Thermodynamik I
Übungsnotizen 06
Woche 08

Juncheng Fu (Elias)

2024-11-08

Thema: Kreisprozesse und Dissipation

Vorrechenübung

Aufgabe 6.1 ●●○ Carnot-Prozess

1 kg Luft durchläuft einen Carnot-Prozess mit einem thermischen Wirkungsgrad η_{th} von $60\,\%$. Die während der isothermen Expansion dem Prozess zugeführte Wärme Q_{12} beträgt $40\,\mathrm{kJ}$. Am Anfang der isothermen Expansion beträgt der Druck $p_1 = 7\,\mathrm{bar}$ und das Volumen $V_1 = 0.24\,\mathrm{m}^3$.

Annahmen:

- Luft kann als ideales Gas betrachtet werden.
- Potentielle und kinetische Energien sind vernachlässigbar.

a) Skizzieren Sie den Prozess qualitativ in einem p-V-Diagramm. Kennzeichnen Sie alle relevanten Isothermen sowie alle dem System zu- und abgeführten Wärmen und Arbeiten. ⇒ Ez points in der Prüfung

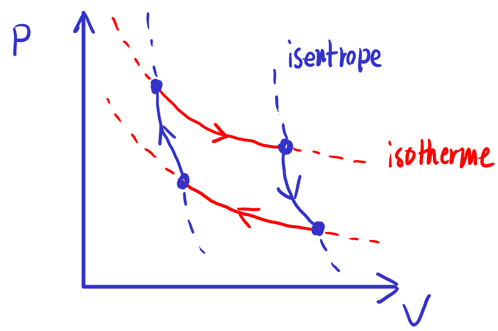
Nur 1. Zustand und 1 → 2 isotherme Expansion geg.
Wie kann man Vollständige Diagramm skizzieren ?

"Carnot-Prozess" definiert schon Verschiedene prozesse

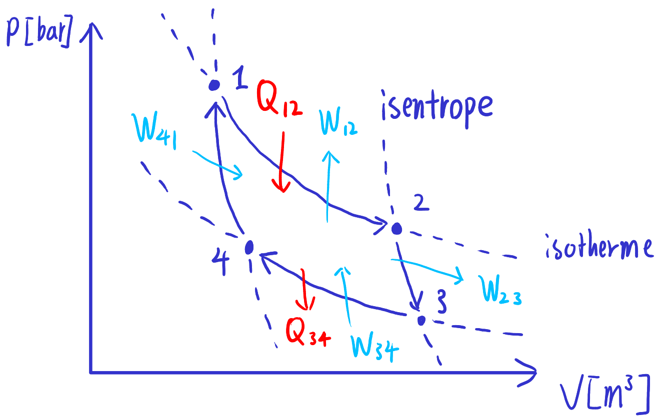
Carnot-Prozess

1. isotherme Expansion
2. isentrope Expansion
3. isotherme Kompression
4. isentrope Kompression

2X Expansion 2X Kompression
isotherm, isentrope Wechselhaft.



Steigung für Isotherm, isentrop
Herleitung sehe Notizen 2. Übung



Woher wissen wir ob Q; W raus oder rein geht ?

Kurze Antwort :

Energiebilanzgleichung

isotherme Expansion:

$\Downarrow$

$T_1 = T_2$

$\Downarrow$

für IG $U(T)$

$\Downarrow$

$U_1 = U_2$

$V \nearrow \Rightarrow pdV > 0 \Rightarrow$ Volumenarbeit $W_v > 0$

$\uparrow$ p immer positiv

$\Downarrow$ leistet arbeit nach drausen

$$\Delta U = Q - W$$

$$\downarrow$$

$$0 = Q_{12} - W_{12}$$

$$\downarrow$$

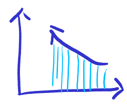
$$Q_{12} = W_{12} > 0$$

$\Rightarrow Q_{12} > 0 \Rightarrow$ Wärme geht rein.

Falls isotherme Kompression:

$\Downarrow$ Analog wie oben $\Delta U = 0$

$V \searrow \Rightarrow \int pdV$ Integration verlauf nach links



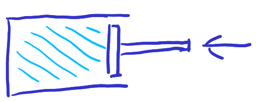
$\Rightarrow \int pdV = W_v < 0$

$\Rightarrow$ Arbeit geht rein

Analog mit E-Bilanz

$Q = W_v < 0 \Rightarrow$ Wärme Verlust

Oder Intuition:



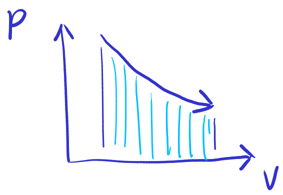
Wenn man Luft komprimiert,
drückt man Zylinder von draussen,
man gibt Arbeit rein in Sys. [Zylinder]

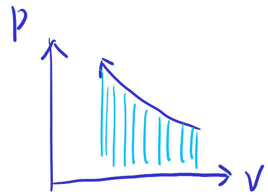
$\Rightarrow$ Zylinder bekommt Arbeit von uns.
$W_v < 0$ für Zylinder

Isentrope : Verlauf hier adiabat und rev. → isentrop

Adiabat ⇒ $Q = 0$

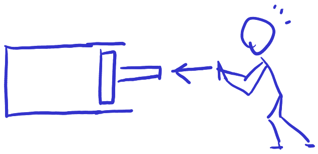
Dann guck man nach Integral-Richtung für PdV



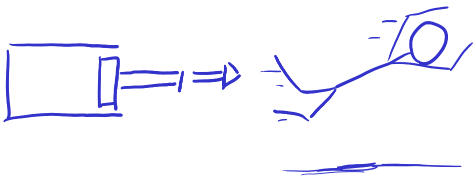


$\int p dV = W_V > 0$ $\int p dV = W_V < 0$

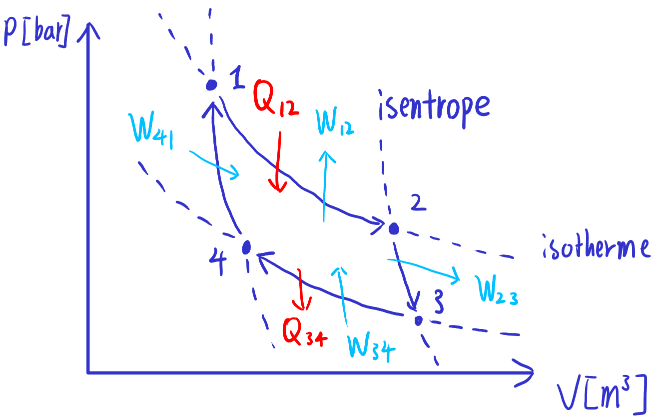
Entscheidet dann ob Arbeit raus oder rein geht,
oder dem Fall Intuition



Kompression Arbeit geht rein



Expansion Arbeit geht raus



b) Bestimmen Sie die maximale und minimale Temperatur T_{max} und T_{min} während des Prozesses.

Aus ZF

Thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{\lvert W_{nutz}\rvert}{\lvert Q_{zu}\rvert}$
für Kreisprozesse:	$\eta_{th,KP} = \frac{\lvert W_{KP}\rvert}{\lvert Q_{zu}\rvert} = 1 - \frac{\lvert Q_{ab}\rvert}{\lvert Q_{zu}\rvert}$
Carnotscher Wirkungsgrad	$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$

Carnot-Wirkungsgrad ist bestmögliche thermischer Wirkungsgrad.

Falls Kreisprozess ist Carnot, dann kann man thermischer Wirkungsgrad und Carnot wirkungsgrad gleichsetzten.

$\Rightarrow$ Es ist Kreisprozess, und ist Carnot

$$\eta_{th,KP} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

bei carnot ist $\eta_{th,kp} = \eta_{carnot}$

T_{ab}, T_{zu} entsprechen T_{min}, T_{max} im Prozess

$$\frac{T_{ab}}{T_{zu}} = \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

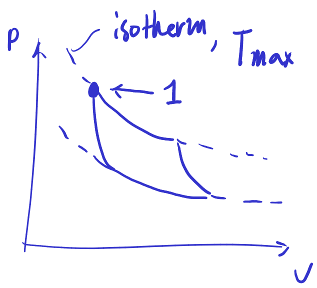
ges. T_{min}, T_{max},

geg. $P_1, V_1, m_{Luft}, Q_{12}, \eta_{th} = \eta_{carnot}$

Ansatz: Temp. Abhängigkeit ? IG $\Rightarrow$ $pv = RT$

$u(T)$

Evaluation: P_1, V_1, m_{Luft} geg. IG $\Rightarrow T_1$ lösbar



$\Rightarrow$ Zustand 1 auf Isotherm T_{max}

$$P_1 V_1 = m_{Luft} R T_1 \Rightarrow T_1 = \frac{P_1 V_1}{m_{Luft} R}$$

$$\overline{R} = 8.314 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}} \qquad R = c_p^{ig} - c_v^{ig} = \frac{\overline{R}}{M}$$

$M_{Luft} = 28{,}97 \frac{kg}{kmol}$ TAB A-1

$$R = \frac{8{,}314 \frac{kJ}{\cancel{kmol} \cdot K}}{28{,}97 \frac{kg}{\cancel{kmol}}} = 0{,}287 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$T_1 = \frac{700\ \text{kPa} \cdot 0{,}24\ \text{m}^3}{1\ \text{kg} \cdot 0{,}287\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}} = \underline{\underline{585{,}366\ \text{K}}} = T_{zu} = T_{max} \text{ in Carnot}$$

✓ML

Durch neue, gelernte Temp. Abhängigkeit in η_{carnot}

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

T_{min} lösbar durch T_{max}, η

$$T_{min} = T_{max}(1-\eta_{carnot}) = \underline{\underline{234{,}14\ \text{K}}}$$

✓ML

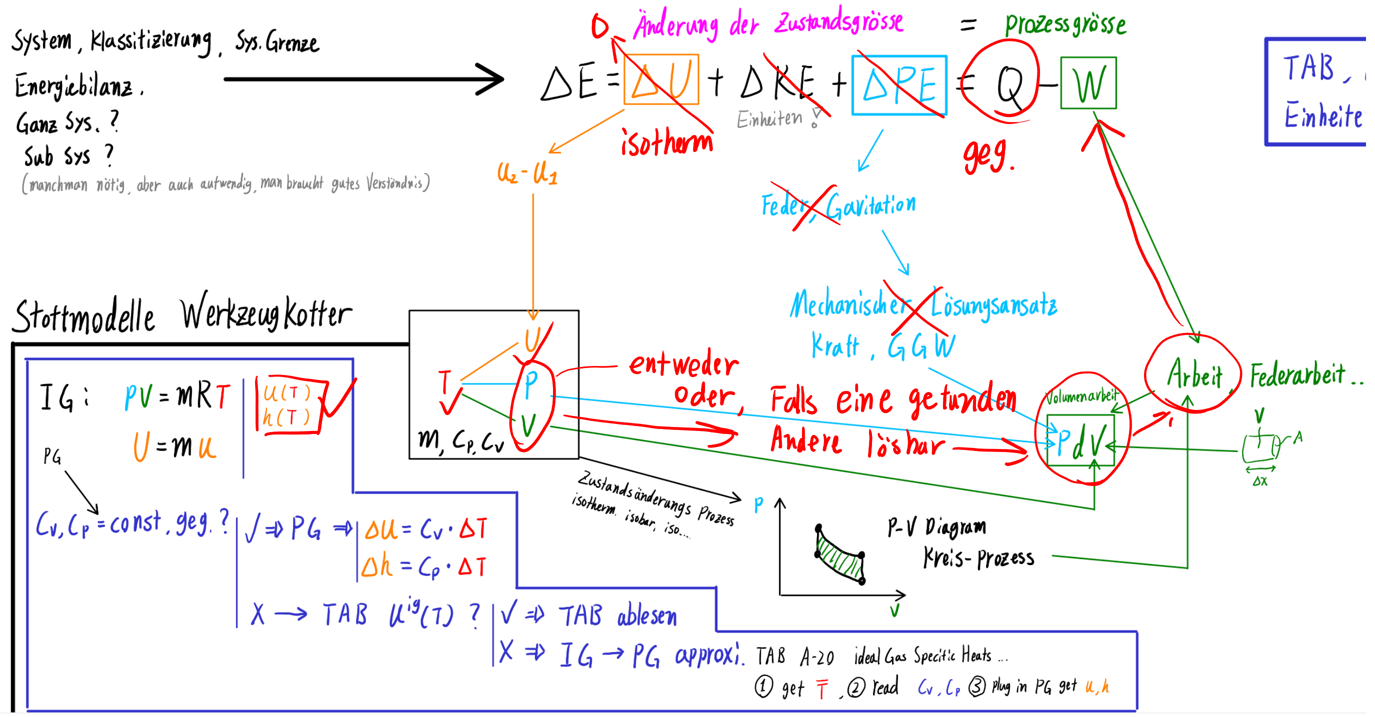
c) Bestimmen Sie das Volumen V_2 am Ende der isothermen Expansion.

Zustandsgröße gesucht.

IG. Ansatz: $PV = mRT$

$T_2 = T_1$ wegen isotherm.

$P_2 = ?$



Die Faden führt sich zu PdV, Arbeit, nach Bilanzgleichung sehe linken Seite gleich 0, Q_{12} geg. $\Rightarrow W_{12} = W_V$ lösbar

Try Energiebilanz

$$\Delta U = Q_{12} - W_{12}$$

$U(T)$ für IG
Prozess isotherm
$T_1 = T_2 \quad U_1 = U_2$

$$\downarrow$$

$$0 = Q_{12} - W_{12}$$

$$W_{12} = Q_{12} \quad \leftarrow \text{geg. } Q_{12} = 40\,kJ$$

Aus ZF

- für Polytrope, $n = 1$: $$\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n=1} = p_1 v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 v_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV \underset{\substack{\uparrow \\ n=1\text{, isotherm}}}{=} P_1 V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = Q_{12}$$

lösen nach V_2

$$\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \frac{Q_{12}}{P_1 V_1}$$

$$\ln V_2 - \ln V_1 = \frac{Q_{12}}{P_1 V_1}$$

$$\ln V_2 = \frac{Q_{12}}{P_1 V_1} + \ln V_1$$

$$V_2 = e^{[\ldots]}\,m^3 = \underline{\underline{0{,}3045\,m^3}} \checkmark_{ML}$$

d) Bestimmen Sie die ausgetauschten Arbeiten W_i und Wärmen Q_i während der 4 Zustandsänderungen.

W_i : jede Prozess für sowas eig. immer E-Bilanzgleichung

1–2 : isotherme Expansion.

$$\cancel{\Delta U}^{\,0} = Q_{12} - W_{12}$$

$$\underline{\underline{Q_{12} = W_{12} = 40\,kJ}}$$

2–3 : isentrope Exp.

↓

Adiabat, rev.

$$\Delta U = \cancel{Q_{23}}^{\,0} - W_{23} \qquad Q_{23} = \underline{\underline{0\,kJ}}$$

$$W_{23} = -\Delta U = -(U_3 - U_2) = U_2 - U_3 = m \cdot (u_2 - u_3)$$

IG $u(T)$, um u zu bekommen. $T = ?$

aus b) $T_1 = T_2 = T_{max} = 585{,}4\,K$ … u_2

$T_3 = T_4 = T_{min} = 234{,}16\,K$ … u_3

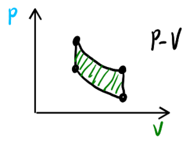
recall Lösungs für IG Vorgehen aus Ansätze Notizen 3. Übung

c_v, c_p = const, geg. ? | ✓ ⇒ PG ⇒ | $\Delta u = c_v \cdot \Delta T$
$\Delta h = c_p \cdot \Delta T$

X → TAB $u^{ig}(T)$? | ✓ ⇒ TAB ablesen

X ⇒ IG → PG approxi. TAB A-20 ideal Gas Specific Heats …
① get T, ② read c_v, c_p ③ plug in PG get u, h

isotherm. isobar, iso… -änderungs Prozess →



P-V Diagram
Kreis-Prozess

TAB A22 nutzen.

TABLE A-22

Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u(kJ/kg), $s°$ (kJ/kg · K)

				when $\Delta s = 0$[1]						when $\Delta s = 0$	
T	h	u	$s°$	p_r	v_r	T	h	u	$s°$	p_r	v_r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6

lerp. $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + y_1$

	$T\,[K]$	$u\,[\frac{kJ}{kg}]$	
x_1	230	164	y_1
lerp. → x	234,16	167	← y
x_2	240	171,13	y_2
x_1	580	419,55	y_1
→ x	585,4	423,7	← y
x_2	590	427,15	y_2

$u_3 = 167 \frac{kJ}{kg}$

$u_2 = 423,7 \frac{kJ}{kg}$

$W_{23} = m \cdot (u_2 - u_3) = \underline{\underline{256,7\ kJ}}$ ✓ ML.

---

3 – 4 : isotherme Kompression

$\Downarrow$

$\Delta U = 0 \qquad 0 = Q_{34} - W_{34}$

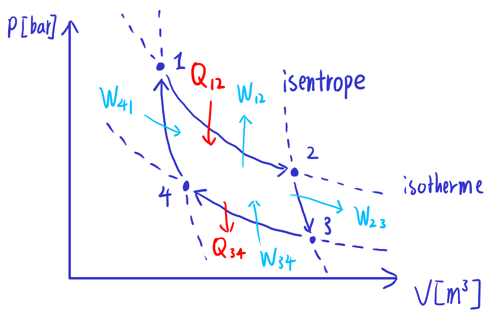
$W_{34} = Q_{34}$ Wir kennen weder Q noch W

Stuck ? Blind approach. Abhängigkeiten suchen.

neue Wissen fordert.

Carnot Prozess. $\eta_{th} = \eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$

$\Rightarrow \frac{|Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = \frac{T_{ab}}{T_{zu}} = \frac{T_{min}}{T_{max}}$



$\Rightarrow Q_{zu} = Q_{12}$

$Q_{ab} = Q_{34}$

$T_{min} = 234,16\ K \qquad T_{max} = 585,4\ K \qquad Q_{12} = 40\ kJ$

$$|Q_{34}| = 40\,kJ \cdot \frac{234,16}{585,4} = 16\ kJ$$

Q_{34} ist Wärmeabgabe $\Rightarrow$ $Q_{34} = \underline{\underline{-16\,kJ}}$

$W_{34} = \underline{\underline{-16\,kJ}}$ √ML.

---

4 - 1 isentrope Kompression.

$\Downarrow$

$\underline{\underline{Q_{41} = 0}}$

$\Delta U = -W_{41}$

$m(u_4 - u_1) = W_{41}$

$u_4(T_4) = u_3(T_3) = 167\,\frac{kJ}{kg}$ aus Vorher

$u_1(T_1) = u_2(T_2) = 423,7\,\frac{kJ}{kg}$

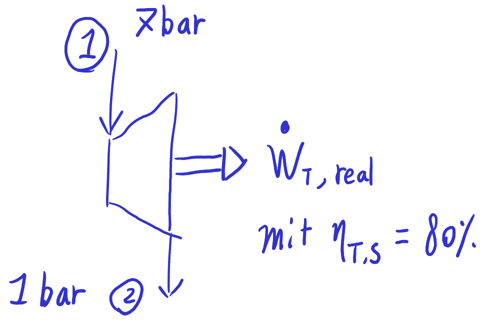
eigesetzt $W_{41} = \underline{\underline{-256,7\ kJ}}$ √ML.

Sanity check.: negative Arbeit. entspricht Kompression.

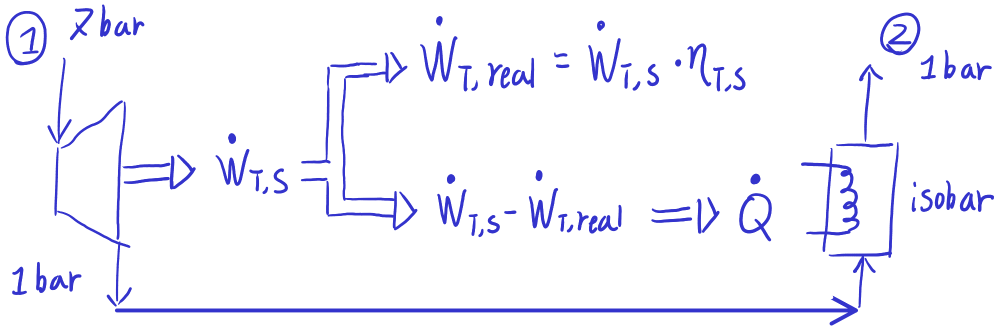
Appendix

Aus ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine) $\quad \eta_{T,s} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12}^{rev}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$



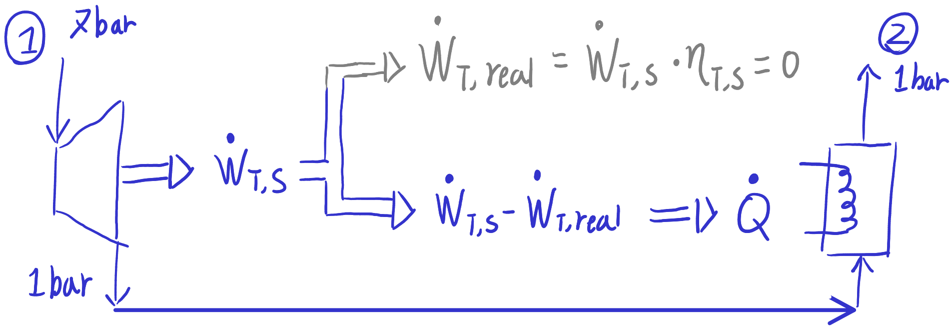
Vgl.



$W_{T,s}$: insentrope Arbeit ⇒ Adiabat, Entropie Erzeugung = 0

Entropie bleibt erhaltend $\Delta S = 0$

Was passiert wenn $\eta_{T,s} = 0\%$?

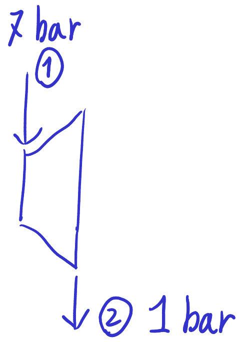


$$\underbrace{\cancel{\frac{dE}{dt}}}_{0} = \dot m (h_e - h_a) + \underbrace{\cancel{\dot Q}}_{0} - \underbrace{\cancel{\dot W}}_{0}$$, $\eta = 0$ Keine Arbeit Output

Stationär

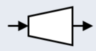
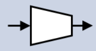
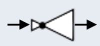
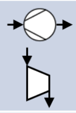
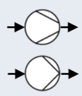
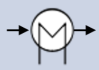
für Turbine, generell Adiabat

Appendix



Drossel
um Druck zu Veringern

Man Kann Turbine mit
isentrope Wirkungsgrad $\eta_{T,s} = 0$ mit einem Drossel zu vergleichen

Bauteil	Annahme	1. HS stationärer Fliessprozess (SFP)	Bemerkung	Symbol
Allgemein (SFP)	$\dot{m}_e = \dot{m}_a = \dot{m}$, $\frac{dE}{dt} = 0$ (gilt für alle unten)	$0 = \dot{Q} - \dot{W}_t + \dot{m}\left(h_e - h_a + \frac{w_e^2}{2} - + \frac{w_a^2}{2} + gz_e - gz_a\right)$		
Diffusor	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiabat $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\left(h_e + \frac{w_e^2}{2}\right) = \left(h_a + \frac{w_a^2}{2}\right)$	$w_a < w_e$ $p_a > p_e$	
Düse	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiabat $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\left(h_e + \frac{w_e^2}{2}\right) = \left(h_a + \frac{w_a^2}{2}\right)$	$w_a > w_e$ $p_a < p_e$	
Drossel	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiabat $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$h_e = h_a$	„isenthalper Prozess“	
Turbine	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiabat	$\dot{W}_t = \dot{m}(h_e - h_a)$		
Verdichter/ Pumpe	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz	$\dot{W}_t - \dot{Q} = \dot{m}_e(h_e - h_a)$	Oft auch adiabat zur Umgebung	
Wärme-tauscher (Wärme-übertrager)	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE = 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_S(h_{e,L} - h_{a,L})$ $\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_W(h_{a,W} - h_{e,W})$	Hier: 2 Ströme Luft (L) und Wasser (W) mit Wärmeübergang von L auf W. Kein Wärmeübergang mit Umgebung	

Indices: e einströmende Masse
a ausströmende Masse

Lösungsansatz(Inspiration): Isentroper Wirkungsgrad Problem

zB. isentrope Wirkungsgrad $\eta_{T,s}$ geg.

T_1 geg., und Druck Änderung geg. $P_1 \to P_2$, IG, ges. Arbeit

Aus ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter) $\eta_{V,s} = \frac{w_{t,12}^{rev}}{w_{t,12}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\boxed{\eta_{V,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}}$ 4

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine) $\eta_{T,s} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12}^{rev}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\boxed{\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}}$

Zustandsänderungen

Polytrope	$pV^n = \text{const.}$ (n: Polytropenexponent)	3
Isobare	$p = \text{const.}$ $(n \equiv 0)$	
Isotherme	$T = \text{const.}$	
Isochore	$v = \text{const.}$ $(n \to \infty)$	
Isenthalpe	$h = \text{const.}$	
Isentrope	$s = \text{const.}$	

Zustandsänderungen idealer Gase

Isotherme	$n = 1$	
Isentrope	$n = \kappa = \frac{c_p^{ig}}{c_v^{ig}}$	3
Polytropes Temperaturverhältnis	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$	

Ideales Gas $(pV = n\overline{R}T \quad pv = RT \quad pV = mRT)$

$\overline{R} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$ 1 $\boxed{R = c_p^{ig} - c_v^{ig} = \frac{\overline{R}}{M}}$

$c_v^{ig}(T) = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$

$c_p^{ig}(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$

2 $\boxed{\kappa = \frac{c_p^{ig}}{c_v^{ig}}}$

$u^{ig}(T_2) - u^{ig}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v^{ig}(T)\,dT$

$h^{ig}(T_2) - h^{ig}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{ig}(T)\,dT$

$s^{ig}(T_2, p_2) - s^{ig}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{ig}(T)}{T}\,dT - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

$s^{ig}(T_2, p_2) - s^{ig}(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

Durch Beziehung 1 get C_p, C_v mit R

2 get $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$

↑ isentrope Exponente

3 mit Druckverhältnis P_1, P_2, oder Volumenverhältnis Setzen $n = \kappa$ get Temp. Verhältnis.

T_1 muss noch bekannt sein

⇓

$T_{2,s}$ wurde durch isentrope ZÄ bestimmt.

Es ist unter der Annahme, Verlauf isentrope ist, deswegen $T_{2,s}$ markiert als "Temp. Unter Ideal Fall"

4 Mit $T_{2,s}$, durch TAB oder $h_1 - h_{2s} = C_p(T_1 - T_{2,s})$ um $h_{2,s}(T_{2,s})$ zu erhalten.

Setzen $\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$ ein um h_2 zu bekomen

↑ reale Enthalpie beim Ausgang

Setzen dann h_2 in Bilanzgleichung um ges. Größe zu berechnen.
(Temp. Arbeit ... jenach dem)

Falls Arbeitsmedium kein IG, sondern Wasser, Dampf ... (Realstoff)

Dann TAB, Key $\Delta S = 0$ Suchen $S_{2s} = S_1$ ← Eingang

für Ausgangbedinung zB. P_2, V_2 ....

zB.

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
		p = 5.0 bar = 0.50 MPa (T_{sat} = 151.86°C)		
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592
240	0.4646	2707.6	$\boxed{2939.9}$	$\boxed{7.2307}$ ← $S_{2s} = S_1$
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308

Tabilierte h mit $S_{2s} = S_1$ ist $h_{2,s}$

dann Analog wie Vorher:

Setzen $\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$ ein um h_2 zu bekomen

reale Enthalpie beim Ausgang

Key Take Away:

$$\boxed{\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}}$$

$S_1 = S_{2,s}$ gekoppelte Entropie ist gleich

Es kam bei meiner Prüfung an mit IG, ich habe es verkackt, es ist eigentlich nicht schwer zu lösen. Deswege möchte ich gerne, dass ihr alle solche Probleme auch bei der Prüfung lösen könnt, falls es kommt.

Tech. Arbeit Bsp. an Wasser Turbine

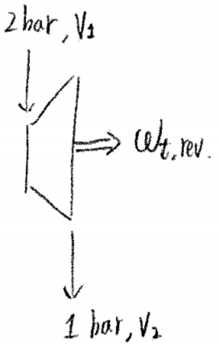
Spezifische technische Arbeit (reversibler stationärer Fliessprozess)

$$w_{t,12}^{rev} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{rev}}{\dot{m}} = -\left(\int_1^2 v\,dp + \Delta ke + \Delta pe\right)$$

- für Polytrope, $n = 1$: $\left(\int_1^2 v\,dp\right)_{n=1} = -\left(\int_1^2 p\,dv\right)_{n=1}$
- für Polytrope, $n \neq 1$: $\left(\int_1^2 v\,dp\right)_{n\neq 1} = -n\left(\int_1^2 p\,dv\right)_{n\neq 1}$

▶ Turbine (Wasser Turbine als Bsp.)

Annahme. → Ideale Flüssigkeit inkompressibe. $V(T) \Rightarrow V = const$.



$$\underbrace{\cancel{\frac{dE}{dt}}}_{0,\ \text{stationäre}} = \dot{m}\left(h_e - h_a + \cancel{\Delta KE}_{0} + \cancel{\Delta PE}_{0}\right) + \underbrace{\cancel{\dot{Q}}}_{0,\ \text{Adiabat}} - \dot{W}_{t,n}$$

Annahme um zu Vereinfachen

$V_1 = V_2$ — $V = const$, unsere Annahme.

Aus ZF für Tech. Arbeit: Polytrope $n \neq 1$

$$\left(\int_1^2 v\,dp\right)_{n\neq 1} \stackrel{!}{=} V\int_1^2 dp$$

NICHT Volumenarbeit !

$$= V\int_{P_1}^{P_2} dp = V\left[P_2 - P_1\right]$$

P_2: 1 bar, P_1: 2 bar

$P_2 < P_1$

$\Rightarrow$ negativ $\ominus$

Aus ZF:

$$w_{t,12}^{rev} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{rev}}{\dot{m}} = -\left(\int_1^2 v\,dp + \cancel{\Delta ke}_{0} + \cancel{\Delta pe}_{0}\right) = \ominus \cdot (\ominus) = \oplus$$

Vorzeichen achten !

ergibt sich Positive Arbeit.

$\Rightarrow$ Turbine leistet Arbeit und gibt sie aus.

gilt auch für Gase.

hier nur zu Demo. Wasser genommen.

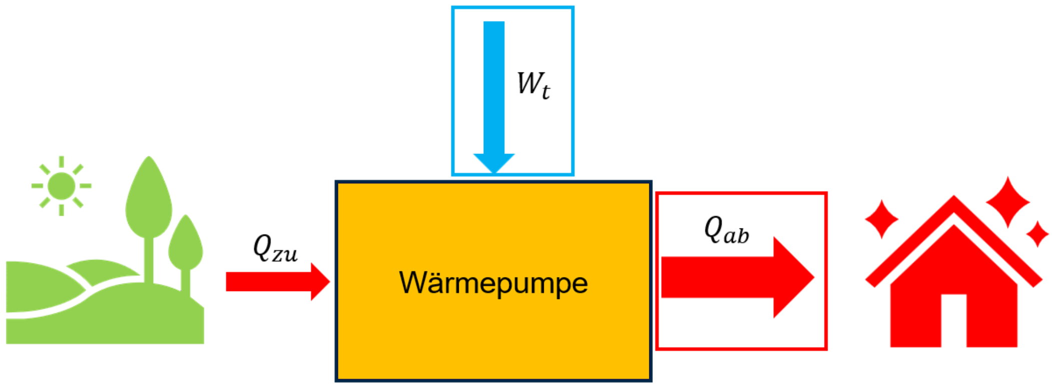
$$0 = \underbrace{\dot{m}(h_e - h_a)}_{\stackrel{!}{=}\oplus} - \oplus \Rightarrow h_e - h_a > 0$$

$h_e > h_a$ Sanity checked !

Appendix

Leistungszahl (Wärmepumpe)

$$\varepsilon_\mathrm{W} = \frac{\boxed{|\dot{Q}_\mathrm{ab}|}}{\boxed{|\dot{W}_\mathrm{t}|}} = \frac{|\dot{Q}_\mathrm{ab}|}{|\dot{Q}_\mathrm{ab}| - |\dot{Q}_\mathrm{zu}|}$$



Leistungszahl (Kältemaschine)

$$\varepsilon_\mathrm{K} = \frac{\boxed{|\dot{Q}_\mathrm{zu}|}}{\boxed{|\dot{W}_\mathrm{t}|}} = \frac{|\dot{Q}_\mathrm{zu}|}{|\dot{Q}_\mathrm{ab}| - |\dot{Q}_\mathrm{zu}|}$$