Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Thermodynamik I – Lösung Rechenübung 7

Aufgabe 1

a) irreversibel, da der Stab irreversibel arbeitet.

b)

$$S_{erz,WM} = S_{erz,Stab} + \underbrace{S_{erz,Carnot}}_{=0} \qquad S_{erz} = S_{erz,Stab} = \underbrace{S_2 - S_1}_{=0} - \sum_{j=1}^{n} \frac{Q_j}{T_j}$$

Da keine Zustandsänderung im Stab stattfindet: $S_2 - S_1 = 0$

$$S_{erz,Stab} = -\frac{Q_C}{T_H} - \frac{(-Q_C)}{T_L} = Q_C\left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right) = C\left(T_H - T_L\right)\left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right)$$

c) $\eta_{therm} = \frac{|W_{Nutz}|}{\sum Q_{zu}}$, hier:

$$\begin{aligned} W_{WM} &= \sum Q_{zu} \cdot \eta_{Carnot} = [Q_H - Q_C]\left(1 - \tfrac{T_L}{T_H}\right) \\ &= [Q_H - C\left(T_H - T_L\right)]\left(1 - \tfrac{T_L}{T_H}\right) \\ &= Q_H - C\left(T_H - T_L\right) - Q_H \tfrac{T_L}{T_H} + C T_L - C\tfrac{T_L^2}{T_H} \end{aligned}$$

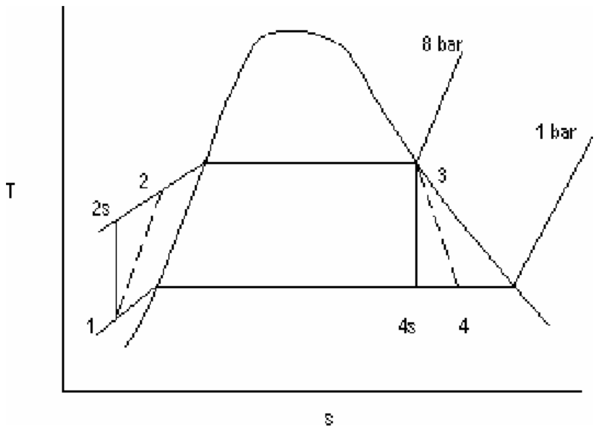
Maximale Arbeitsabgabe: $\frac{dW_{WM}}{dT_H} = 0$ und $\frac{d^2W}{d{T_H}^2} < 0$

$$\frac{dW_{WM}}{dT_H} = -C - \frac{Q_H T_L \cdot (-1)}{T_H^2} - C\frac{T_L^2 \cdot (-1)}{T_H^2} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \quad \underline{\underline{T_H = \sqrt{\frac{Q_H T_L}{C} + T_L^2}}}$$

Aufgabe 2

Annahme: Kinetische und potentielle Energieänderung wird nicht berücksichtigt.

a)



b) Für die adiabate <u>Pumpe</u>:

$$\underbrace{\dot{Q}}_{=0} - P_p = \dot{m}\,(h_2 - h_1)$$

und mit dem gegebenen isentropen Pumpen-Wirkungsgrad:

$$-\frac{P_p}{\dot{m}} = h_2 - h_1 = \frac{h_{2,s} - h_1}{\eta_{p,s}}$$

Für eine isentrope Pumpe gilt:

$$h_{2,s} - h_1 = \int dh = \int (T\,ds + v\,dp) = T\,\underbrace{\Delta s}_{=0} + v\Delta p$$

Mit den Daten aus Tabelle A-2 kann bestimmt werden:

$$h_1 = h_f(T_1) = 125.79\,kJ/kg \text{ und } v_1 = v_f(T_1) = 1.0043 \cdot 10^{-3}\,m^3/kg$$

Wasser kann in diesem Fall als annähernd inkompressibel angesehen werden:

$$h_{2,s} - h_1 = v\Delta p \approx v_1\,(p_2 - p_1) = 1.0043 \cdot 10^{-3}\,m^3/kg\; 7 \cdot 10^5\,N/m^2 = 0.7\,kJ/kg$$

$$\frac{P_p}{\dot{m}} = \frac{-0.7}{\eta_p}\,kJ/kg = \frac{-0.7}{0.7}\,kJ/kg = \underline{\underline{-1\,kJ/kg}}$$

c) Die Energiebilanz für die Turbine ist:

$$\frac{P_t}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

oder mit dem isentropen Turbinenwirkungsgrad:

$$\frac{P_t}{\dot{m}} = \eta_t(h_3 - h_{4s})$$

aus Tabelle A-3: $s_3 = s_{4s} = 6.6628\,kJ/kg\,K$ sowie h_3. Der Dampfgehalt bei 4s beträgt: $x_{4s} = 0.885$, daraus ergibt sich: $h_{4s} = 2415.8\,kJ/kg$.

$$\frac{P_t}{\dot{m}} = 0.9 \cdot (2769.1 - 2415.8)\,kJ/kg = 318.0\,kJ/kg$$

davon wird 1 kJ/kg von der Pumpe benötigt, übrig bleibt:

$$\underline{\underline{\frac{P_{net}}{\dot{m}} = 317\,kJ/kg}}$$

d) Aus der Energieerhaltung folgt

$$h_2 = \left(-\frac{P_p}{\dot{m}}\right) + h_1 = 126.79\,kJ/kg$$

Für den <u>Boiler</u> ergibt die Energieerhaltung:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 = 2769.1 - 126.79 = \underline{\underline{2642.3\,kJ/kg}}$$

Aufgabe 3

Aus Tabelle A-8:

$p_1 = 120\,kPa$	$h_1 = h_g$	bei $120\,kPa = 176.14\,kJ/kg$
gesättigter Dampf	$s_1 = s_g$	bei $120\,kPa = 0.7133\,kJ/kg\,K$
	$v_1 = v_g$	bei $120\,kPa = 0.1349\,m^3/kg$

Aus Tabelle A-9:

$p_2 = 1\,MPa$ $\quad h_{2s} = 213.833\,kJ/kg$

$s_{2s} = s_1$

a) Isentroper Wirkungsgrad: $\eta_{V,s} = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1}$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{V,s}} = 223.26\,kJ/kg \qquad \dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_1} = \frac{0.8/60}{0.1349} = 0.0988\,kg/s$$

1. HS:

$$\underbrace{\dot{Q}}_{=0} - \dot{W} = \dot{m} \cdot \left(h_2 - h_1 - \underbrace{\Delta pe}_{=0} - \underbrace{\Delta ke}_{=0} \right)$$
$$\dot{W} = -\dot{m}\,(h_2 - h_1) = -4.66\,kW$$

b) 1. HS: $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \cdot \left(h_2 - h_1 - \underbrace{\Delta pe}_{=0} - \underbrace{\Delta ke}_{=0} \right)$

Entropiebilanz: $\sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{m}\,(s_1 - s_2) + \dot{S}_{erz} = 0$

Reversibel: $\dot{S}_{erz} = 0 \Rightarrow \dot{Q}_i = -T_i \cdot \dot{m} \cdot (s_1 - s_2)$

Mit Tabelle A9: $s_2 \; = ?$ bei $p \; = \; 1\,MPa$, $h_2 = 223.26\,kJ/kg\,,\; s_2 = 0.7413\,kJ/kg\,K$

$$\begin{aligned}\dot{W} &= -T_0 \cdot \dot{m}\,(s_1 - s_2) + \dot{m}\,(h_1 - h_2) = \dot{m}\,[h_1 - h_2 - T_0\,(s_1 - s_2)] \\ &= 0.0988\,kg/s\,[(176.14 - 223.26)\;kJ/kg - (298\,K)\,(0.7133 - 0.7413)\;kJ/kg\,K] \\ &= -3.83\,kW\end{aligned}$$

c) Nein, nur ein isentroper und isolierter Kompressor ist reversibel:

$$\dot{S}_{erz} = \dot{m}\,(s_2 - s_1) - \sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} = 0$$

Aufgabe 4

Annahme: Der Kühlraum und die Umgebung spielen die Rolle von kaltem und heissem Reservoir. Aus der Gleichung für die Leistungsziffer ϵ erhält man:

$$P_{KL} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\epsilon} = \frac{8000\,kJ/h}{2.5} = \underline{\underline{3200\,kJ/h}}$$

Die Leistungsziffer für einen reversiblen Kreislauf zwischen Reservoirs der Temperaturen $T_H = 293\,K$ und $T_K = 273\,K$ ist:

$$\epsilon_{max} = \frac{273}{293 - 273} = 13.65$$

Die benötige Arbeitsleistung ist dann: $P_{min} \; = \; \frac{8000\,kJ/h}{13.65} \; = \; 586.1\,kJ/h$ Die reale benötigte Arbeit ist fast 5 Mal grösser als die theoretische minimale Arbeit.

Kommentar: Da die Werte für $\dot{Q}_{ein}$ in beiden Fällen gleich sind, muss für das reale System aufgrund der grösseren zugeführten Leistung auch die Abwärmemenge an die Umgebung grösser sein: $(\dot{Q}_{aus})_{real} = 11200\,kJ/h$ zu $(\dot{Q}_{aus})_{reversibel} = 8586.1\,kJ/h$