

# Richiami di termodinamica

# Principi e trasformazioni

- Principi della termodinamica
- Proprietà dei fluidi
- Trasformazioni dei fluidi
- Cicli di riferimento

# Primo principio della termodinamica

- Esperienza di Joule: conversione del lavoro in calore

$$\Delta U = Q + \bar{L}$$

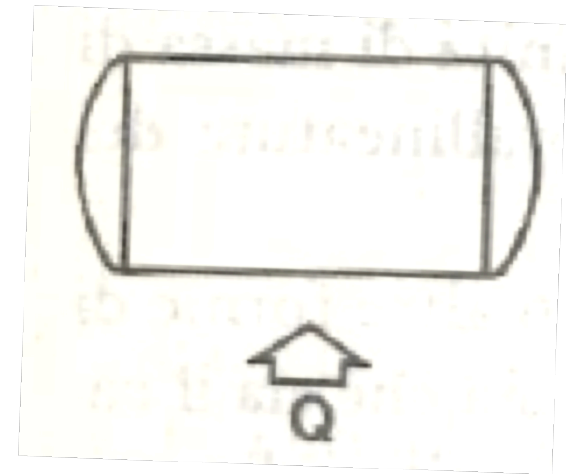
- Dove Q e L sono positivi verso il sistema
- Calore e Lavoro arricchiscono il contenuto energetico del fluido, ovvero la sua energia interna

# Applicazioni del primo principio

- In un recipiente indeformabile (nessuno scambio di lavoro è possibile) si ha:

$$Q = \Delta U$$

- La trasformazione è visibile attraverso un aumento della pressione e della temperatura del fluido nel recipiente.
- La trasformazione è isocora (a volume costante)

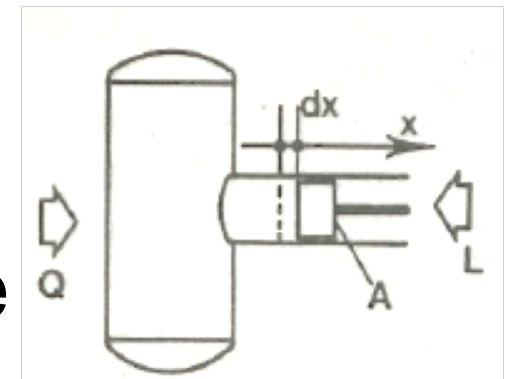


# Applicazioni del primo principio

- Se una parete del recipiente è mobile (ad esempio un pistone che si muove linearmente) e se non ci sono scambi di calore:

$$\bar{L} = \Delta U$$

- Se il pistone comprime il fluido aumentano la sua temperatura e pressione, nel caso contrario diminuiscono
- La trasformazione è adiabatica



# Applicazioni del primo principio

- Se esprimiamo il lavoro meccanico del pistone, possiamo scrivere:

$$d\bar{L} = -Fdx = -pAdx = -pdV$$

- Per conoscere il lavoro dobbiamo integrare l'espressione suddetta ma dobbiamo conoscere la legge che lega pressione e volume
- E il lavoro dipende dal tipo di trasformazione che utilizziamo

# Lavoro adiabatico

- Dato che

$$\rho = \frac{1}{V} \Rightarrow \ln \rho = -\ln V \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} \Rightarrow dV = -V \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{d\rho}{\rho^2}$$

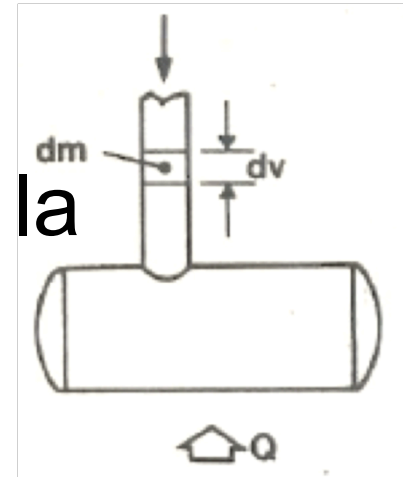
- Quindi

$$d\bar{L} = -pdV = p \frac{d\rho}{\rho^2} = dU$$

- In una trasformazione di compressione la densità aumenta e quindi il lavoro è positivo. Viceversa in espansione

# Sistema con massa variabile

- Se nel recipiente viene introdotta una massa  $dm = \rho dV$  e se il processo è comunque adiabatico, la variazione di energia interna consiste nell'energia interna introdotta con la massa e dal lavoro di introduzione della massa:



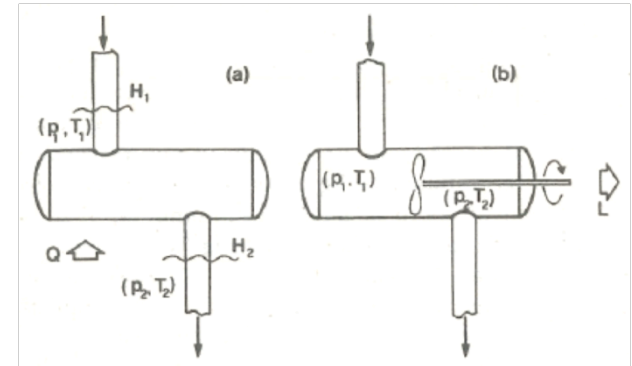
$$dU^* = dm * U(m) + pdV = dm \left[ U(m) + \frac{pdV}{dm} \right] = dm \left[ U(m) + \frac{p}{\rho} \right]$$

- Dalla definizione di entalpia:

$$dU^* = dm * H(m)$$



# Sistema aperto



- In un sistema con introduzione ed estrazione continua di massa possiamo scrivere:

$$dU^* = dm_1 H_1 - dm_2 H_2 + dQ^* + dL^*$$

- Se il sistema è in regime stazionario, ovvero le variabili sono costanti nel tempo:

$$dU^* = 0 \Rightarrow H_2 - H_1 = Q + L$$

- Che è una delle espressioni del primo principio della termodinamica

# Sistemi aperti

- Per i sistemi aperti l'entalpia sostituisce l'energia interna nel primo principio della termodinamica

$$dH = dQ + dL$$

- Dall'esame delle due espressioni del primo principio potrebbe sembrare che:

$$dU = dQ + d\bar{L} \quad e \quad dH = dQ + dL \quad \Rightarrow \quad dU = dH$$

- Ma in realtà  $dH=dU$  solo se  $d(pv)=0$

# Sistemi aperti

- Ma questa condizione si ha solo nel caso delle trasformazioni isoterme:

$$d\left(\frac{p}{\rho}\right) = 0 \Rightarrow \frac{\rho dp - p d\rho}{\rho^2} = 0 \Rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho}$$

- Invece se supponiamo una trasformazione adiabatica:

$$dL = dH = dU - p \frac{d\rho}{\rho^2} + \frac{dp}{\rho} = \frac{dp}{\rho}$$

- Quindi dalle seguenti:

$$dU = d\bar{L} = p \frac{d\rho}{\rho^2} \quad ; \quad d\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{dp}{\rho} - p \frac{d\rho}{\rho^2} \quad ; \quad dL = \frac{dp}{\rho}$$

- **Risulta:**  $dL = d\bar{L} + d\left(\frac{p}{\rho}\right) \Rightarrow L = \bar{L} + \Delta\left(\frac{p}{\rho}\right) = \bar{L} + \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1}$

# Generalizzazione del I principio

- Se in sistema abbiamo anche variazioni di energia potenziale e cinetica queste si sommano alle variazioni di energia interna.

- In un sistema chiuso:

$$\Delta U + \Delta E_p + \Delta E_c = Q + \bar{L}$$

- In un sistema aperto:

$$\Delta H + \Delta E_p + \Delta E_c = Q + L$$

# Espressioni particolari

- Nel caso di trasformazioni adiabatiche:

$$\Delta H + \Delta E_p + \Delta E_c = L$$

- Se poi consideriamo un liquido in cui non abbiamo variazioni significative di energia interna:

$$L = \Delta H + \Delta E_p + \Delta E_c = \Delta \left( \frac{p}{\rho} \right) + g\Delta h + \frac{\Delta c^2}{2}$$

- Per un aeriforme invece non abbiamo variazioni importanti di energia potenziale:

$$\Delta H + \Delta E_c = Q + L \Rightarrow dH + cdc = dQ + dL \Rightarrow dH_t = dQ + dL$$

# Trasformazioni reversibili e irreversibili

- Un processo è reversibile quando può essere percorso nei due sensi riguadagnando le condizioni iniziali di partenza
- Tipici fenomeni di irreversibilità:
  - Attrito
  - Scambio termico con differenza finita di temperatura
  - Reazioni chimiche

# Entropia

- Ogni trasformazione di lavoro è in realtà irreversibile e possiamo scrivere:

$$d\bar{L} = p \frac{d\rho}{\rho^2} + dL_p$$

- Quindi possiamo scrivere il I principio:

$$dU = dQ + p \frac{d\rho}{\rho^2} + dL_p \quad \Rightarrow \quad dQ + dL_p = dU - p \frac{d\rho}{\rho^2}$$

- I due membri della equazione sopra non sono differenziali esatti, ma se li dividiamo per T lo diventano:

$$\frac{dQ + dL_p}{T} = \frac{dU}{T} - \frac{p}{T} \frac{d\rho}{\rho^2}$$

# Entropia

- Chiamiamo il primo membro della equazione precedente entropia, la indichiamo con  $S$  e possiamo scrivere nelle seguenti forme:

$$dU = TdS + p \frac{d\rho}{\rho^2}$$

$$dH = TdS + \frac{dp}{\rho}$$

- L' entropia non può mai diminuire nei processi adiabatici:  $dS = \frac{dQ}{T} + \frac{dL_p}{T}$



# Proprietà dei fluidi

- Stati fisici dei fluidi
  - Gas e vapore
  - Liquido
- Equazioni di stato
  - Gas perfetti
  - Gas reali e vapore
  - Liquidi
- Equazioni calorimetriche

# Proprietà dei fluidi

- Gas perfetti
  - Non vi sono interazioni fisiche tra le molecole del gas
  - Il gas può essere schematizzato come ideale se
    - urti perfettamente elastici tra le molecole
    - non può essere liquefatto ( $T > T_{\text{critica}}$ )
    - calore specifico costante
    - assenza di viscosità

# Proprietà dei fluidi

- Equazione di stato dei gas perfetti

$$p\tilde{V} = \tilde{R}T$$

$p$  = pressione [Pa]

$\tilde{V}$  = volume molare [ $\text{m}^3/\text{kmol}$ ]

$$R = \frac{\tilde{R}}{\tilde{M}}$$

$\tilde{R}$  = costante universale dei gas perfetti 8.314 [ $\text{kJ}/\text{kmol K}$ ]

$\tilde{M}$  = peso molecolare [ $\text{kg}/\text{kmol}$ ]

$$pv = RT$$

$v$  = volume specifico [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$R$  = costante del gas [ $\text{kJ}/\text{kg K}$ ]

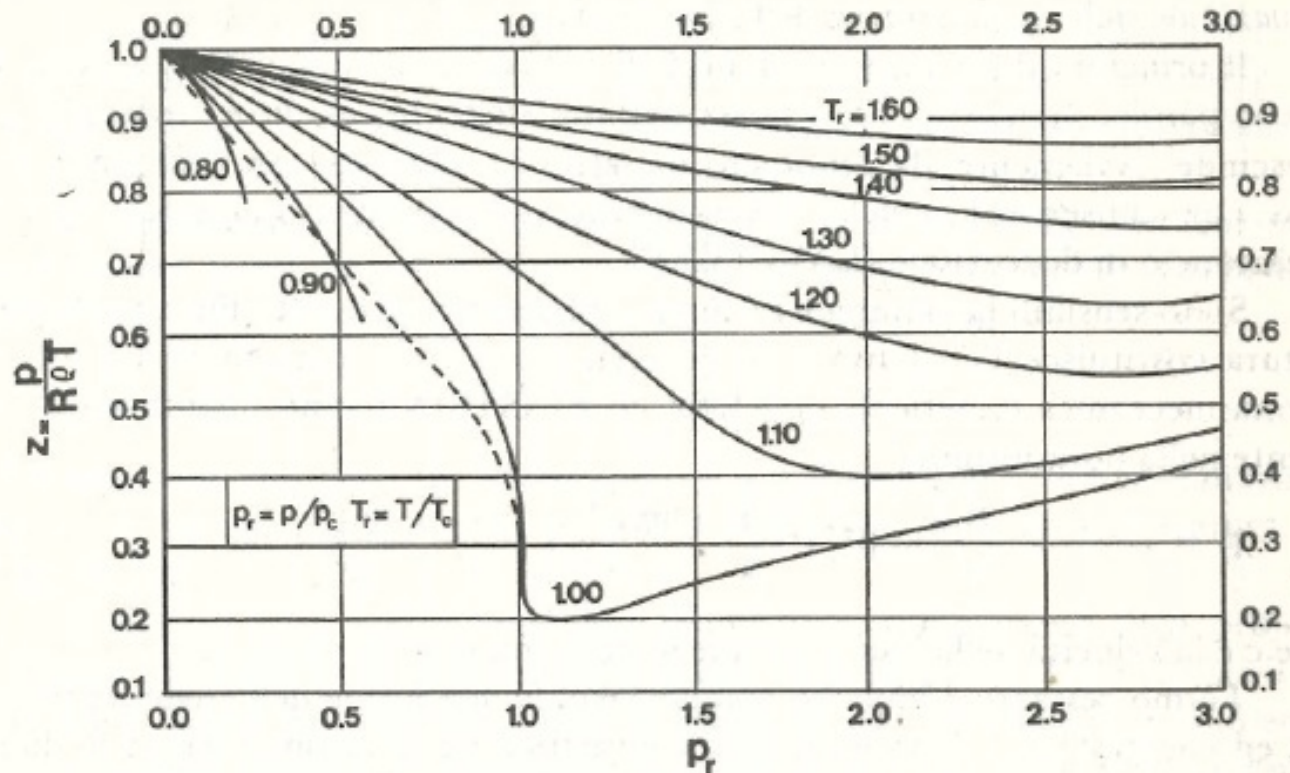
$$p = \rho RT$$

$T$  = temperatura [K]

# Gas reali

- Per i gas reali possiamo utilizzare come equazione di stato la seguente:

$$Z = \frac{pv}{RT}$$



# Proprietà dei fluidi

- I gas perfetti hanno il calore specifico funzione della sola temperatura

$$dQ = TdS = dU - pdv \quad (1)$$

- Se esprimiamo  $S$  e  $U$  in funzione di  $v$  e  $T$

$$dS = \frac{\partial S}{\partial T} dT + \frac{\partial S}{\partial v} dv \quad (2)$$

$$dU = \frac{\partial U}{\partial T} dT + \frac{\partial U}{\partial v} dv \quad (3)$$

- Inserendo la (3) nella (1)

$$dS = \frac{dU}{T} - \frac{p}{T} dv = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right) \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial U}{\partial v} \right) \frac{dv}{T} - \frac{p}{T} dv \quad (4)$$

# Proprietà dei fluidi

- Confrontando la (2) e la (4) e differenziando rispetto a  $v$  e a  $T$

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{\partial U}{\partial T} \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 S}{\partial T \partial v} = \frac{\partial^2 U}{\partial T \partial v} \frac{1}{T}$$

$$\frac{\partial S}{\partial v} = \left[ \frac{\partial U}{\partial v} - p \right] \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 S}{\partial v \partial T} = \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial T} - \frac{\partial p}{\partial T} \right] \frac{1}{T} - \left[ \frac{\partial U}{\partial v} - p \right] \frac{1}{T^2}$$

- quindi

$$\frac{\partial^2 U}{\partial T \partial v} \frac{1}{T} = \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial T} - \frac{\partial p}{\partial T} \right] \frac{1}{T} - \left[ \frac{\partial U}{\partial v} - p \right] \frac{1}{T^2} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\partial p}{\partial T} = \left[ p - \frac{\partial U}{\partial v} \right] \frac{1}{T} \quad \Rightarrow \quad \frac{T}{p} \frac{\partial p}{\partial T} = 1 - \frac{1}{p} \frac{\partial U}{\partial v} = \alpha_v$$

# Proprietà dei fluidi

- Utilizzando l'equazione di stato dei gas perfetti

$$\alpha_v = \frac{T}{p} \frac{\partial p}{\partial T} = \frac{v R}{R v} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p} \frac{\partial U}{\partial v} = 0$$

- Quindi l'energia interna per valori finiti di pressione è indipendente dal volume specifico e quindi è funzione della sola temperatura.
- Si può dimostrare lo stesso per l'entalpia.

# Proprietà dei fluidi

- Grandezze calorimetriche: calore specifico

$$c = \frac{dQ}{dT}$$

- Calore specifico a pressione costante

$$c_p = \frac{dH}{dT}$$

- Calore specifico a volume costante

$$c_v = \frac{dU}{dT}$$



# Proprietà dei fluidi

- Dalla definizione di entalpia

$$H = U + pv \quad \Rightarrow \quad dH = dU + d(pv) \quad \Rightarrow$$

$$dH - dU = (c_p - c_v)dT = d(pv) = RdT$$

- Quindi per un gas perfetto

$$c_p - c_v = R$$

- I gas monoatomici hanno  $c_p$  costante
- I gas poliatomici hanno espressioni di  $c_p$  e  $c_v$  in funzione della temperatura (funzioni di Langen)

$$c_p = a + bT + cT^2$$

$$c_v = a' + b'T + c'T^2$$

# Proprietà dei fluidi

- Cambiamenti di fase: transizione di una sostanza tra una fase e l'altra
- Vale la regola di Gibbs-Helmoltz
$$v = N - x + 2$$
  - $v$  numero delle informazioni necessarie per definire il sistema
  - $N$  numero dei componenti
  - $x$  numero delle fasi
- Il punto in cui coesistono le tre fasi solida, liquida e gassosa si chiama punto triplo
- Il punto sopra al quale non può esistere la fase liquida si chiama punto critico

# Grandezze Termodinamiche

- Nei calcoli che dobbiamo eseguire è necessario conoscere alcune grandezze termodinamiche:
  - $h$ : entalpia
  - $s$ : entropia
  - $u$ : energia interna
- Poiché non è possibile avere una misura diretta delle grandezze suddette, è possibile calcolarle indirettamente conoscendo alcune grandezze fisiche e termodinamiche misurabili:
  - Pressione, volume, temperatura
  - Calore specifico

# Grandezze Termodinamiche

- Per i gas possiamo utilizzare facilmente l'equazione di stato dei gas perfetti e le espressioni del calore specifico in funzione della temperatura
- Per i liquidi e per i gas lontani dalle condizioni ideali ci sono tre metodi:
  - Integrazione dell'equazione di stato e delle espressioni dell'entalpia, entropia e energia interna
  - Tabelle termodinamiche
  - Diagrammi termodinamici

- Stato di saturazione dell'acqua in funzione della temperatura

t °C	p bar	volume specifico $v_g$	specifico ( $v_g-v_f$ )	m <sup>3</sup> /kg $v_g$	Entalpia $h_g$	r	kJ/kg $h_g$	Entropia $s_g$	r/T	kJ/kg K $s_g$	t °C
0	0.006 017	0.001 000 2	206.298	206.299	-0.0	2501.6	2501.6	-0.0	9.1578	9.1578	0
0.01	0.006 112	0.001 000 2	206.162	206.163	+0.0	2501.6	2501.6	0	9.1575	9.1575	0.01
2	0.007 055	0.001 000 1	179.922	179.923	8.4	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047	2
4	0.008 129	0.001 000 0	157.271	157.272	16.8	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526	4
6	0.009 345	0.001 000 0	137.779	137.780	25.2	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0015	6
8	0.010 720	0.001 000 1	120.965	120.966	33.6	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513	8
10	0.012 270	0.001 000 3	106.429	106.430	42.0	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020	10
12	0.014 014	0.001 000 4	93.834	93.835	50.4	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536	12
14	0.015 973	0.001 000 7	82.899	82.900	58.8	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060	14
15	0.017 139	0.001 000 8	77.977	77.978	62.9	2466.1	2529.1	0.2243	8.5582	8.7826	15
16	0.018 168	0.001 001 0	73.383	73.384	67.1	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593	16
18	0.020 624	0.001 001 3	65.086	65.087	75.5	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135	18
20	0.023 366	0.001 001 7	57.837	57.838	83.9	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6684	20
25	0.031 660	0.001 002 9	43.401	43.402	104.8	2442.5	2547.3	0.3670	8.1922	8.5592	25
30	0.042 415	0.001 004 3	32.928	32.929	125.7	2430.7	2556.4	0.4365	8.0181	8.4546	30
35	0.056 216	0.001 006 0	25.244	25.245	146.6	2418.8	2565.4	0.5049	7.8495	8.3543	35
40	0.073 750	0.001 007 8	19.545	19.546	167.5	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583	40
45	0.095 820	0.001 009 9	15.275	15.276	188.4	2394.9	2583.3	0.6383	7.5277	8.1661	45
50	0.123 35	0.001 012 0	12.045	12.046	209.3	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776	50
55	0.157 41	0.001 014 5	9.577 9	9.578 9	230.2	2370.8	2601.0	0.7677	7.2248	7.9925	55
60	0.199 20	0.001 017 1	7.677 5	7.678 5	251.1	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108	60
65	0.250 09	0.001 019 9	6.201 3	6.202 3	272.0	2346.3	2618.4	0.8933	6.9388	7.8321	65
70	0.311 62	0.001 022 8	5.045 3	5.046 3	293.0	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565	70
75	0.385 49	0.001 025 9	4.133 1	4.134 1	313.9	2321.5	2635.4	1.0154	6.6681	7.6835	75
80	0.473 60	0.001 029 2	3.408 1	3.409 1	334.8	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6133	80
85	0.578 03	0.001 032 6	2.827 8	2.828 8	355.9	2296.1	2652.0	1.1343	6.4111	7.5454	85
90	0.701 09	0.001 036 1	2.360 3	2.361 3	376.9	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4798	90
95	0.845 26	0.001 039 9	1.981 2	1.982 2	398.0	2270.2	2668.1	1.2501	6.1665	7.4166	95
100	1.013 25	0.001 043 7	1.672 0	1.673 0	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554	100
105	1.208 0	0.001 047 7	1.418 3	1.419 3	440.2	2243.6	2683.7	1.3630	5.9331	7.2962	105
110	1.432 7	0.001 051 9	1.208 9	1.209 9	461.3	2230.0	2691.3	1.4185	5.8203	7.2388	110
115	1.690 6	0.001 056 2	1.035 3	1.036 3	482.5	2216.2	2698.7	1.4733	5.7099	7.1832	115
120	1.985 4	0.001 060 6	0.890 46	0.891 52	503.7	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293	120
125	2.321 0	0.001 065 2	0.769 17	0.770 23	525.0	2188.0	2713.0	1.5813	5.4957	7.0769	125
130	2.701 3	0.001 070 0	0.667 07	0.668 14	546.3	2173.6	2719.9	1.6344	5.3917	7.0261	130
135	3.130 8	0.001 075 0	0.580 74	0.581 81	567.7	2158.9	2726.6	1.6869	5.2897	6.9766	135
140	3.613 8	0.001 080 1	0.507 41	0.508 49	589.1	2144.0	2733.1	1.7390	5.1894	6.9284	140
145	4.155 2	0.001 085 3	0.444 89	0.445 97	610.6	2128.7	2739.3	1.7906	5.0910	6.8815	145
150	4.760 0	0.001 090 8	0.391 36	0.392 45	632.1	2113.2	2745.4	1.8416	4.9941	6.8358	150
155	5.433 3	0.001 096 4	0.345 55	0.346 64	653.8	2097.4	2751.2	1.8923	4.8989	6.7911	155
160	6.180 6	0.001 102 2	0.305 66	0.306 76	675.5	2081.3	2756.7	1.9425	4.8050	6.7473	160
165	7.007 7	0.001 108 2	0.271 29	0.272 40	697.3	2064.8	2762.0	1.9923	4.7126	6.7048	165
170	7.920 2	0.001 114 5	0.241 44	0.242 55	719.1	2047.9	2767.1	2.0416	4.6214	6.6630	170
175	8.924 4	0.001 120 9	0.215 42	0.216 54	741.1	2030.7	2771.8	2.0906	4.5314	6.6221	175
180	10.027	0.001 127 5	0.192 67	0.193 80	763.1	2013.2	2776.3	2.1393	4.4426	6.5819	180
185	11.233	0.001 134 4	0.172 63	0.173 86	785.3	1995.2	2780.4	2.1876	4.3548	6.5424	185
190	12.551	0.001 141 5	0.155 18	0.156 32	807.5	1976.7	2784.3	2.2356	4.2680	6.5036	190
195	13.987	0.001 148 9	0.139 69	0.140 84	829.9	1957.9	2787.8	2.2833	4.1821	6.4654	195
200	15.549	0.001 156 5	0.126 01	0.127 16	852.4	1938.6	2790.9	2.3307	4.0971	6.4278	200
205	17.243	0.001 164 4	0.113 87	0.115 03	875.0	1918.8	2793.8	2.3778	4.0128	6.3906	205
210	19.077	0.001 172 6	0.103 07	0.104 24	897.7	1898.5	2796.2	2.4247	3.9293	6.3539	210
215	21.060	0.001 181 1	0.093 45	0.094 625	920.6	1877.6	2798.3	2.4713	3.8463	6.3176	215
220	23.198	0.001 190 0	0.084 85	0.086 038	943.7	1856.2	2799.9	2.5178	3.7639	6.2817	220
225	25.501	0.001 199 2	0.077 15	0.078 349	966.9	1834.3	2801.2	2.5641	3.6820	6.2461	225
230	27.976	0.001 208 7	0.070 34	0.071 450	990.3	1811.7	2802.0	2.6102	3.6006	6.2107	230
235	30.632	0.001 218 7	0.064 03	0.064 245	1013.8	1788.5	2802.3	2.6561	3.5194	6.1756	235
240	33.478	0.001 229 1	0.058 42	0.059 645	1037.6	1764.6	2802.2	2.7020	3.4386	6.1406	240
245	36.523	0.001 239 9	0.051 37	0.054 606	1061.6	1740.0	2801.6	2.7478	3.3579	6.1057	245
250	39.776	0.001 251 3	0.048 79	0.050 037	1085.8	1714.7	2800.4	2.7935	3.2773	6.0708	250
255	43.246	0.001 263 2	0.048 79	0.045 896	1110.2	1688.5	2798.7	2.8392	3.1968	6.0359	255
260	46.943	0.001 275 6	0.040 86	0.042 130	1134.9	1661.5	2796.4	2.8848	3.1161	6.0010	260
265	50.877	0.001 288 7	0.037 43	0.038 710	1159.9	1633.5	2793.5	2.9306	3.0353	5.9658	265
270	55.058	0.001 302 5	0.034 29	0.035 588	1185.2	1604.6	2789.9	2.9763	2.9541	5.9304	270
275	59.496	0.001 317 0	0.031 42	0.032 736	1210.9	1574.7	2785.5	3.0222	2.8725	5.8947	275
280	64.202	0.001 332 4	0.028 80	0.030 126	1236.8	1543.6	2780.4	3.0683	2.7903	5.8586	280
285	69.186	0.001 348 7	0.026 38	0.027 733	1263.2	1511.3	2774.5	3.1146	2.7074	5.8220	285
290	74.461	0.001 365 9	0.024 17	0.025 535	1290.0	1477.6	2767.6	3.1611	2.6237	5.7848	290
295	80.037	0.001 384 4	0.022 13	0.023 513	1317.3	1442.6	2759.8	3.2070	2.5380	5.7460	295



(temp. Sat. C)		50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
50.00 (263.9)	v	0.00101	0.001041	0.001088	0.001153	0.001249	0.045 301	0.051 941	0.057 791	0.068 494	0.078 616	0.088 446	0.098 093
	h	213.55	422.74	634.96	853.79	1085.76	29255	3071.2	3198.3	3433.7	3664.5	3897.9	4135.3
	s	0.70119	1.30304	1.83663	2.32525	2.791	6.2105	6.4545	6.6508	6.9770	7.2578	7.5108	7.7431
60.00 (275.6)	v	0.001009	0.001041	0.001087	0.001152	0.001248	0.036 145	0.042 222	0.047 379	0.056 592	0.065 184	0.073 478	0.081 587
	h	214.41	423.49	635.58	854.21	1085.75	2885.0	3045.8	3180.1	3422.2	3656.2	3891.7	4130.7
	s	0.70072	1.30227	1.83554	2.3237	2.78859	6.0692	6.3386	6.5462	6.8818	7.1664	7.4217	7.6550
70.00 (285.8)	v	0.001009	0.00104	0.001086	0.001151	0.001246	0.029 457	0.035 233	0.039 922	0.048 086	0.055 590	0.062 787	0.069 798
	h	215.26	424.25	636.21	854.63	1085.75	2839.4	3018.7	3161.2	3410.6	3647.9	3885.4	4126.0
	s	0.70026	1.30149	1.83445	2.32217	2.78621	5.9327	6.2333	6.4536	6.7993	7.0880	7.3456	7.5808
80.00 (295.0)	v	0.001009	0.00104	0.001086	0.00115	0.001244	0.024 264	0.029 948	0.034 310	0.041 704	0.048 394	0.054 770	0.060 956
	h	216.12	425	636.84	855.06	1085.77	2786.8	2989.9	3141.6	3398.8	3639.5	3879.2	4121.5
	s	0.69979	1.30072	1.83337	2.32064	2.78386	5.7942	6.1349	6.3694	6.7262	7.0191	7.2790	7.5158
90.00 (303.3)	v	0.001008	0.001039	0.001085	0.001149	0.001245	0.001402	0.025 792	0.029 29	0.036 737	0.042 798	0.048 534	0.054 080
	h	216.98	425.75	637.47	855.49	1085.79	1344.55	2959.0	3121.2	3386.8	3631.1	3873.0	4116.7
	s	0.69933	1.29995	1.83229	2.31912	2.78153	3.25329	6.0408	6.2915	6.6600	6.9574	7.2196	7.4579
100.00 (311.0)	v	0.001008	0.001039	0.001084	0.001148	0.001241	0.001398	0.022 421	0.026 408	0.032 760	0.038 320	0.043 546	0.048 580
	h	217.84	426.5	638.1	855.92	1085.83	1343.36	2925.8	3099.9	3374.6	3622.7	3866.8	4112.0
	s	0.69887	1.29919	1.83121	2.31761	2.77923	3.24878	5.9489	6.2182	6.5994	6.9013	7.1660	7.4058
125.00 (327.8)	v	0.001007	0.001037	0.001083	0.001146	0.001236	0.001388	0.016 122	0.020 010	0.025 590	0.030 259	0.034 510	0.038 682
	h	219.99	428.39	639.67	857.02	1085.96	1340.65	2828.0	3042.9	3343.3	3601.4	3851.1	4100.3
	s	0.69771	1.29728	1.82854	2.31387	2.77357	3.23797	5.7155	6.0481	6.4654	6.7796	7.0504	7.2942
150.00 (342.1)	v	0.001006	0.001036	0.001081	0.001143	0.001232	0.001378	0.011 462	0.015 661	0.020 795	0.024 884	0.028 587	0.032 086
	h	222.13	430.27	641.26	858.14	1086.16	1338.25	2694.8	2979.1	3310.6	3579.8	3835.4	4088.6
	s	0.69656	1.29638	1.8259	2.31018	2.76804	3.22776	5.4467	5.8876	6.3487	6.6764	6.9536	7.2013
175.00 (354.6)	v	0.001005	0.001036	0.00108	0.001141	0.001229	0.001369	0.001716	0.012 460	0.017 359	0.021 043	0.024 314	0.027 376
	h	224.27	432.16	642.85	859.27	1096.41	1336.14	1663.62	2906.3	3276.5	3557.8	3819.7	4077.0
	s	0.69541	1.29351	1.82328	2.30655	2.76265	3.21808	3.764	5.7274	6.2432	6.5858	6.8698	7.1215
200.00 (365.7)	v	0.001003	0.001034	0.001078	0.001139	0.001225	0.001361	0.001666	0.009 947 0	0.014 771	0.018 161	0.021 111	0.023 845
	h	226.41	434.05	644.45	860.43	1086.72	1334.26	1647.18	2820.5	3241.1	3535.5	3803.8	4065.3
	s	0.69427	1.29614	1.82068	2.30296	2.75737	3.20885	3.73084	5.5585	6.1456	6.5043	6.7953	7.0511
300.00	v	0.000999	0.001029	0.001072	0.00113	0.001211	0.001322	0.001554	0.002 830 6	0.008 680 8	0.011 436	0.013 647	0.015 619
	h	234.95	441.62	650.9	865.2	1088.42	1328.69	1610.04	2161.8	3085.0	3443.0	3739.7	4018.5
	s	0.68971	1.2843	1.81053	2.28907	2.73735	3.17565	3.64552	4.4896	5.7972	6.2340	6.5560	6.8288
400.00	v	0.000995	0.001024	0.001066	0.001122	0.001198	0.001308	0.00149	0.001 909 1	0.005 615 6	0.008 088 4	0.009 930 2	0.011 521
	h	243.46	449.22	657.44	870.2	1090.76	1325.39	1589.69	1934.1	2906.8	3346.4	3674.8	3971.7
	s	0.68519	1.27714	1.80072	2.27584	2.71879	3.14688	3.58848	4.1190	5.4762	6.0135	6.3701	6.6606
500.00	v	0.000991	0.00102	0.001061	0.001114	0.001187	0.001287	0.001444	0.001 729 1	0.003 882 2	0.006 111 3	0.007 719 7	0.009 075 9
	h	251.94	456.83	664.06	865.4	1093.61	1323.69	1576.39	1877.7	2723.0	3248.3	3610.2	3925.3
	s	0.68069	1.27014	1.79123	2.26319	2.70145	3.12127	3.54361	4.0083	5.1782	5.8207	6.2138	6.5222
600.00	v	0.000988	0.001016	0.001055	0.001107	0.001176	0.00127	0.001408	0.001 632 4	0.002 915 5	0.004 835 0	0.006 269 0	0.007 460 3
	h	260.39	464.46	670.74	880.76	1096.88	1323.17	1567.15	1847.3	2570.6	3151.6	3547.0	3879.6
	s	0.67622	1.26331	1.78203	2.25105	2.68513	3.09806	3.5059	3.9383	4.9374	5.6477	6.0775	6.4031
700.00	v	0.000984	0.001012	0.00105	0.001101	0.001166	0.001254	0.001379	0.001 567 1	0.002 466 8	0.003 971 9	0.005 256 6	0.006 320 8
	h	268.81	472.1	677.48	886.27	1100.51	1323.57	1560.58	1827.8	2467.1	3060.4	3486.3	3835.3
	s	0.67177	1.25662	1.76308	2.23937	2.66967	3.07674	3.473	3.8855	4.7688	5.4931	5.9562	6.2979
800.00	v	0.000980	0.001008	0.001045	0.001094	0.001157	0.00124	0.001355	0.001 518 0	0.002 188 1	0.003 379 2	0.004 519 3	0.005480 5
	h	277.2	479.75	684.28	891.92	1104.43	1324.7	1555.92	1814.2	2397.4	2980.3	3428.7	3792.8
	s	0.66733	1.25006	1.76438	2.22811	2.65497	3.05696	3.4436	3.8425	4.6488	5.3595	5.8470	6.2034
900.00	v	0.000977	0.001004	0.001041	0.001088	0.001149	0.001227	0.001334	0.001 478 8	0.002 012 9	0.002 966 8	0.003 964 2	0.004 840 7
	h	285.55	487.4	691.12	897.87	1108.62	1326.43	1552.7	1804.6	2349.9	2913.5	3374.6	3752.4
	s	0.6629	1.24363	1.75591	2.21721	2.64093	3.03845	3.41686	3.8059	4.5602	5.2468	5.7479	6.1179
1000.00	v	0.000973	0.001	0.001036	0.001082	0.001141	0.001216	0.001315	0.001 446 4	0.001 893 4	0.002 668 1	0.003 535 6	0.004 341 1
	h	293.87	495.07	698	903.53	1113.02	1328.65	1550.6	1797.6	2316.1	2857.5	3324.4	3714.3
	s	0.65848	1.23732	1.74764	2.20666	2.62748	3.02102	3.39225	3.7738	4.4913	5.1505	5.6579	6.0397

# Proprietà dell'acqua e del vapore surriscaldato

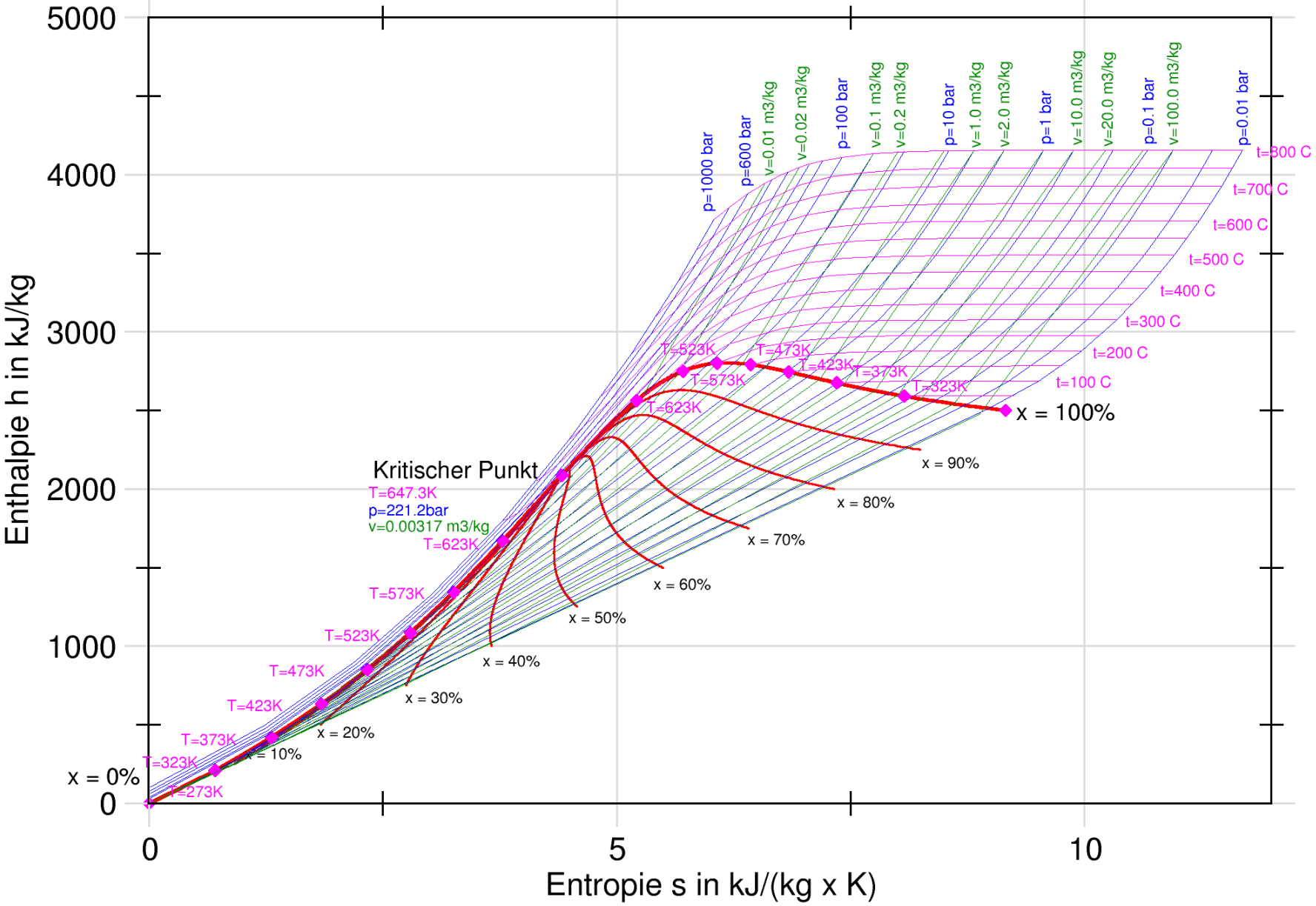
# Diagrammi termodinamici

- h-s: da indicazioni sulle trasformazioni in cui si scambia calore e si compie lavoro con una visualizzazione immediata
- T-s: permette una visualizzazione dei cicli termodinamici e il calcolo indiretto del calore scambiato
- p-v: evidenzia le trasformazioni in cui si compie lavoro

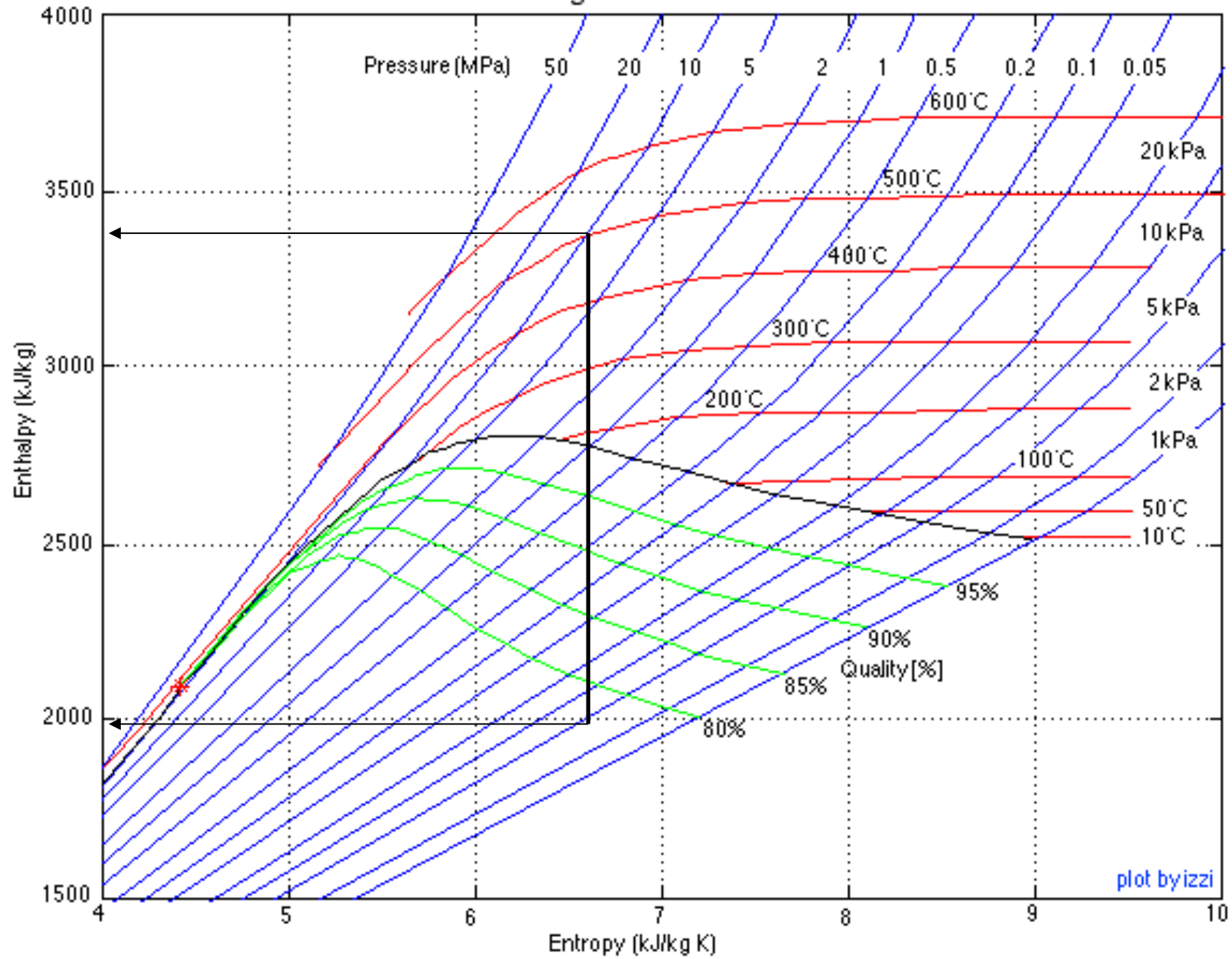


# Mollier-h, s Diagramm

fuer Wasserdampf

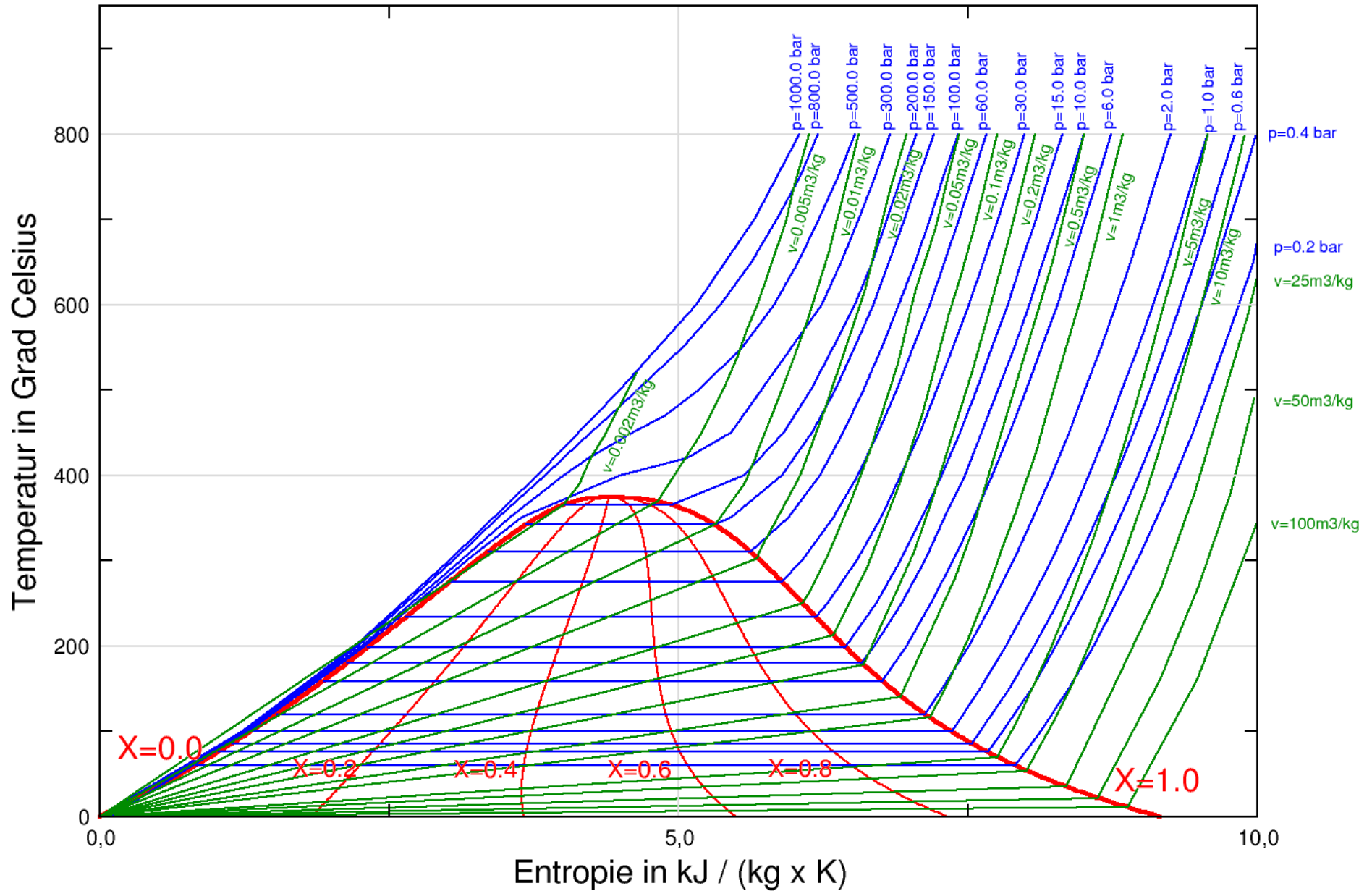


*h-s* diagram for water

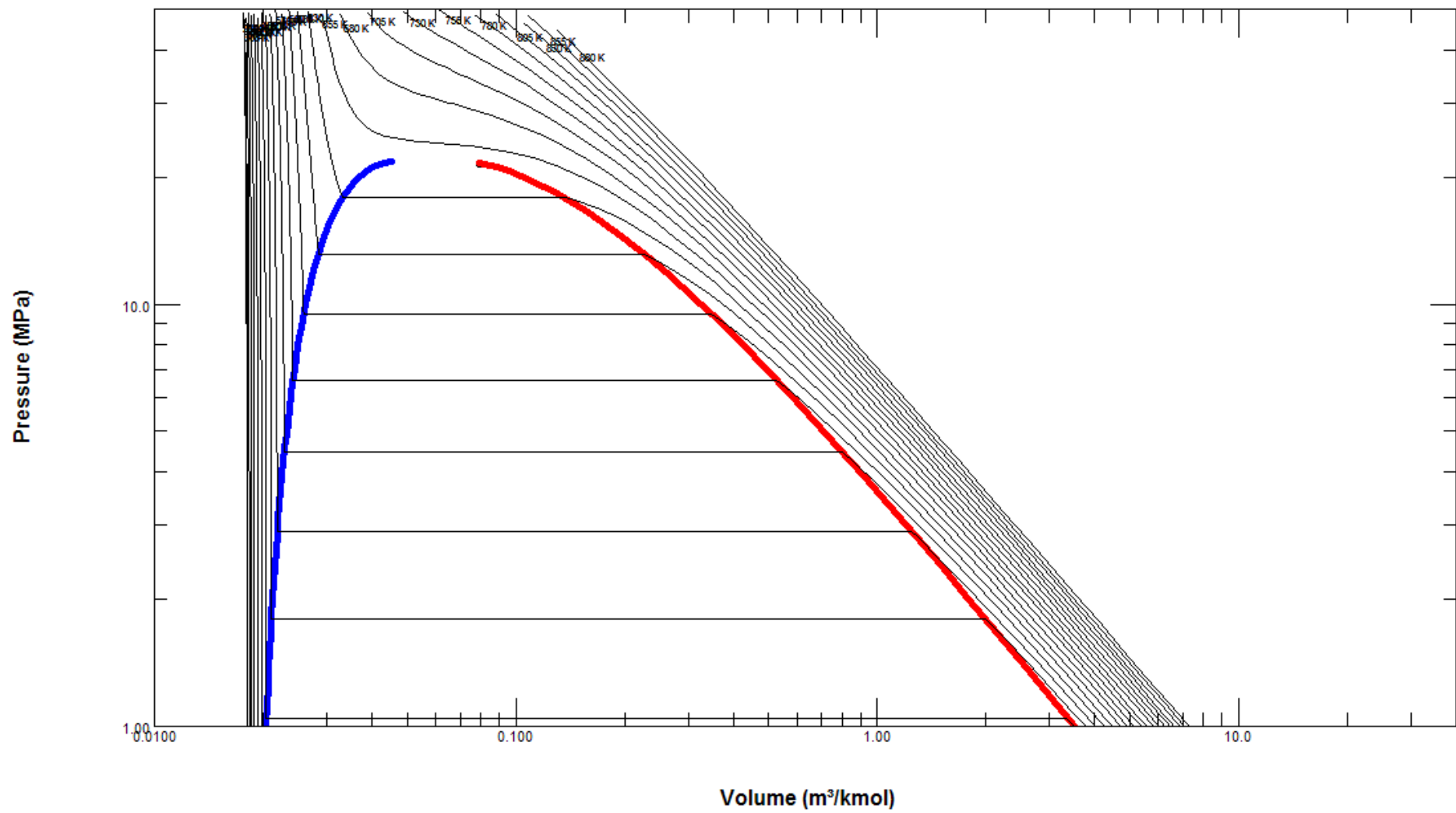


# Wasserdampf

## Temperatur-Entropie-Diagramm







# Trasformazioni termodinamiche

- Trasformazione isoterma:  $T = \text{cost}$
- Trasformazione isobara:  $p = \text{cost}$
- Trasformazione isocora:  $v = \text{cost}$
- Trasformazione politropica:  $c = \text{cost}$
- Trasformazione adiabatica:  $Q = 0$
- Trasformazione isentropica:  $s = \text{cost}$  (n.b. una isentropica deve sempre essere anche adiabatica)

# Trasformazione isoterma

$$c = \infty \quad T = \text{cost} \quad p = A * \rho \quad \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} \quad \Delta U_{12} = 0 \quad \Delta H_{12}$$

$$\bar{L}_{12} = \int_1^2 p \frac{d\rho}{\rho^2} = \int_1^2 A\rho \frac{d\rho}{\rho^2} = \int_1^2 A \frac{d\rho}{\rho} = A \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$L_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \int_1^2 \frac{A d\rho}{\rho} = A \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$Q_{12} = L_{12}$$

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_{12}}{T} = \frac{p_1}{T\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = R \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

# Trasformazione isobara

$$c = c_p \quad p = \text{cost} \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\bar{L}_{12} = \int_1^2 p \frac{d\rho}{\rho^2} = p \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) = \frac{p}{\rho_1} \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) = \frac{p}{\rho_1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

$$L_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$Q_{12} = \Delta H_{12} = c_p (T_2 - T_1) = c_p T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{c_p p}{R \rho_1} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) = \frac{kp}{(k-1)\rho_1} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)$$

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_{12}}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{k}{k-1} R \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$$



# Trasformazione isocora

$$c = c_v \quad \rho = \text{cost} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\bar{L}_{12} = \int_1^2 p \frac{d\rho}{\rho^2} = 0$$

$$L_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

$$Q_{12} = \Delta U_{12} = c_v (T_2 - T_1) = c_v T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{c_v p}{R \rho_1} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) = \frac{p}{(k-1) \rho_1} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_{12}}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{k-1} R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

# Trasformazione adiabatica

$$c = 0 \quad p = A^* \rho^k \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\bar{L}_{12} = \int_1^2 p \frac{d\rho}{\rho^2} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$L_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$Q_{12} = 0 \quad \Delta U_{12} = \bar{L}_{12} \quad \Delta H_{12} = L_{12} \quad \Delta S_{12} = 0$$

# Trasformazione politropica

$$c \neq 0 \quad m = \frac{c_p - c}{c_v - c} \quad p = A\rho^m \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\bar{L}_{12} = \int_1^2 p \frac{d\rho}{\rho^2} = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$L_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$\begin{aligned} Q_{12} &= c(T_2 - T_1) = \frac{mc_v - c_p}{m-1} (T_2 - T_1) = \left( \frac{k}{k-1} - \frac{m}{m-1} \right) RT_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \\ &= \left( \frac{k}{k-1} - \frac{m}{m-1} \right) \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$\Delta U_{12} = Q_{12} + \bar{L}_{12} \quad \Delta H_{12} = Q_{12} + L_{12} \quad \Delta S_{12} = R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-k}{m(k-1)}}$$