *essendo* $z_2\text{-}z_1 = 0$

$$\Delta U = Q - L$$

In forma specifica:

$$\Delta u = q - l$$

Trasformazioni



Il tipo di percorso effettuato dipende dai diversi valori delle energie di scambio (calore e lavoro) impiegate, ma, qualunque sia il percorso seguito, i valori di **p** e di **V**, nonché di tutte le altre grandezze di stato variano allo stesso modo, per cui la pressione varia da p_1 a p_2 ed il volume da V_1 a V_2.

Trasformazioni cicliche

- Se la trasformazione è di tipo ciclico (stato iniziale del sistema coincidente con lo stato finale), **le grandezze di stato non subiscono alcuna variazione essendo coincidenti gli stati iniziale e finale**, mentre **il lavoro ed il calore complessivamente scambiati risultano diversi da zero**.
- Essendo:

$$Q - L = \Delta U$$

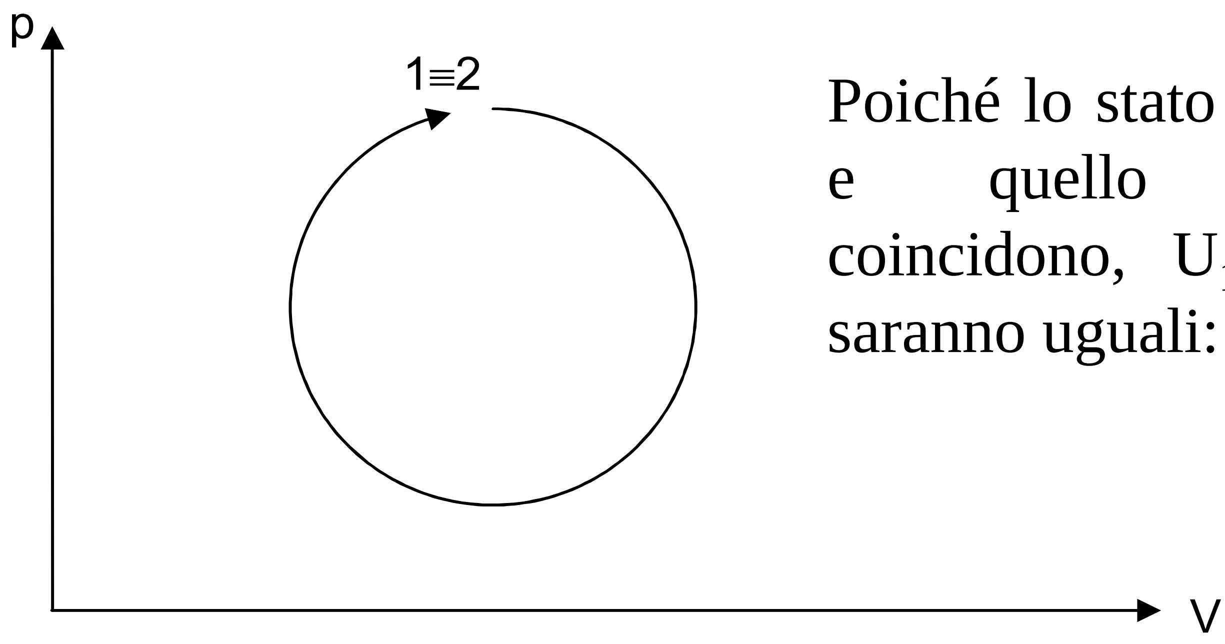
$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0$$

$$perchè \quad U_1 = U_2$$

$$Q - L = 0$$

$$Q = L$$

Trasformazioni cicliche



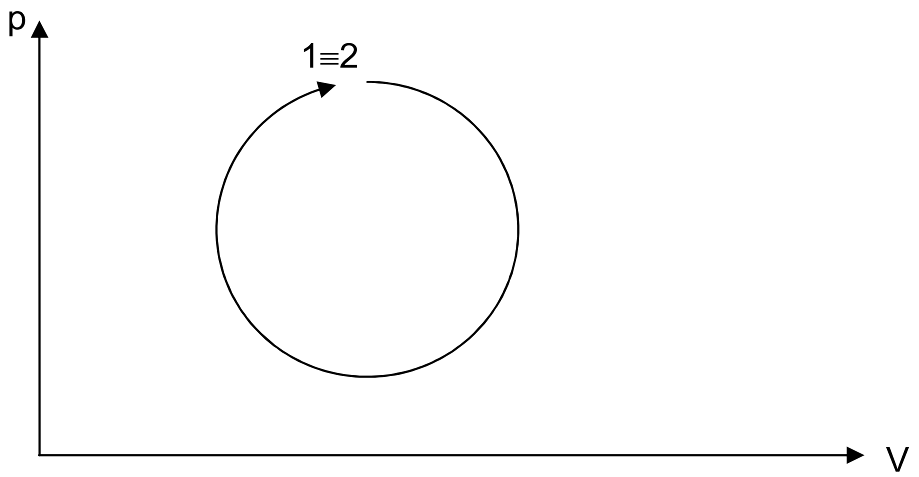
Poiché lo stato iniziale e quello finale coincidono, U_1 e U_2 saranno uguali:

$$\mathbf{U_1 = U_2 \Rightarrow \Delta U = 0}$$

Quindi, essendo il Primo Principio della Termodinamica $\Delta U = Q\text{-}L$, questo si riformula:

$$\mathbf{Q - L = 0}$$

Trasformazioni cicliche



$U_1 = U_2 \Rightarrow \Delta U = 0$

Quindi:

$Q - L = 0$

Se un sistema stazionario chiuso compie una **trasformazione termodinamica ciclica**, **la variazione di energia interna è nulla**, pertanto **il calore scambiato con l'ambiente esterno è numericamente pari al lavoro scambiato**.

Trasformazioni non cicliche

Sistemi chiusi $\Longrightarrow$ $$\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = Q - L$$

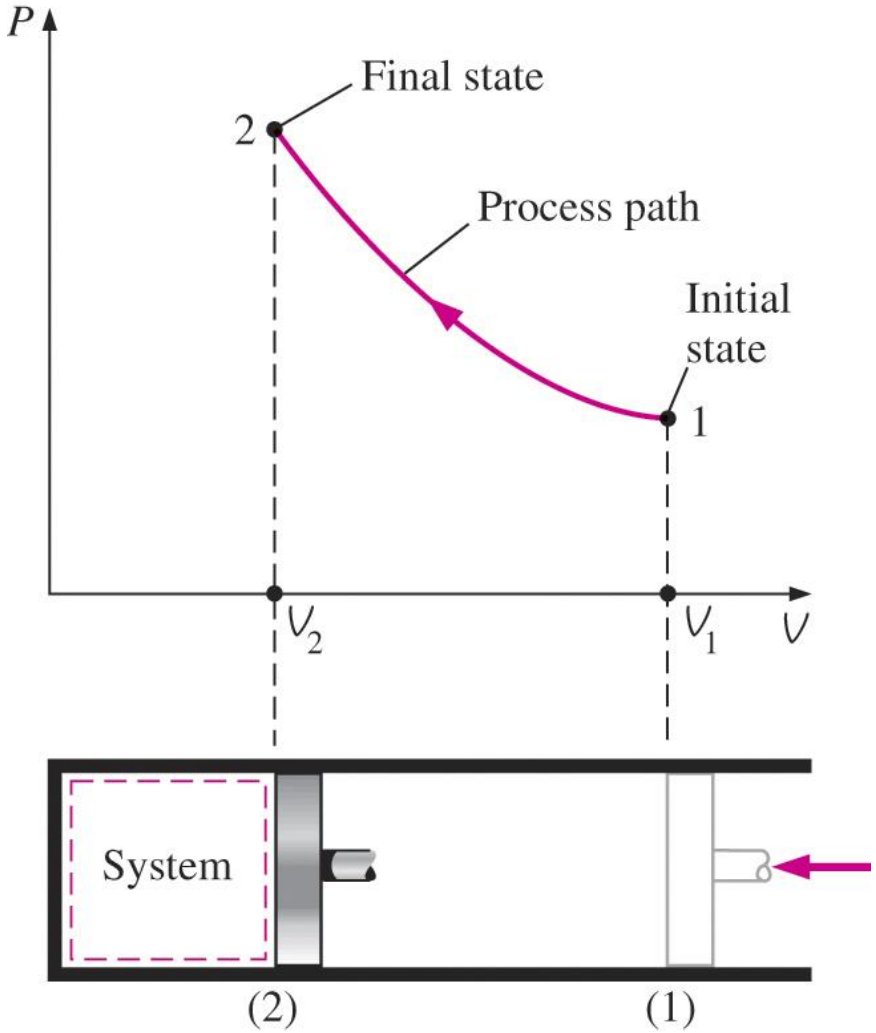
Sistemi chiusi e stazionari $\Longrightarrow$ $$\Delta U = Q - L$$

Il Primo Principio della Termodinamica afferma che:

- il calore **Q** ed il lavoro **L**, scambiati lungo una trasformazione eseguita, sono diversi tra loro e dipendono solo dal tipo di trasformazione seguita
- la loro differenza **Q-L** non dipende dalla trasformazione effettuata ma solo dai suoi punti iniziale e finale, perché equivale alla variazione di una grandezza di stato, ossia equivale all'energia totale del sistema, somma dell'energia interna e delle energie cinetiche e potenziali del sistema a livello macroscopico (per sistemi chiusi e stazionari l'energia interna)

Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Con riferimento alla generica trasformazione 1-2:



$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$$

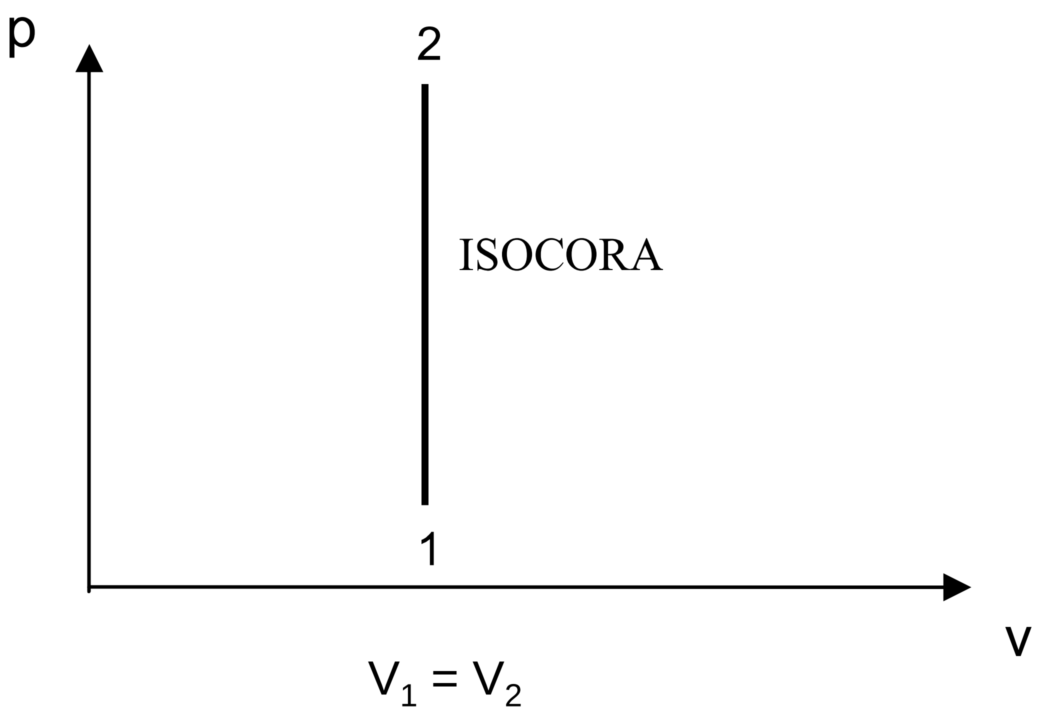
$$l_{12} = \int_1^2 p \cdot dv$$

Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ISOCORO

Il caso più semplice è quello di un processo a volume costante, caratterizzato da dv = 0.

Su un diagramma p-v tale trasformazione è rappresentata da un segmento perpendicolare all'asse delle ascisse



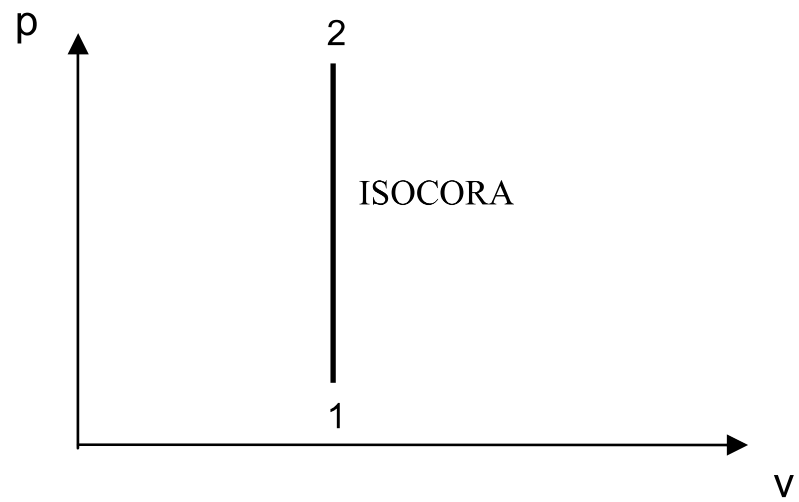
Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ISOCORO $V_1 = V_2 \Rightarrow dV = 0$

Si ha:

$$dV = 0 \Rightarrow dL = p \cdot dV = 0$$

$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = 0$$



Dal Primo Principio:

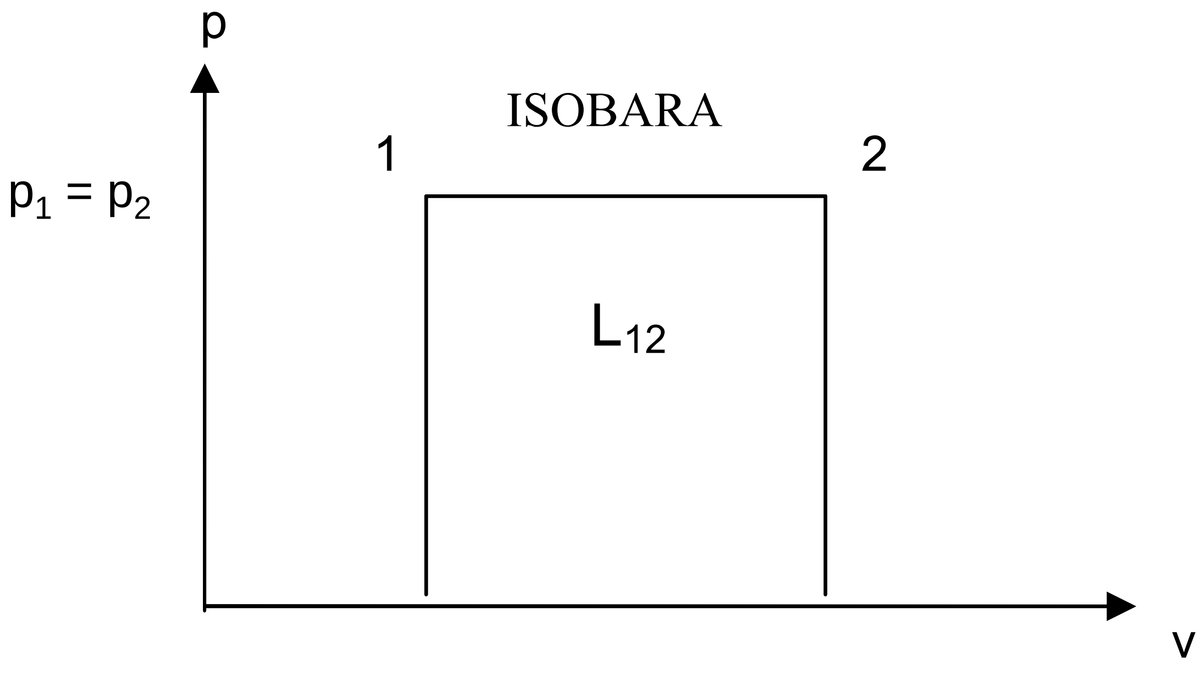
$$dQ = dU + dL$$

$$dL = 0 \Rightarrow dQ = dU \Rightarrow Q_{1,2} = U_2 - U_1$$

In termini specifici: $q_{1,2} = u_2 - u_1$

Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ISOBARO



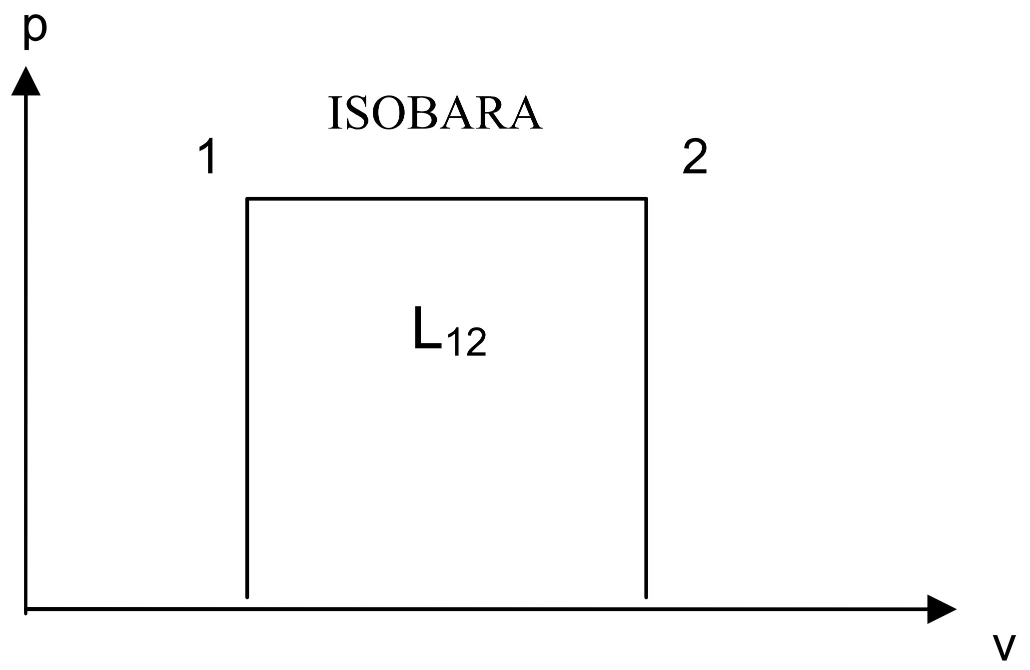
Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ISOBARO

$$p = cost. \Rightarrow L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = p \cdot \int_1^2 dV = p(V_2 - V_1)$$

In termini specifici:

$$l_{12} = \int_1^2 p \cdot dv = p \cdot (v_2 - v_1)$$



Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ISOBARO $p_1 = p_2 \Rightarrow dp = 0$

Dal Primo Principio:

$$dQ = dU + dL$$

$$L_{1,2} = p \cdot (V_2 - V_1) \Rightarrow Q_{1,2} = U_2 - U_1 + p \cdot (V_2 - V_1)$$

In termini specifici:

$$q_{1,2} = u_2 - u_1 + p \cdot (v_2 - v_1)$$

$$u_2 - u_1 = q_{12} - p(v_2 - v_1)$$

Applicazioni del I principio a trasformazioni notevoli

Processo ADIABATICO $\longrightarrow$ $Q = 0$

Dal Primo Principio:

$$dU = dQ - dL$$

$$essendo\ Q = 0$$

$$dU = -dL$$

$$dU + dL = 0$$

In termini specifici:

$$du = dq - dl$$

$$essendo\ q = 0$$

$$du = -dl$$

$$du + dl = 0$$