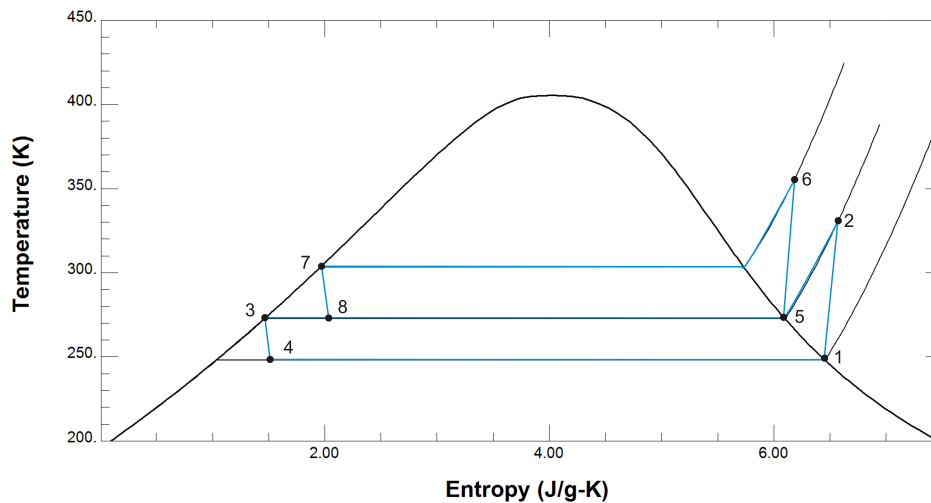


# Musterlösung Aufg. 1: «Zweistufige Kältemaschine»

## Teilaufgabe a)



## Teilaufgabe b)

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m}_{\text{ND}} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\text{aus Tabelle: } h_1 = 1573,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad ; \quad h_4 = h_3 = 340,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{41} = 0,16 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (1573,7 - 340,43) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 197,32 \text{ kW}$$

## Teilaufgabe c)

$$\dot{m}_{\text{HD}} = ? \quad ; \quad P_{\text{HD}} = ?$$

Enthalpiebilanz am Zwischenbehälter:

$$\dot{H}_2 + \dot{H}_8 = \dot{H}_3 + \dot{H}_5 \quad (\text{gleicher Bezugspunkt für alle Enthalpieströme!})$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{ND}} \cdot h_2 + \dot{m}_{\text{HD}} \cdot h_8 = \dot{m}_{\text{ND}} \cdot h_3 + \dot{m}_{\text{HD}} \cdot h_5$$

$$\text{aus Tabelle: } h_3 = 340,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad ; \quad h_8 = h_7 = 484,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad ; \quad h_5 = 1604,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = ? \quad \Rightarrow \quad P_{\text{ND}} = \dot{m}_{\text{ND}} \cdot (h_2 - h_1) \Leftrightarrow h_2 = \frac{P_{12}}{\dot{m}_{\text{ND}}} + h_1 = \frac{27,3 \text{ kW}}{0,16 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} + 1573,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1744,325 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{ND}} \cdot (h_2 - h_3) + \dot{m}_{\text{HD}} \cdot (h_8 - h_5) = 0 \Leftrightarrow \dot{m}_{\text{HD}} = \frac{\dot{m}_{\text{ND}} \cdot (h_3 - h_2)}{(h_8 - h_5)} = 0,2006 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{HD}} = ? \Rightarrow P_{\text{HD}} = \dot{m}_{\text{HD}} \cdot (h_6 - h_5)$$

$$s_5 = s_6^s = 6,1004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} ; h_6^s \text{ interpolieren}$$

$$h_6^s = \left( 1744,2 + \frac{(1757,4 - 1744,2)(6,1004 - 6,0916)}{(6,1296 - 6,0916)} \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1747,257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{s,V} = \frac{h_6^s - h_5}{h_6 - h_5} \Rightarrow h_6 = \frac{h_6^s - h_5}{\eta_{s,V}} + h_5 = 1782,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{\text{HD}} = 35,72 \text{ kW}$$

### Teilaufgabe d)

$$\epsilon_{\text{KM}} = \frac{\dot{Q}_{41}}{P_{\text{ND}} + P_{\text{HD}}} = \frac{197,32}{27,3 + 35,72} = 3,131$$

$$\eta_{ex} = \frac{|\Delta \dot{E}_{\dot{Q}_{41}}|}{P_{\text{ND}} + P_{\text{HD}}}$$

$$\Delta \dot{E}_{\dot{Q}_{41}} = \left( 1 - \frac{T_u}{T_{m,41}} \right) \cdot \dot{Q}_{41} \quad \text{mit } T_m = T_4 = T_4 = 248,08 \text{ K}$$

$$\Delta \dot{E}_{\dot{Q}_{41}} = \left( 1 - \frac{298,15 \text{ K}}{248,08 \text{ K}} \right) \cdot 197,32 \text{ kW} = -39,825 \text{ kW}$$

$$\eta_{ex} = 0,6319$$

Drossel ND:

$$\Delta \dot{E}_{V_{34}} = T_u \cdot \Delta \dot{S}_{irr} = T_u \cdot \dot{m}_{\text{ND}} \cdot (s_4 - s_3)$$

aus Tabelle:  $s_3 = 1,4617 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ ;  $s_4$  interpolieren

$$s_4 = \left( 1,0344 + \frac{(6,4554 - 1,0344) \cdot (340,43 - 228,87)}{(1573,7 - 228,87)} \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 1,4841 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta \dot{E}_{V_{34}} = 1,069 \text{ kW}$$

Drossel HD:

$$\Delta \dot{E}_{V_{78}} = T_u \cdot \Delta \dot{S}_{irr} = T_u \cdot \dot{m}_{\text{HD}} \cdot (s_8 - s_7)$$

aus Tabelle:  $s_7 = 1,9596 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ ;  $s_8$  interpolieren

$$s_8 = \left( 1,4617 + \frac{(6,1004 - 1,4617) \cdot (484,88 - 340,43)}{(1604,8 - 340,43)} \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 1,9917 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

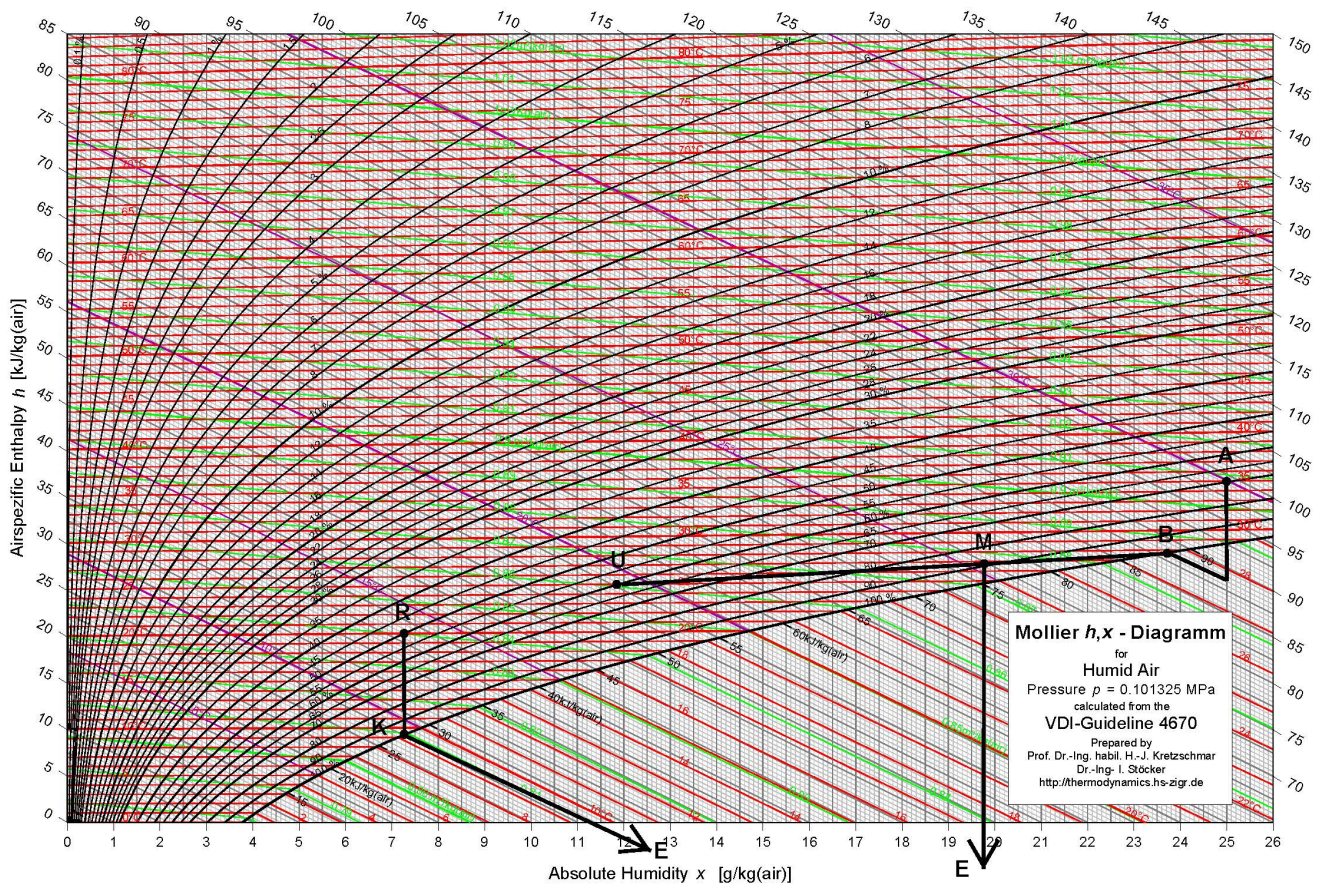
$$\Delta \dot{E}_{V_{78}} = 1,92 \text{ kW}$$

### Teilaufgabe e)

Bei linksläufigen Prozessen (z.B. bei Kältemaschinen oder Wärmepumpen) liegt das Arbeitsmedium beim verdichten in der Regel dampfförmig vor. Das spezifische Volumen ist groß. Bei rechtsläufigen Prozessen (z.B. Dampfkraftprozess) muss für die Druckerhöhung normalerweise ein flüssiges (nahezu inkompressibles) Arbeitsmedium bei kleinem spezifischen Volumen gepumpt werden. Damit ist nach  $w_t = \int v dp$  im linksläufigen Prozess die zuzuführende technische Arbeit größer.

# Musterlösung Aufgabe 2: «Feuchte Luft»

Teilaufgabe a) ⇒ 6 Punkte



Teilaufgabe b) ⇒ 1 Punkte

Massenstrom trockene Luft nach dem Mischen:

$$\dot{m}_{tr,L,M} = \dot{m}_{tr,L,A} = 3 \cdot \dot{m}_{tr,L,U} = 3 \cdot 0,3 \frac{kg}{s} = 0,9 \frac{kg}{s}$$

Teilaufgabe c) ⇒ 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:

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

Zustand R:

$$\ln(p_{D,s,R}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_R/^\circ\text{C} + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(20 + 234,4623)} = 3,1521$$

$$\Rightarrow p_{D,s,R} = e^{3,1521} \text{mbar} = 23,39 \text{mbar}$$

$$x_R = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,R}}{p_{ges} - p_{D,R}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_{R \cdot D,s,R}}{p_{ges} - \varphi_R \cdot p_{D,s,R}} = 0,6222 \cdot \frac{0,5 \cdot 23,39 \text{mbar}}{1013,25 \text{mbar} - 0,5 \cdot 23,39 \text{mbar}}$$

$$= 7,26 \text{ (g/kg)}$$

Zustand U:

$$\ln(p_{D,s,U}/\text{mbar}) = 18,9141 - \frac{4010,823}{(t_U/^\circ\text{C} + 234,4623)} = 18,9141 - \frac{4010,823}{(25 + 234,4623)} = 3,456$$

$$\Rightarrow p_{D,s,U} = e^{3,456} \text{mbar} = 31,69 \text{mbar}$$

$$x_U = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,U}}{p_{ges} - p_{D,U}} = 0,6222 \cdot \frac{\varphi_{U \cdot D,s,U}}{p_{ges} - \varphi_U \cdot p_{D,s,U}} = 0,6222 \cdot \frac{0,6 \cdot 31,69 \text{mbar}}{1013,25 \text{mbar} - 0,6 \cdot 31,69 \text{mbar}}$$

$$= 11,9 \text{ (g/kg)}$$

## Teilaufgabe d) $\Rightarrow$ 6 Punkte

Zustandsänderung von K nach R:

Zustand K ist gesättigt:  $\varphi_K = 1$  und nur Erwärmung zwischen K und R  $\Rightarrow x_K = x_R = 0,00726$

$$x_K = 0,6222 \cdot \frac{p_{D,s}}{p_{ges} - p_{D,s}}; \text{ mit } \varphi_K = 1$$

$$\Rightarrow p_{D,s} = \frac{x_K \cdot p_{ges}}{x_K + 0,6222} = \frac{0,00726 \cdot 1,01325 \text{ bar}}{0,00726 + 0,6222} = 11,69 \text{mbar}$$

Dampfdruckkurve umstellen:

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

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

$$\Rightarrow t_s = \left( \frac{4010,823}{18,9141 - \ln(11,69 \text{mbar}/\text{mbar})} - 234,4623 \right) ^\circ\text{C} = 9,28^\circ\text{C}$$

$$h_{1+x,K} = c_{p,L} \cdot t_K + x_K \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_K) = (1,007 \cdot 9,28 + 0,00726 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 9,28)) \frac{kJ}{kg} = 27,62 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{1+x,R} = c_{p,L} \cdot t_R + x_R \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_R) = (1,007 \cdot 20 + 0,00726 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 20)) \frac{kJ}{kg} = 38,48 \frac{kJ}{kg}$$

Wärmeleistung im inneren WÜ:

$$\dot{Q}_{zu,KR} = \dot{m}_{tr,L,M} \cdot (h_{1+x,R} - h_{1+x,K}) = 0,9 \frac{kg}{s} \cdot (38,48 - 27,62) \frac{kJ}{kg} = 9,77 kW$$

## Teilaufgabe e) $\Rightarrow$ 6 Punkte

Massenerhaltung Wasser:

$$x_M \cdot \dot{m}_{tr,L,M} = x_U \cdot \dot{m}_{tr,L,U} + x_B \cdot \dot{m}_{tr,L,Bzu};$$

$$\text{mit } \dot{m}_{tr,L,Bzu} = \dot{m}_{tr,L,M} - \dot{m}_{tr,L,U}$$

$$\Rightarrow x_M \cdot \dot{m}_{tr,L,M} = x_U \cdot \dot{m}_{tr,L,U} + x_B \cdot (\dot{m}_{tr,L,M} - \dot{m}_{tr,L,U})$$

$$\Rightarrow x_M = x_U \cdot \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,M}} + x_B \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,M}}\right)$$

$$\text{mit: } \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,M}} = \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,A}} = 1/3$$

$$\Rightarrow x_M = \frac{1}{3} \cdot x_U + \left(1 - \frac{1}{3}\right) \cdot x_B = \frac{1}{3} \cdot 11,9 (g/kg) + \frac{2}{3} \cdot 23,7 (g/kg) = 19,77 (g/kg)$$

Enthalpiebilanz:

$$\dot{m}_{tr,L,M} \cdot h_{1+x,M} = \dot{m}_{tr,L,U} \cdot h_{1+x,U} + \dot{m}_{tr,L,Bzu} \cdot h_{1+x,B}$$

$$\Rightarrow h_{1+x,M} = \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,M}} \cdot h_{1+x,U} + \left(1 - \frac{\dot{m}_{tr,L,U}}{\dot{m}_{tr,L,M}}\right) \cdot h_{1+x,B} = \frac{1}{3} \cdot h_{1+x,U} + \frac{2}{3} \cdot h_{1+x,B}$$

- Punkte U, M und B liegen im ungesättigten Bereich (siehe Diagramm)

$$h_{1+x,U} = c_{p,L} \cdot t_U + x_U \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_U) = (1,007 \cdot 25 + 0,0119 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 25)) \frac{kJ}{kg} = 55,48 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{1+x,B} = c_{p,L} \cdot t_B + x_B \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_B) = (1,007 \cdot 27,7 + 0,0237 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 27,7)) \frac{kJ}{kg} = 88,36 \frac{kJ}{kg}$$

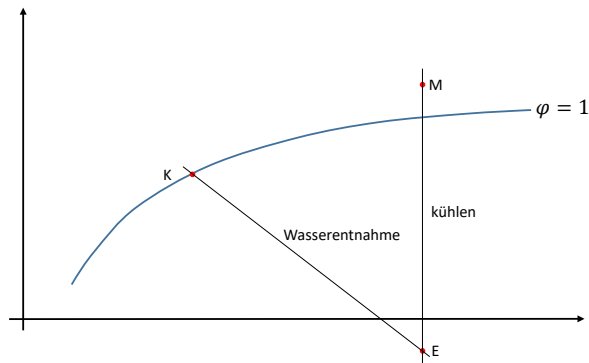
$$\Rightarrow h_{1+x,M} = \frac{1}{3} \cdot 55,48 \frac{kJ}{kg} + \frac{2}{3} \cdot 88,36 \frac{kJ}{kg} = 77,40 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{1+x,M} = c_{p,L} \cdot t_M + x_M \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_M)$$

$$\Rightarrow t_M = \frac{h_{1+x,M} - x_M \cdot \Delta h_v}{c_{p,L} + x_M \cdot c_{p,D}} = \frac{77,40 - 0,01977 \cdot 2500}{1,007 + 0,01977 \cdot 1,86} \text{ } ^\circ\text{C} = 26,80^\circ\text{C}$$

Teilaufgabe f)  $\Rightarrow$  7 Punkte

Kühlleistung im Kühler:



$$t_E = t_K = 9,28^\circ\text{C}$$

$$x_E = x_M = 0,01977$$

$$h_{1+x,M} = 77,40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{sh. f})$$

$$h_{1+x,E} = c_{p,L} \cdot t_E + x_K \cdot (\Delta h_v + c_{p,D} \cdot t_E) + (x_M - x_K) \cdot c_{p,W} \cdot t_E$$

$$= (1,007 \cdot 9,28 + 0,00726 \cdot (2500 + 1,86 \cdot 9,28) + (0,01977 - 0,00726) \cdot 4,19 \cdot 9,28) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 28,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{\text{Kuehl,ME}} = \dot{m}_{\text{tr,L,M}} \cdot (h_{1+x,E} - h_{1+x,M}) = 0,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (28,11 - 77,40) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -44,36 \text{ kW}$$

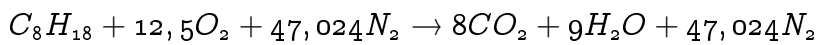
Kondensatmassenstrom:

$$\dot{m}_{K,H_2O} = \dot{m}_{\text{tr,L,M}} \cdot (x_M - x_K) = 0,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (0,01977 - 0,00726) = 11,259 \frac{\text{gH}_2\text{O}}{\text{s}}$$

## Musterlösung Aufgabe 3: «Formel 1 Rennwagen»

### Teilaufgabe a) ⇒ 2 Punkte

$$\frac{0,79 \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol Luft}}}{0,21 \frac{\text{mol O}_2}{\text{mol Luft}}} \cdot 12,5 \frac{\text{mol O}_2}{\text{mol Bs}} = 47,024 \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol Bs}}$$



### Teilaufgabe b) ⇒ 4 Punkte

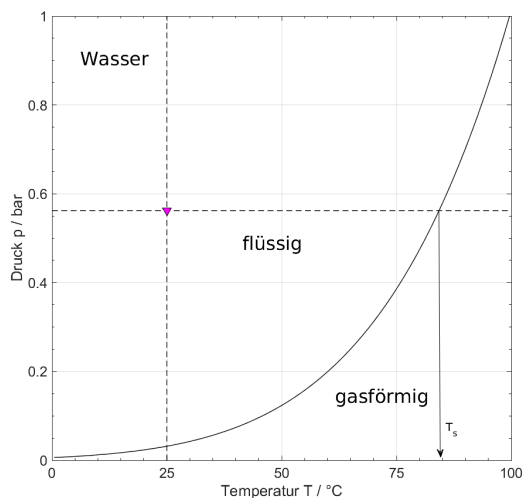
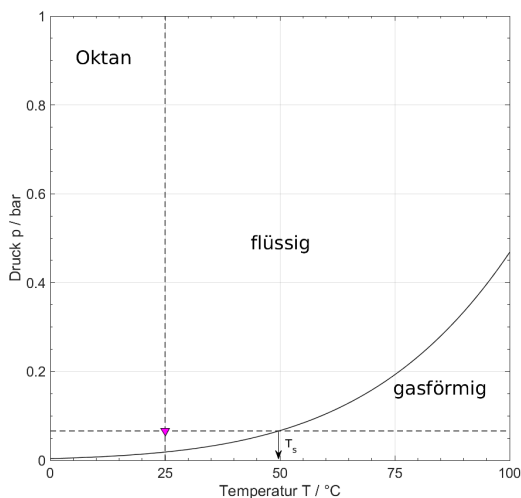
$$\psi_{E_j} = \frac{\nu_j}{\sum_{\text{Edukte}} \nu_i}; \quad \psi_{P_j} = \frac{\nu_j}{\sum_{\text{Produkte}} \nu_i}$$

$$\sum_{\text{Edukte}} \nu_i = 1 + 12,5 + 47,024 = 60,524; \quad \sum_{\text{Produkte}} \nu_i = 8 + 9 + 47,024 = 64,024$$

$$\text{Edukte: } \psi_{C_8H_{18}} = \frac{1}{60,524} = 0,01652; \quad \psi_{O_2} = \frac{12,5}{60,524} = 0,20653; \quad \psi_{N_2} = \frac{47,024}{60,524} = 0,77695$$

$$\text{Produkte: } \psi_{CO_2} = \frac{8}{64,024} = 0,12495; \quad \psi_{H_2O} = \frac{9}{64,024} = 0,14057; \quad \psi_{N_2} = \frac{47,024}{64,024} = 0,73447$$

### Teilaufgabe c) ⇒ 5 Punkte



$$\text{Partialdruck } p_i = \psi_i p$$

$$p_{C_8H_{18}} = \psi_{C_8H_{18}} p = 0,01652 \cdot 4 \text{ bar} = 0,06609 \text{ bar}$$

$$p_{H_2O} = \psi_{H_2O} p = 0,14057 \cdot 4 \text{ bar} = 0,56229 \text{ bar}$$



⇒ Beides flüssig!

$$\Delta^R h_\Theta = \sum \nu_i \Delta^B h_{\Theta,i} = \left[ (-1) \left( 1(-250,3) + 0 + 0 \right) + 8(-393,6) + 9(-286) + 0 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -5472,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

### Teilaufgabe d) ⇒ 7 Punkte

1) Edukte rekombinieren bei Standardtemperatur zu Produkten:  $\Delta h_1 = \Delta^R h_\Theta$

2) Produkte auf Reaktionstemperatur bringen, Komponenten  $i$ : ohne,  $j$ : mit Phasenwechsel:

$$\Delta h_2 = \sum \nu_i \left[ c_{p,i}(T_R - T_\Theta) + c_{p,(l),j}(T_{s,j} - T_\Theta) + \Delta^V h_j + c_{p,(g),j}(T_R - T_{s,j}) \right]$$

3) Edukte auf Reaktionstemperatur bringen, Komponenten  $i$ : ohne,  $j$ : mit Phasenwechsel:

$$\Delta h_3 = \sum |\nu_i| \left[ c_{p,i}(T_R - T_\Theta) + c_{p,(l),j}(T_{s,j} - T_\Theta) + \Delta^V h_j + c_{p,(g),j}(T_R - T_{s,j}) \right]$$

4) Edukte rekombinieren bei Reaktionstemperatur zu Produkten:  $\Delta h_4 = \Delta^R h$

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 = \Delta h_3 + \Delta h_4 \Leftrightarrow \Delta h_4 = \Delta h_1 + \Delta h_2 - \Delta h_3 = \Delta^R h$$

$$1) \Delta h_1 = \Delta^R h_\Theta = -5472,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$2) \Delta h_2 = (T_R - T_\Theta) (\nu_{CO_2} c_{p,CO_2,g} + \nu_{N_2} c_{p,N_2,g}) + \nu_{H_2O} \left( (T_{s,H_2O} - T_\Theta) c_{p,H_2O,l} + \Delta^V h_{H_2O} + (T_R - T_{s,H_2O}) c_{p,H_2O,g} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta h_2 = \left[ (600 - 298,15)(8 \cdot 0,0433 + 47,024 \cdot 0,0301) \dots \right. \\ \left. + 9 \left( (357,42 - 298,15) 0,0755 + 41,38 + (600 - 357,42) 0,0347 \right) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 1020,26 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$3) \Delta h_3 = (T_R - T_\Theta) (\nu_{O_2} c_{p,O_2,g} + \nu_{N_2} c_{p,N_2,g}) + \nu_{C_8H_{18}} \left( (T_{s,C_8H_{18}} - T_\Theta) c_{p,C_8H_{18},l} + \Delta^V h_{C_8H_{18}} + (T_R - T_{s,C_8H_{18}}) c_{p,C_8H_{18},g} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta h_3 = \left[ (600 - 298,15)(12,5 \cdot 0,0306 + 47,024 \cdot 0,0301) \dots \right. \\ \left. + 1 \left( (322,88 - 298,15) 0,256 + 39,97 + (600 - 322,88) 0,263 \right) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 661,88 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$4) \Delta h_4 = \Delta^R h = \left[ -5472,5 + 1020,26 - 661,88 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -5114,13 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

### Teilaufgabe e) ⇒ 2 Punkte

Gegeben: Verbrauch  $V = 0,7 \text{ l/km}$ , Geschwindigkeit  $v = 200 \text{ km/h}$ , Molare Masse  $M = 114,23 \text{ g/mol}$ ,

Dichte  $\rho_{fl.K} = 698,27 \text{ kg/m}^3 = 6,113 \text{ mol/l}$

$$\dot{n} = V \cdot v \cdot \rho_{fl.K} = 0,7 \cdot 200 \cdot 6,113 \text{ mol/h} = 855,798 \text{ mol/h} = 0,23772 \text{ mol/s}$$

$$P = 0,3 |\Delta^R h| \dot{n} = 0,3 \cdot 5114,13 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 0,23772 \text{ mol/s} = 364,72 \text{ kW}$$

**Teilaufgabe f) ⇒ 2 Punkte**

- 1) Durch den Luftüberschuss hat man entsprechend mehr Sauerstoff  $O_2$  und mehr Stickstoff  $N_2$  auf der Edukteseite. Auf der Produktseite bleibt nun ein Teil Sauerstoff übrig. Die Stoffmenge an Stickstoff auf der Produktseite ist natürlich wieder gleich der auf der Edukteseite, nur entsprechend größer.
- 2) Durch den zusätzlichen Stickstoff und den übrig gebliebenen Sauerstoff auf der Produktseite hat das Abgas eine größere thermische Masse. Dadurch ergibt sich bei sonst gleichen Bedingungen eine geringere Abgastemperatur.