

## Il motore stirling

Ideato da quasi 200 anni, è un motore potenzialmente ad elevatissima efficienza, utilizzato inizialmente come alternativa più affidabile delle macchine a vapore, così detto anche “motore ad aria calda”. Nel corso degli anni ha avuto un’evoluzione tecnologica importante, è rimasto poco diffuso sul mercato, utilizzato per applicazioni speciali, con produzioni e numeri limitati, tipicamente impiegato quando le esigenze tecniche richiedono piccole potenze e combustione esterna. Date le caratteristiche di mercato odierno nel settore energia rinnovabile, il motore stirling rappresenta un generatore dall’elevato potenziale.

### Principali caratteristiche

Dal punto di vista tecnico, il ciclo Stirling è un ciclo termodinamico “perfetto”, perché a livello teorico ottiene il massimo rendimento disponibile, pari al rendimento di Carnot.

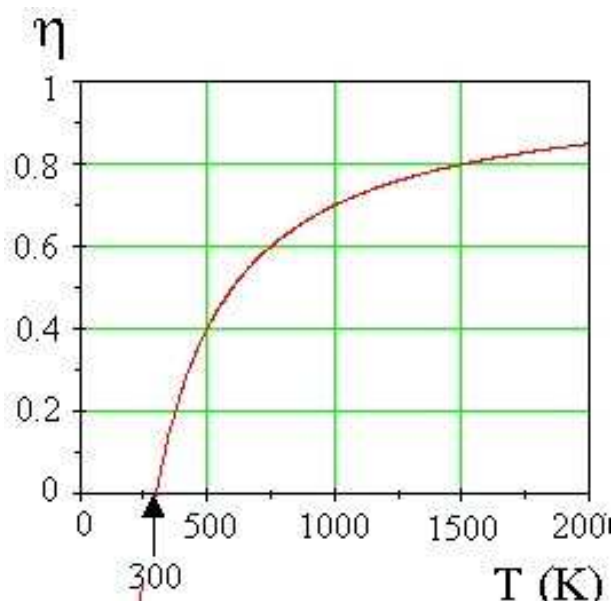
Dal secondo principio della termodinamica, è noto che dato un salto termico disponibile, il massimo rendimento possibile, nella conversione di calore in lavoro, sarà il rendimento di Carnot, espresso dalla seguente formula:

$$\eta = 1 - T_f / T_c$$

$T_f$  = temperatura pozzo freddo (espressa in Kelvin)

$T_c$  = temperatura fonte calda (espressa in Kelvin)

$\eta$  = rendimento termodinamico, rapporto fra lavoro e calore speso



Andamento del rendimento al variare della temperatura massima



**Come funziona il ciclo Stirling dal punto di vista pratico:**

E' un motore che utilizza un gas, ed ha trasformazioni isoterme: l'espansione e la compressione avvengono a temperatura costante.

Durante la compressione il gas viene raffreddato, e rimane alla minor temperatura possibile, risulta pertanto minimo il lavoro necessario.

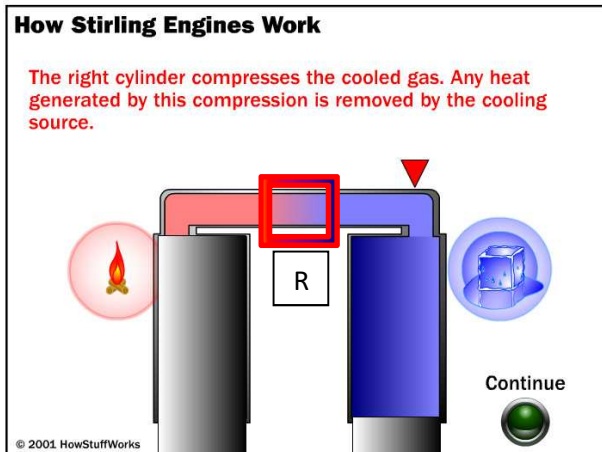
Durante l'espansione il gas viene riscaldato, e rimane alla maggior temperatura possibile, risulta pertanto massimo il lavoro ottenibile.

Per compiere il ciclo termodinamico, lo stesso gas viene spostato fra la zona calda e la zona fredda del motore, ad ogni spostamento il attraversa il "rigeneratore", che di fatto è un accumulatore di calore.

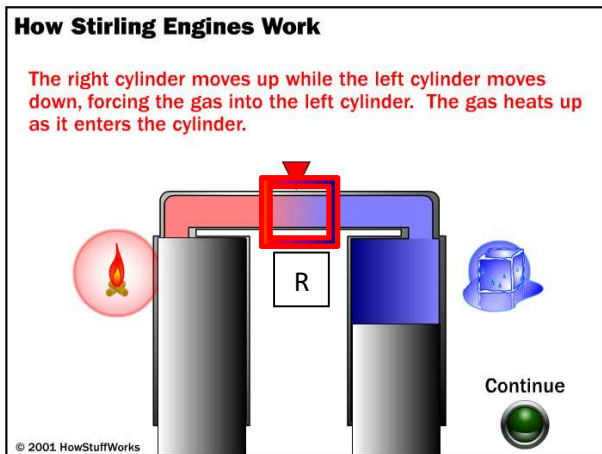
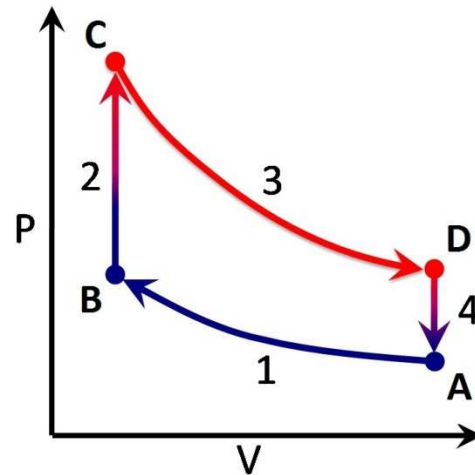
## Funzionamento del motore a ciclo Stirling

Link di riferimento per vedere l'animazione: <http://auto.howstuffworks.com/stirling-engine1.htm>

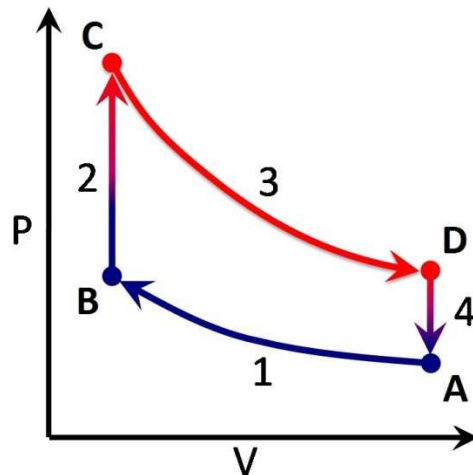
### 1 - Compressione



A) Inizio fase 1, compressione

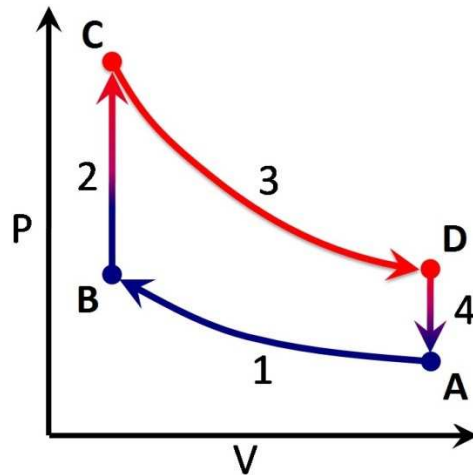
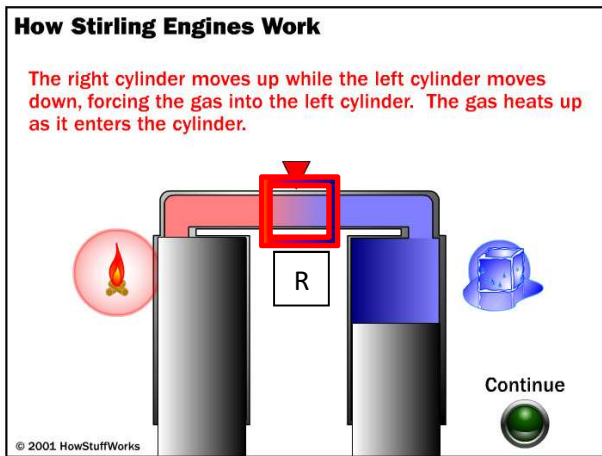


B) Fine fase 1, compressione.

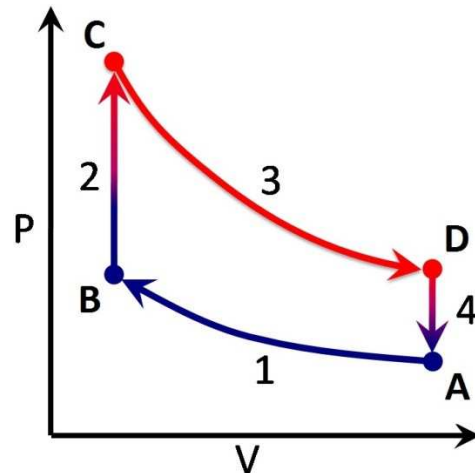
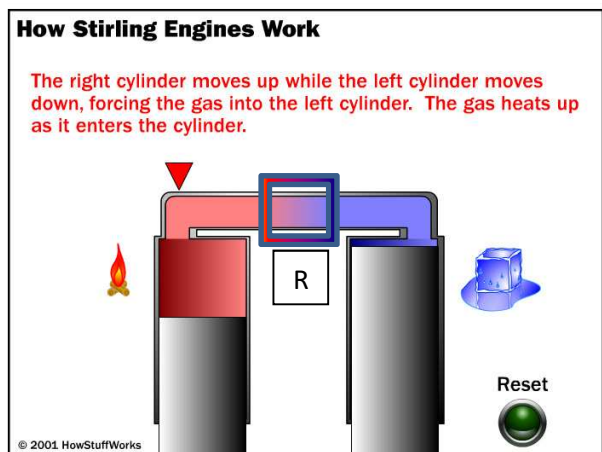


In questa fase, 1 sul grafico, il gas in zona blu viene compresso ed anche raffreddato, rimane pertanto a temperatura costante, la minore possibile. Lo stantuffo blu assorbe lavoro di compressione.

2 - Rigenerazione, con riscaldamento del gas



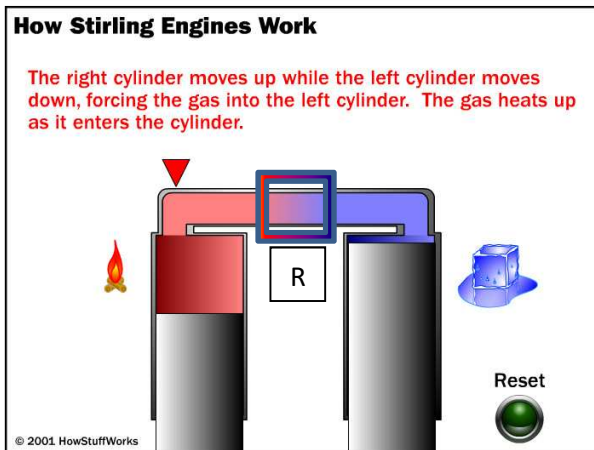
B) Inizio fase 2, inizio trasferimento del gas nella zona calda, con riscaldamento gas dal rigeneratore



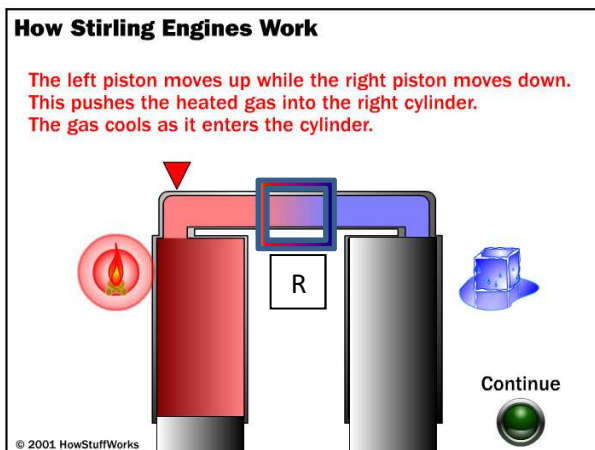
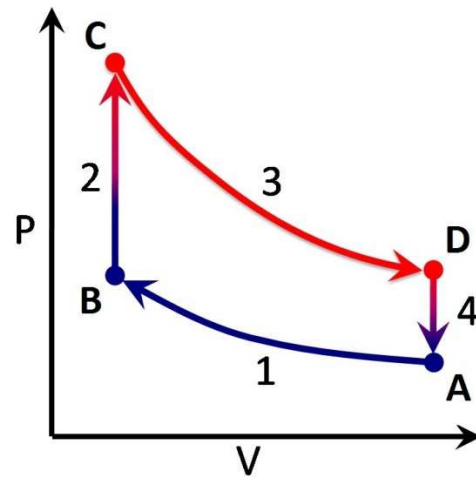
C) Fine fase 2, rigenerazione

In questa fase, 2 sul grafico, il gas dopo la compressione viene trasferito nella zona calda del motore, attraversa il rigeneratore R, facendo questo si riscalda, assume la temperatura della parte calda del rigeneratore, arriva così alla massima temperatura disponibile. Il rigeneratore si raffredda, il motore non assorbe né cede lavoro.

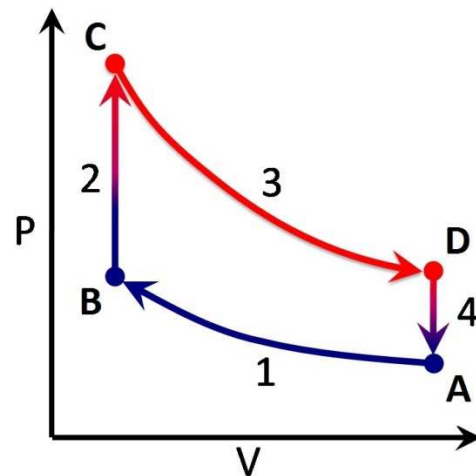
### 3 - Espansione



C) Inizio fase 3, espansione

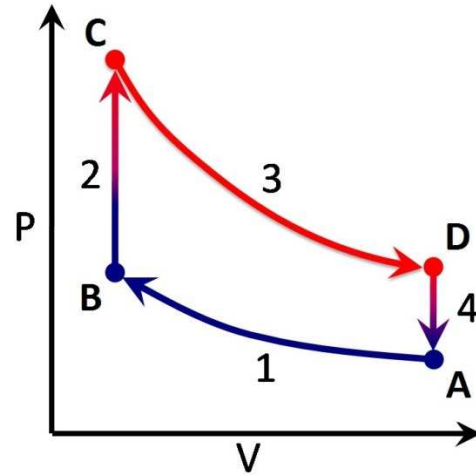
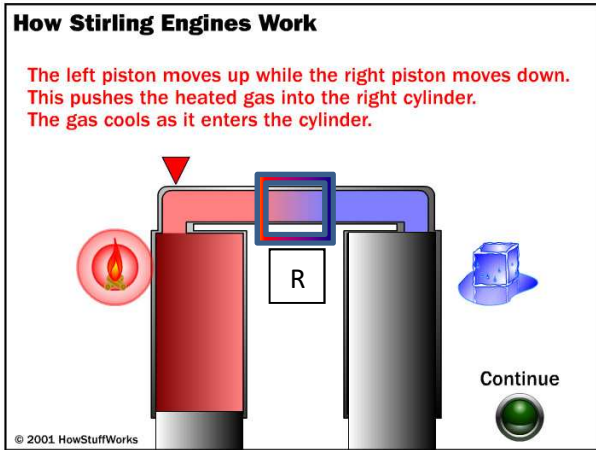


D) Fine fase 3, espansione

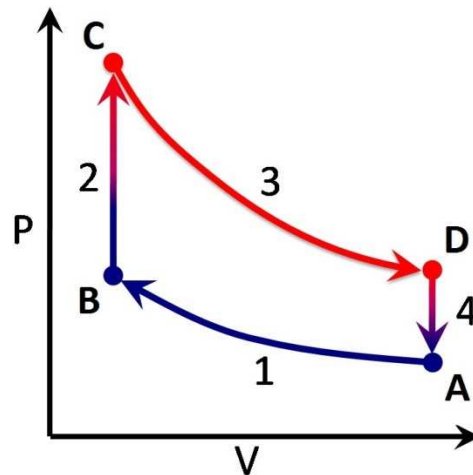
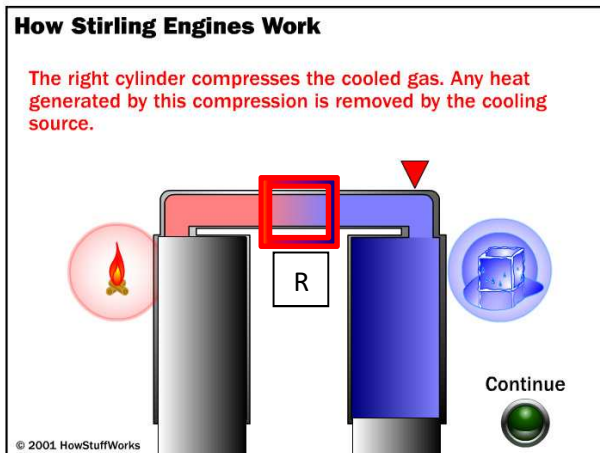


In questa fase, 3 sul grafico, il gas in zona rossa viene espanso ed anche riscaldato, rimane pertanto a temperatura costante, la massima possibile. Lo stantuffo rosso cede il lavoro di espansione.

Rigenerazione, con raffreddamento del gas



D) Inizio fase 4, rigenerazione



A) Fine fase 4, rigenerazione

Il gas, nella fase 4, dopo l'espansione, viene trasferito nella zona fredda del motore, attraverso il rigeneratore R, facendo questo si raffredda, assume la temperatura della parte fredda del rigeneratore, arriva così alla minima temperatura disponibile. Il rigeneratore si riscalda, il motore non assorbe né cede lavoro.



Per capire come scaturisce un lavoro positivo, con cui una parte del calore viene trasformato in energia meccanica, occorre osservare che il gas subisce dilatazione con il riscaldamento e restringimento con il raffreddamento, questo implica che con il gas nella zona calda avremo una pressione elevata, ed una bassa pressione quando il gas è nella zona fredda. Lo stantuffo caldo viene pertanto premuto in espansione con un a pressione superiore a quella necessaria per premere lo stantuffo freddo.

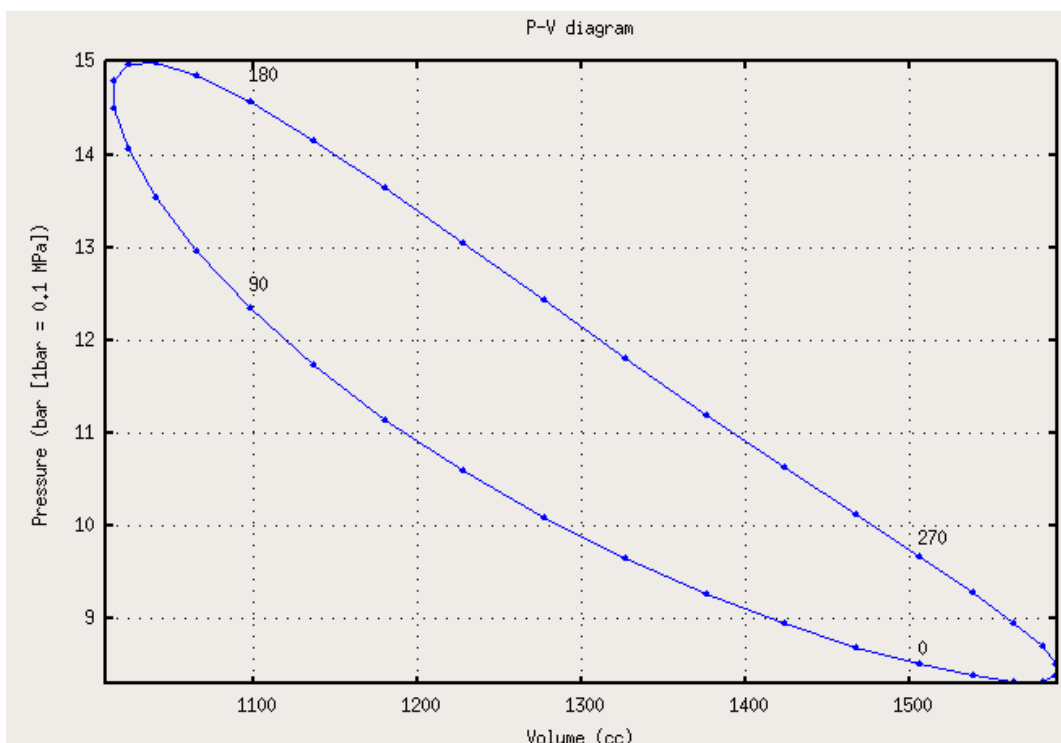
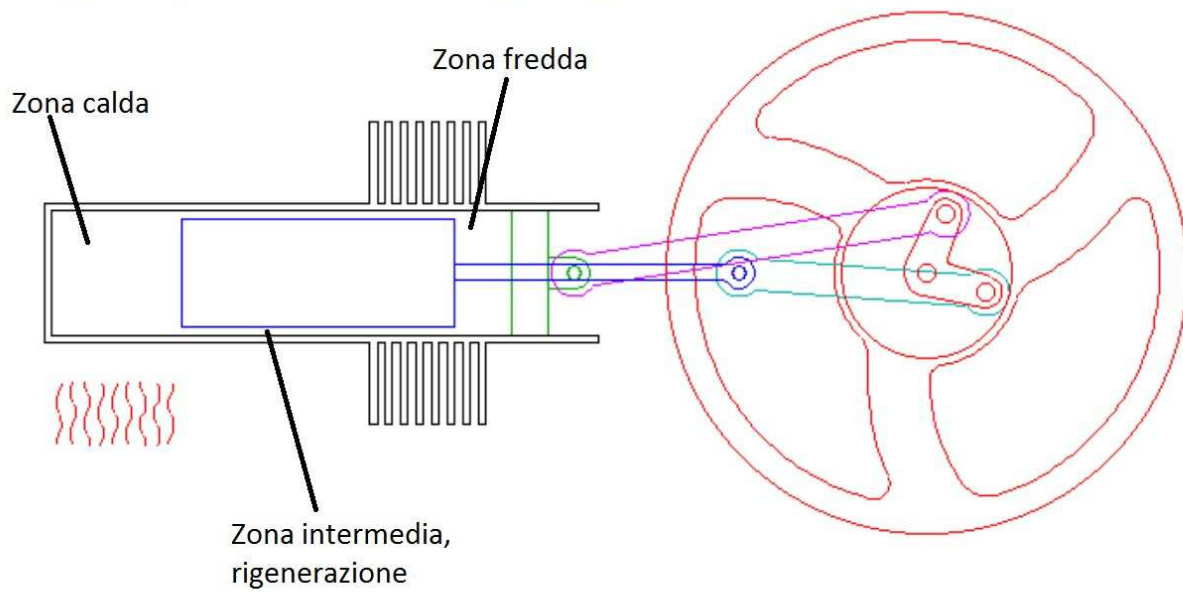
Siccome lo stantuffo caldo cede un lavoro verso l'esterno,  $L_{\text{exp}}$ , mentre lo stantuffo freddo assorbe un lavoro inferiore dall'esterno,  $L_{\text{comp}}$ ,

il lavoro netto sarà:

$$L_{\text{netto}} = L_{\text{exp}} - L_{\text{comp}}$$

Un esempio pratico:

## Single Cylinder Stirling Engine



Esempio misurato di un ciclo stirling reale

Esempio “motore ad aria calda” modello Heinrici – brevetto 1906

Motore a ciclo stirling monocilindrico



Applicaizoni moderne



Motore a ciclo stirling modello a 4 pistoni



Applicazione su concentratore solare