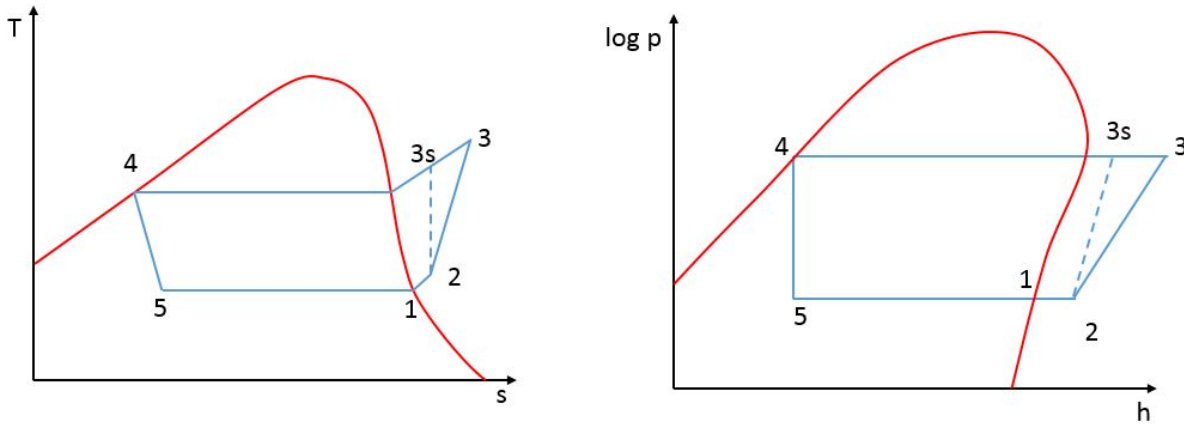


Musterlösung Aufg. 1: «Zweistufige Kältemaschine»

Teilaufgabe a)



Teilaufgabe b)

$$t_{Verd.} = t_{Eis} - 10\text{K} = -10\text{C}$$

$$p_{Verd.} = p_5 = p_1 = p_2 = p_s(-10\text{C}) = 0,44823\text{MPa}$$

$$t_{Kond.} = t_a + 10\text{K} = 30\text{C}$$

$$p_{Kond.} = p_3 = p_4 = p_s(30\text{C}) = 1,4340\text{MPa}$$

Teilaufgabe c)

$$\dot{Q}_{51} = -\dot{Q}_{Eis}$$

$$-\dot{Q}_{Eis} = \dot{m}_{Eis} \cdot [c_{p,Wasser} \cdot \Delta T - \Delta h_S]$$

$$\dot{m}_{Eis} = \frac{120\text{kg}}{24\text{h}} = 1,3889\frac{\text{g}}{\text{s}}$$

$$-\dot{Q}_{Eis} = 1,3889\frac{\text{g}}{\text{s}} \cdot [4,2\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (-10\text{K}) - 333\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}] = -0,5208\text{kW}$$

$$\dot{Q}_{51} = -\dot{Q}_{Eis} = 0,5208\text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{51} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_5)$$

mit:

$$h_1 = h''(0,44823\text{MPa}) = 382,54\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_5 = h_4 = h'(1,4340\text{MPa}) = 247,56\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{KM} = \frac{\dot{Q}_{51}}{(h_1 - h_5)} = 3,8586 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Teilaufgabe d)

$$\dot{Q}_{12} = P_{el.} \cdot 30\% = 300\text{W} \cdot 30\% = 90\text{W}$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$h_2 = \frac{\dot{Q}_{12}}{(\dot{m}_{KM})} + h_1 = \frac{90\text{W}}{3,8586 \frac{\text{g}}{\text{s}}} + 382,54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 405,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = \left[\frac{(405,86 - 402,94)}{(407,99 - 402,94)} \cdot (15 - 10) + 10 \right] \text{C} = 12,896\text{C}$$

Teilaufgabe e)

$$s_2 = s_{3s} = \left[\frac{(405,86 - 402,94)}{(407,99 - 402,94)} \cdot (1,7878 - 1,7701) + 1,7701 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 1,7806 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$h_{3s} = \left[\frac{(1,7806 - 1,7497)}{(1,7872 - 1,7497)} \cdot (438,80 - 426,52) + 426,52 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 436,56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = \frac{(h_{3s} - h_2)}{\eta_{s,v}} + h_2 = \left[\frac{(436,56 - 405,86)}{0,75} + 405,86 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 446,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 < h(70\text{C}; 1,4340\text{MPa}) = 450,82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \text{nein, } 70\text{C wird nicht erreicht}$$

Teilaufgabe f)

$$P_{23} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_3 - h_2) = 3,8586 \frac{\text{g}}{\text{s}} \cdot (446,79 - 405,86) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,1579\text{kW}$$

$$P_{sons.} = [0,3 - 0,09 - 0,1579]\text{kW} = 0,052\text{kW}$$

Teilaufgabe g)

$$\epsilon_{KM} = \frac{\dot{Q}_{51}}{P_{23}} = \frac{0,5208\text{kW}}{0,1579\text{kW}} = 3,298$$

$$\epsilon_{Eis} = \frac{\dot{Q}_{51}}{P_{el.}} = \frac{0,5208\text{kW}}{0,3\text{kW}} = 1,736$$

Teilaufgabe h)

Steigerung der Eisproduktion

Oder

Unterkühlung des Eises

Musterlösung Aufgabe 2: «Feuchte Luft»

Teilaufgabe a) \Rightarrow 2 Punkte

Massenstrom trockene Luft aus der Umgebung:

$$\dot{m}_{tr,L,U} = \dot{m}_{tr,L,V} \Rightarrow \dot{m}_{tr,L,Z} = \dot{m}_{tr,L,Azu} + \dot{m}_{tr,L,V}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{tr,L,U} = \dot{m}_{tr,L,Z} - \dot{m}_{tr,L,Azu} = \dot{m}_{tr,L,A} - 0,3\dot{m}_{tr,L,A} = 0,7 \cdot 0,5 \frac{kg}{s} = 0,35 \frac{kg}{s}$$

Teilaufgabe b) \Rightarrow 2 Punkte

$$\dot{Q}_{zu} = n \cdot (\dot{Q}_P + \dot{Q}_L) = 50 \cdot (35W + 50W) = 4250W = 4,25kW$$

$$\dot{m}_{WD} = n \cdot \dot{m}_{WD,P} = 50 \cdot 2 \frac{g}{min} = 100 \frac{g}{min} = 0,00167 \frac{kg}{s}$$

Teilaufgabe c) \Rightarrow 4 Punkte

Wassergehalt:

$$x = 0,6222 \cdot \frac{p_D}{p_{ges} - p_D} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{D,s}}{p_{ges} - \varphi \cdot p_{D,s}}; \text{ mit } \varphi = \frac{p_D}{p_{D,s}}$$

Dampfdruckkurve Wasser:

$$\ln(p_{D,s}/mbar) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t/^\circ C + 234,4623)}$$

Zustand A:

$$\ln(p_{D,s,A}/mbar) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_A/^\circ C + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(22 + 234,4623)} = 3,2751$$

$$\Rightarrow p_{D,s,A} = e^{3,2751} mbar = 26,445 mbar$$

$$x_A = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,A}}{p_{ges} - p_{D,A}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_{A \cdot D,s,A}}{p_{ges} - \varphi_{A \cdot D,s,A}} = 0,6222 \cdot \frac{0,7 \cdot 26,445 mbar}{1013,25 mbar - 0,7 \cdot 26,445 mbar} = 11,58 (g/kg)$$

Zustand U:

$$\ln(p_{D,s,U}/mbar) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_U/^\circ C + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(5 + 234,4623)} = 2,1648$$

$$\Rightarrow p_{D,s,U} = e^{2,1648} mbar = 8,713 mbar$$

$$x_U = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,U}}{p_{ges} - p_{D,U}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_U \cdot p_{D,s,U}}{p_{ges} - \varphi_U \cdot p_{D,s,U}} = 0,6222 \cdot \frac{0,9 \cdot 8,713 \text{ mbar}}{1013,25 \text{ mbar} - 0,9 \cdot 8,713 \text{ mbar}} = 4,85 \text{ (g/kg)}$$

Teilaufgabe d) \Rightarrow 5 Punkte

$$h_{1+x,A} = c_{p,L} \cdot t_A + x_A \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_A) = (1,007 \cdot 22 + 0,01158 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 22)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 51,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Enthalpiestrom des Wasserdampfes:

$$\Delta \dot{H}_{WD} = \Delta \dot{H}_{WD,p} \cdot n = 85 \text{ W} \cdot 50 = 4250 \text{ W} = 4,25 \text{ kW}$$

Enthalpiebilanz des Seminarraums:

$$\begin{aligned} \dot{H}_Z + \Delta \dot{H}_{WD} + \dot{Q}_{zu} &= \dot{H}_A \Rightarrow h_{1+x,Z} \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} + \dot{Q}_{zu} + \Delta \dot{H}_{WD} = h_{1+x,A} \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} \\ \Rightarrow h_{1+x,Z} &= \frac{h_{1+x,A} \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} - \dot{Q}_{zu} - \Delta \dot{H}_{WD}}{\dot{m}_{tr,L,Z}} = \frac{51,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 4,25 \text{ kW} - 4,25 \text{ kW}}{0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 34,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Massenerhaltung Wasser im Seminarraum:

$$\begin{aligned} x_A \cdot \dot{m}_{tr,L,A} &= x_Z \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} + \dot{m}_{WD} \\ \Rightarrow x_Z &= \frac{x_A \cdot \dot{m}_{tr,L,A} - \dot{m}_{WD}}{\dot{m}_{tr,L,Z}} = \frac{0,01158 \cdot 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0,00167 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 8,24 \text{ (g/kg)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{1+x,Z} &= c_{p,L} \cdot t_Z + x_Z \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_Z) \\ \Rightarrow t_Z &= \frac{h_{1+x,Z} - x_Z \cdot \Delta h_v}{c_{p,L} + x_Z \cdot c_{p,D}} = \frac{34,57 - 0,00824 \cdot 2500}{1,007 + 0,00824 \cdot 1,86} \text{ °C} = 13,64 \text{ °C} \end{aligned}$$

Teilaufgabe e) \Rightarrow 4 Punkte

Massenerhaltung Wasser in der Mischkammer:

$$x_Z \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} = x_A \cdot \dot{m}_{tr,L,Azu} + x_V \cdot \dot{m}_{tr,L,V};$$

$$\text{mit } \dot{m}_{tr,L,V} = \dot{m}_{tr,L,U}$$

$$\Rightarrow x_V = \frac{x_Z \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} - x_A \cdot 0,3 \cdot \dot{m}_{tr,L,A}}{\dot{m}_{tr,L,V}} = \frac{0,00824 \cdot 0,5 \frac{kg}{s} - 0,01158 \cdot 0,3 \cdot 0,5 \frac{kg}{s}}{0,35 \frac{kg}{s}} = 6,81(g/kg)$$

Enthalpiebilanz der Mischkammer:

$$\dot{m}_{tr,L,Z} \cdot h_{1+x,Z} = \dot{m}_{tr,L,Azu} \cdot h_{1+x,A} + \dot{m}_{tr,L,V} \cdot h_{1+x,V}$$

$$\Rightarrow h_{1+x,V} = \frac{h_{1+x,Z} \cdot \dot{m}_{tr,L,Z} - \dot{m}_{tr,L,Azu} \cdot h_{1+x,A}}{\dot{m}_{tr,L,V}} = \frac{34,57 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,5 \frac{kg}{s} - 51,57 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,3 \cdot 0,5 \frac{kg}{s}}{0,35 \frac{kg}{s}} = 27,28 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{1+x,V} = c_{p,L} \cdot t_V + x_V \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_V)$$

$$\Rightarrow t_V = \frac{h_{1+x,V} - x_V \cdot \Delta h_v}{c_{p,L} + x_V \cdot c_{p,D}} = \frac{27,28 - 0,00681 \cdot 2500}{1,007 + 0,00681 \cdot 1,86} \text{ } ^\circ\text{C} = 10,06^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe f) \Rightarrow 2 Punkte

Massenerhaltung Wasser im WÜ von U nach V:

$$x_V \cdot \dot{m}_{tr,L,V} = x_U \cdot \dot{m}_{tr,L,U} + \dot{m}_W$$

$$\Rightarrow \dot{m}_W = x_V \cdot \dot{m}_{tr,L,V} - x_U \cdot \dot{m}_{tr,L,U} = 0,35 \frac{kg}{s} \cdot 0,00681 - 0,35 \frac{kg}{s} \cdot 0,00485 = 0,000686 \frac{kg}{s} = 41,16 \frac{g}{min}$$

Teilaufgabe g) \Rightarrow 5 Punkte

$$h_{1+x,V} = 27,28 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{1+x,A} = 51,57 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{m}_W = 41,16 \frac{g}{min}$$

$$h_{1+x,U} = c_{p,L} \cdot t_U + x_U \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_U) = (1,007 \cdot 5 + 0,00485 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 5)) \frac{kJ}{kg} = 17,21 \frac{kJ}{kg}$$

Enthalpiestrom des zugeführten flüssigen Wassers bei 0C:

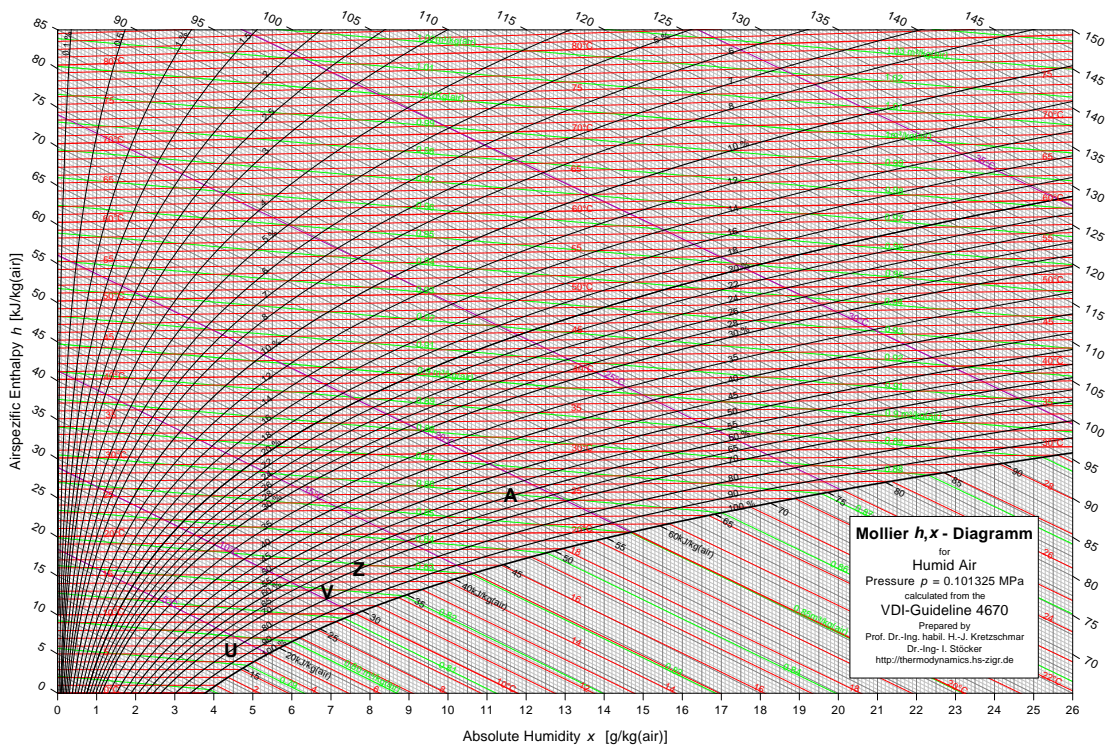
$$\dot{H}_W = \dot{m}_W \cdot c_{p,W} \cdot (0)K = 0,000686 \frac{kg}{s} \cdot 4,19 \frac{kJ}{kgK} \cdot 0K = 0kW$$

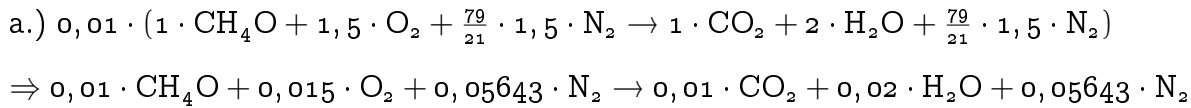
Enthalpiebilanz im WÜ von U nach V:

$$\dot{H}_U + \dot{Q}_W + \dot{H}_W = \dot{H}_V$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_W = \dot{H}_V - \dot{H}_U - \dot{H}_W = \dot{m}_{tr,L,U} \cdot (h_{1+x,V} - h_{1+x,U}) - 0 \text{ kW} = 0,35 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (27,28 - 17,21) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3,5245 \text{ kW}$$

Teilaufgabe h) \Rightarrow 4 Punkte





b.) $\Delta^R h_\theta = \sum \Delta^B h_{i,\theta} \cdot \nu_i = [-1 \cdot (0,01 \cdot (-238,57)) + 1 \cdot (0,01 \cdot (-393,5) + 0,02 \cdot (-286))] \text{kJ} = -7,2693 \text{ kJ}$

c.) ① Edukte rekombinieren bei Standardtemperatur zu Produkten.

② Produkte auf Reaktionstemperatur bringen. Phasenwechsel beachten.

③ Edukte auf Reaktionstemperatur bringen. Phasenwechsel beachten.

④ Edukte rekombinieren bei Reaktionstemperatur zu Produkten.

① $\Delta^R h_\theta = -7,2693 \text{ kJ}$ (aus b.)

② $\Delta h_{\text{Produkte}} = \sum \nu_i \cdot c_{p,\text{Produkte},i} \cdot \Delta T_i = [(1000 - 298,15) \cdot (0,01 \cdot 0,0433 + 0,05643 \cdot 0,031) + 0,02 \cdot ((372,75 - 298,15) \cdot 0,0755 + 40,668 + (1000 - 372,75) \cdot 0,0347)] \text{kJ} = 2,857 \text{ kJ}$

③ $\Delta h_{\text{Edukte}} = \sum |\nu_i| \cdot c_{p,\text{Edukte},i} \cdot \Delta T_i = [(1000 - 298,15) \cdot (0,05643 \cdot 0,0301 + 0,015 \cdot 0,0306) + 0,01 \cdot ((327,12 - 298,15) \cdot 0,0812 + 35,912 + (1000 - 327,12) \cdot 0,06)] \text{kJ} = 2,3006 \text{ kJ}$

④ $\Delta^R h_{T_r} = \Delta^R h_\theta + \Delta h_{\text{Produkte}} - \Delta h_{\text{Edukte}} = -6,7129 \text{ kJ}$

d.) $\Delta^R h_\theta = \sum \Delta^B h_{i,\theta} \cdot \nu_i = -11,9 \text{ kJ}$ (wie in a.)

e.) gleiche Vorgehensweise wie c.), Lachgas berücksichtigen

① $\Delta^R h_\theta = -11,9 \text{ kJ}$ (aus d.)

② $\Delta h_{\text{Produkte}} = \sum \nu_i \cdot c_{p,\text{Produkte},i} \cdot \Delta T_i = [(1000 - 298,15) \cdot (0,014 \cdot 0,0433 + 0,0605 \cdot 0,031) + 0,028 \cdot ((372,75 - 298,15) \cdot 0,0755 + 40,668 + (1000 - 372,75) \cdot 0,0347)] \text{kJ} = 3,6089 \text{ kJ}$

③ $\Delta h_{\text{Edukte}} = \sum |\nu_i| \cdot c_{p,\text{Edukte},i} \cdot \Delta T_i = [(1000 - 298,15) \cdot (0,0395 \cdot 0,0301 + 0,0105 \cdot 0,0306 + 0,021 \cdot 0,0465) + 0,014 \cdot ((327,12 - 298,15) \cdot 0,0812 + 35,912 + (1000 - 327,12) \cdot 0,06)] \text{kJ} = 2,8458 \text{ kJ}$

④ $\Delta^R h_{T_r} = \Delta^R h_\theta + \Delta h_{\text{Produkte}} - \Delta h_{\text{Edukte}} = -11,1369 \text{ kJ}$

f.) Lachgas hat ein günstigeres Verhältnis von N_2 zu O_2 , es kann also bei gleichem Hubvolumen mehr Brennstoff zugeführt werden. (Insgesamt liegt weniger inertes N_2 vor).

Die Bildungsenthalpie von Lachgas trägt zusätzlich zu einer Erhöhung von $\Delta^R h$ bei!

g.) Reines O_2 , da dadurch kein N_2 "mitgeschleppt" werden muss. Mit dieser Maßnahme könnte noch mehr Brennstoff verbrannt werden.

⇒ Der Motor würde sehr heiß werden (dadurch hohe Drücke usw.). Weiterhin müsste reiner Sauerstoff mitgeführt werden ⇒ gefährlich !