

Berechnen Sie die adiabate Verbrennungstemperatur eines Brennstoffes mit einem Heizwert von 18 MJ/kg, der einen minimalen Luftbedarf von  $M_{L\min} = \frac{m_L}{m_B} = S$  hat und mit einem Luftüberschuss von  $\lambda = 1,2$  verbrannt wird. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Rauchgases kann mit  $c_{pm} = 1,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  angenommen werden. Welcher spezifische Energieverlust  $\Delta e$  tritt bei der Verbrennung auf? ( $T_0 = 280 \text{ K}$ )

$$M_L = \lambda \cdot M_{L\min} = 6 = \frac{m_L}{m_B}$$

$$\dot{m}_L + \dot{m}_B = \dot{m}_G + \dot{m}_A^0 \quad | : \dot{m}_B$$

$$M_L + 1 = M_G = 7$$

$$\dot{H}_B = \dot{m}_B \cdot H_i = \dot{m}_B \cdot c_{pm} (T_{adv} - T_0) \quad | : \dot{m}_B$$

$$H_i = M_G \cdot c_{pm} (T_{adv} - T_0)$$

$$\Rightarrow T_{adv} = T_0 + \frac{H_i}{M_G \cdot c_{pm}} = 280 \text{ K} + \frac{18000 \text{ kJ}}{7 \cdot 1,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}} = \underline{\underline{2423 \text{ K}}}$$

Auflösung istbar:

$$\Delta e_v = c_{pm} (T_{adv} - T_0) - T_0 \cdot c_{pm} \cdot \ln\left(\frac{T_{adv}}{T_0}\right)$$

$$= 1,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} (2423 - 280) \text{ K} - 280 \text{ K} \cdot 1,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot \ln\left(\frac{2423}{280}\right) = 1846,5 \text{ kJ/kg}$$

$\boxed{M_x = \frac{\dot{m}_x}{\dot{m}_B}}$   
 $\dot{m}_x \cdot \dot{H}_B = \dot{m}_B \cdot c_{pm} (T_{adv} - T_0)$

↳ vorausgesetzte Kenntnis!

- a) Ein BHKW hat einen Brennstoffnutzungsgrad von  $\eta_{bh} = 80\%$  und einen elektrischen Wirkungsgrad von  $\eta_e = 38\%$ . Welchen Wert haben Stromkennziffer  $\sigma$  und thermischer Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ ?

b) Ist eine hohe Stromkennziffer ein ausreichendes Merkmal für einen hohen energetischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems? Begründen Sie.

a)  $\eta_{sys} = \eta_{th} + \eta_e = 80\% + 38\% = \underline{\underline{42\%}}$

$$\sigma = \frac{\eta_e}{\eta_{th} \cdot Q_{heat}} = \frac{\eta_e \cdot Q_{heat}}{\eta_{th} \cdot Q_{heat}} = \frac{0,38}{0,42} = \underline{\underline{0,905}}$$

- b) Nein. Ein BHKW mit  $\sigma \rightarrow \infty$ , bzw.  $Q_{heat} = 0$  hat nicht unbedingt einen hohen energetischen Wirkungsgrad.

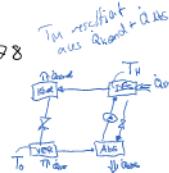
(Anzustreben sind niedrige Stromkennziffern bei hohen el. Wirkungsgraden)

Eine Absorptionswärmepumpe hat ein Wärmeverhältnis von  $\lambda_{wp} = 1,7$  und nimmt die Umgebungswärme gerade bei Umgebungstemperatur  $T_0 = 280 \text{ K}$  auf. Die Desorberwärme  $Q_{des} = 100 \text{ kW}$  wird bei  $T_M = 177^\circ\text{C}$  zugeführt. Der Energieverlust beträgt 20 % der im Desorber zugeführten Energie. Bei welcher Temperatur kann die Mitteltemperaturwärme zur Verfügung gestellt werden?

$$\overbrace{T_{abs \& kond}}^{T_M} = T_H$$

$$T_{des} = T_H = \underline{\underline{450 \text{ K}}}$$

$$\left| T_H = \frac{T_H - T_0}{T_H} = 0,378 \quad \begin{array}{l} T_M \text{ reicht } \\ \text{aus Abstand } \lambda_{wp} \\ \text{aus } Q_{abs} \end{array} \right.$$



$$\varepsilon_{wp} = \frac{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}}{\dot{Q}_{des}} = 1,7 \quad \underbrace{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}}_{\dot{Q}_{heat}} = 1,7 \dot{Q}_{des} = 170 \text{ kW}$$

$$\Delta E_v = 0,2 \cdot \dot{E}_{Qdes} = 4,37 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_{Qdes} + \dot{E}_{Qkond} = \dot{E}_{Qabs} + \dot{E}_{Qkond} + \Delta E_v \Leftrightarrow T_H \cdot \dot{Q}_{des} + T_0 \cdot \dot{Q}_{kond} = T_M (\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}) + \Delta E_v$$

$$\Rightarrow T_H \cdot \dot{Q}_{des} = T_M (\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}) + \Delta E_v$$

$$\Rightarrow T_M = \frac{T_H \cdot \dot{Q}_{des} - \Delta E_v}{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}} = \frac{T_H - T_0}{\frac{\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{kond}}{\dot{Q}_{des}}} = 1 - \frac{T_0}{T_M} = \frac{37,78 \text{ kW} - 4,37 \text{ kW}}{170 \text{ kW}} = 196,53 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \frac{T_0}{T_M} = 1 - 196,53 \cdot 10^{-3} \Rightarrow T_M = \frac{T_0}{1 - 196,53 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{348,5 \text{ K}}}$$

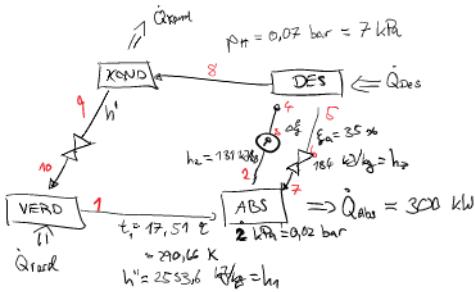
$$t_n = 75,34^\circ\text{C}$$

Im Absorber einer Absorptionskältemaschine wird durch Kühlwasser ein Wärmestrom von 300 kW abgeführt. Der Absorber arbeitet bei einem Druck von 2 kPa, der aus dem Verdampfer zuströmende Dampf ist trocken gesättigt. Die spezifische Enthalpie der eintretenden armen Lösung mit einem Wassermassenanteil von  $\xi_a = 35\%$  beträgt  $h_{AL} = 184 \text{ kJ/kg}$ , die der abströmenden reichen Lösung  $h_{RL} = 131 \text{ kJ/kg}$ . Die Entgasungsbreite des gesamten Prozesses ist  $\Delta\xi = 10\%$ .

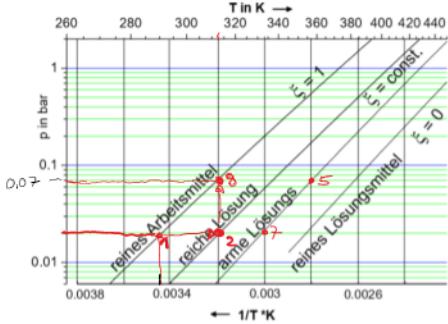
Bestimmen Sie die spezifische Absorberwärme und den umlaufenden Dampfmassenstrom.

Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf auf der Siede- und Kondensationskurve.

p kPa	t °C	$v'$ m <sup>3</sup> /kg		$v''$ m <sup>3</sup> /kg		$h'$ kJ/kg		$h''$ kJ/kg		$s'$ kJ/(kg K)		$s''$ kJ/(kg K)	
		$m^*$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	$m^{\circ}$	
0,0757	3	0,001	168,2	12,6	2507	0,046	9,079						
1	6,98	0,001	129,2	29,3	2514,4	0,106	8,977						
1,4	12	0,001	93,8	50,37	2524	0,18	8,854						
2	17,51	0,001001	67	73,5	2533,6	0,261	8,725						
3	24,1	0,001003	45,7	101	2545,6	0,354	8,578						



für Lösung dieser  
aus Formelsammlung  $\Rightarrow$  Aufgabe nicht  
notwendig!



$$f = \frac{1 - \xi_a}{\Delta f} = \frac{1 - 0,35}{0,1} = 6,5$$

$$\dot{Q}_{Abs} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{m}_D} = h_1 + (f-1)h_{AL} - fh_{RL} = 2533,6 \text{ kJ/kg} + 5,5 \cdot 184 \text{ kJ/kg} - 6,5 \cdot 131 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{Abs} = \underline{\underline{\dot{Q}_{Abs}}} = 2604,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{Abs} = \dot{Q}_{Abs} \cdot \dot{m}_D \Rightarrow \dot{m}_D = \frac{300 \text{ kJ/s}}{2604,7 \text{ kJ/kg}} = 0,111 \text{ kg/s}$$

### Kochrezept:

- Schaltbild mit Flussrichtungen merken
- Energiebilanzen: Zugeführte Energie = abgeführte Energie
- Merken: gesättigter Dampf  $\Rightarrow h''$  (nach Verdampfer)

Wie wirkt sich steigender Luftüberschuss bei der Verbrennung auf folgende Größen aus:

(geben Sie jeweils eine kurze! Verbale Begründung)

- Adiabate Verbrennungstemperatur
- Kesselwirkungsgrad
- Tautemperatur des Abgases und Wärmerückgewinnung bei der Brennwertnutzung
- Brennungsgüte der realen Verbrennung (CO und NOx-Anteile)

$$\lambda = \frac{M_L}{M_{Lmin}} \quad | \quad M_{Lmin} = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad \lambda \uparrow \Rightarrow M_L \uparrow = \frac{\dot{m}_L \uparrow}{\dot{m}_A}$$

nicht in Formelsammlung!

$$a) \quad T_{adv} = T_0 + \frac{\dot{m}_B \cdot H_i}{\dot{m}_A \cdot C_{pg}}$$

$$\dot{m}_L + \dot{m}_B = \dot{m}_A + \dot{m}_F$$

$$\Rightarrow T_{adv} = T_0 + \frac{\dot{m}_B \cdot H_i}{(\dot{m}_L + \dot{m}_B) \cdot C_{pg}} \Rightarrow T_{adv} \sim \frac{1}{f(\lambda)}$$

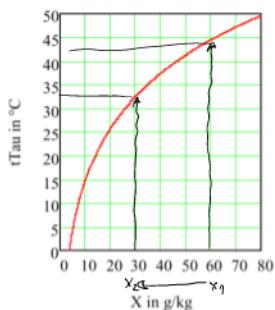
Adiabate Verbrennungstemperatur fällt mit steigendem Luftüberschuss.

$$b) \eta_x = 1 - \frac{M_G C_{p,0} (T_A - T_0)}{H_i} = 1 - \frac{(M_L + 1) C_{p,0} (T_A - T_0)}{H_i} \Rightarrow \eta_x \sim 1 - f(\lambda)$$

Kesselwirkungsgrad nimmt mit steigendem Luftüberschuss ab.

$$c) t_{\text{tau}} = f(\lambda) = f\left(\frac{m_w}{m_{\text{lu}}} \cdot \lambda\right) \quad \lambda \uparrow \Rightarrow \frac{m_w}{m_{\text{lu}}} \downarrow \Rightarrow \lambda \uparrow \Rightarrow t_{\text{tau}} \downarrow$$

$\lambda = \frac{m_w}{m_{\text{lu}}}$  nicht in Formelsammlung



d) Theoretisch: stöchiometrische Verbrennung ab  $\lambda = 1$ , keine Verbesserung bei  $\lambda > 1$

Real: Nicht jedes Brennstoffmolekül kommt sofort mit  $O_2$  in Kontakt, also nimmt die Verbrennungsgüte auch bei  $\lambda > 1$  weiter zu.  
Sättigung bei  $\lambda = 1,03 \dots 2$  je nach Feuerungsart

Im  
Kondensator eines Heizkraftwerks wird durch die Aufheizung eines Heizwassermassenstroms ( $c_p = 4,2 \text{ kJ/(kg K)}$ ) von  $t_E = 60^\circ\text{C}$  auf  $t_A = 90^\circ\text{C}$  eine Heizleistung von 2 MW bereitgestellt.

- Welcher Exergieverlust tritt im Wärmeübertrager auf, wenn der Turbinenabdampf bei  $p = 1 \text{ bar}$  kondensiert. (Die Umgebungstemperatur betrage  $t_u = 10^\circ\text{C}$ )
- Sinkt oder steigt der Exergieverlust im Wärmeübertrager, wenn der Dampf bei 1,5 bar kondensiert? Begründen Sie.

Eigenschaften von Wasser auf der Siede- und Kondensationslinie.

$t_{\text{bar}} = 100^\circ\text{C}, p$	$t$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
bar	$100^\circ\text{C}$				
1	99,6	417,43	2674,95	1,303	7,359
1,5	111,4	467,08	2693,11	1,433	7,223

a)

$$T_{H_m} = \frac{\Delta h^v}{\Delta s} = \frac{h'' - h'}{s'' - s'} = 372,9 \text{ K}$$

$$\bar{T}_{K_m} = \frac{T_A - T_E}{\ln\left(\frac{T_A}{T_E}\right)} = 347,8 \text{ K}$$

$$\dot{E}_{Q_H} = \frac{T_{H_m} - T_u}{T_{H_m}} \dot{Q}_{zu} = 481,1 \text{ kW}$$

$$\Delta \dot{E}_v = \dot{E}_{Q_H} - \dot{E}_{Q_K} = 109,3 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_{Q_K} = \frac{T_{K_m} - T_u}{T_{K_m}} \dot{Q}_{zu} = 371,8 \text{ kW}$$

$$\bar{T}_{H_a} = 0,24$$

$$b) \bar{T}_{H_m} = \frac{(2693,11 - 467,08) \text{ kJ/kg}}{(7,223 - 1,433) \text{ kJ/kg K}} = 384,5 \text{ K} \Rightarrow \bar{T}_{H_b} = 0,264 \quad \text{für b) gibt es 2 Möglichkeiten!}$$

Fall 1)  $\bar{T}_{H_b} \cdot \dot{Q}_{zu} = 0,264 \cdot 2 \text{ MW} > \bar{T}_{H_a} \cdot \dot{Q}_{zu} = 0,24 \cdot 2 \text{ MW}$

Der Exergieverlust steigt, wenn  $\dot{Q}_{zu}$  konstant bleibt

Fall 2)  $\dot{Q}_{zu}$  nicht konstant,  $m_g = \text{konst.} = \frac{2 \text{ MW}}{\Delta v h_g} = \frac{2000 \text{ kW/s}}{(2674,95 - 417,43) \text{ kJ/kg}} = 0,886 \text{ kW/s}$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{zu,b} = m_g \cdot \Delta v h_g = 0,886 \text{ kW/s} \cdot (2693,11 - 467,08) \text{ kJ/kg} = 1,972 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \Delta \dot{E}_v = (\bar{T}_{H_b} - \bar{T}_{H_a}) \dot{Q}_{zu,b} = 154 \text{ kW} = \text{Der Exergieverlust steigt auch hier!}$$

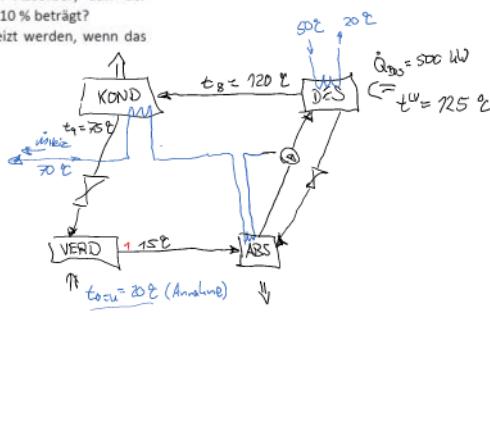
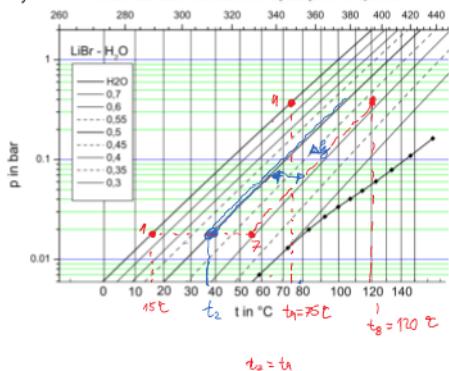
Eine Absorptionswärmepumpe arbeitet mit dem Arbeitsmittelgemisch  $H_2O-LiBr$  und wird zur Rückgewinnung von Abwärme aus Industrieabwasser eingesetzt. Das Abwasser wird von 50 auf  $20^\circ\text{C}$  zurückgekühlt, der so ausgekoppelte Abwärmostrom beträgt  $\dot{Q} = 500 \text{ kW}$ . Als Heizmedium steht kondensierender Sattdampf mit  $t^{LV} = 125^\circ\text{C}$  zur Verfügung. Durch die Wärmepumpe soll ein Heizwasserstrom auf eine Vorlauftemperatur  $t_v = 70^\circ\text{C}$  erwärmt werden. In allen Apparaten sind die minimalen Temperaturdifferenzen für die Wärmeübertragung mit jeweils 5 K vorzusehen.

- Zeichnen Sie den Prozess in das untenstehende Diagramm ein.
- Welche maximale Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur in den Absorber) darf der Heizwasserstrom haben, wenn die Entgasungsbreite der Lösung  $\Delta\xi = 10\%$  beträgt?
- Welcher Massenstrom Heizwasser ( $c_p = 4,2 \text{ kJ/(kg K)}$ ) kann aufgeheizt werden, wenn das

- Temperatur bestimmen
- Punkt 9 am AM eintragen
- Punkt 4 am  $t^{LV}$ ,  $a_L$  eintragen
- Punkt 2 am  $a_L, p_0$  eintragen

$50^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$

- a) Zeichnen Sie den Prozess in das untenstehende Diagramm ein.  
 b) Welche maximale Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur in den Absorber) darf der Heizwasserstrom haben, wenn die Entgasungsbreite der Lösung  $\Delta\xi = 10\%$  beträgt?  
 c) Welcher Massenstrom Heizwasser ( $c_p = 4,2 \text{ kJ/(kg K)}$ ) kann aufgeheizt werden, wenn das Wärmeverhältnis der Wärmepumpe  $\varepsilon = 1,6$  ist?



b) gesucht:  $t_{r,\max}$   
 aus Diagramm:  $\xi_{r,L} = 0,4 \Rightarrow \xi_{r,L} = \xi_{r,L} + \Delta\xi = 0,5 \Rightarrow \text{Diagramm: } t_2 \approx 38^\circ\text{C}$   
 bei  $\Delta T = 5 \text{ K} \Rightarrow t_r = 33^\circ\text{C}$

c)  $\varepsilon = 1,6 = \frac{\dot{Q}_{\text{Abs}} + \dot{Q}_{\text{Kond}}}{\dot{Q}_{\text{Des}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Abs}} + \dot{Q}_{\text{Kond}}}{100 \text{ kW}} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{Abs}} + \dot{Q}_{\text{Kond}} = 1,6 \cdot 100 \text{ kW} = 160 \text{ kW}$   
 $\dot{Q}_{\text{Abs}} + \dot{Q}_{\text{Kond}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{pw}} \cdot (t_v - t_r)$   
 $\Rightarrow \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{160 \text{ kJ/s}}{4,2 \text{ kJ/kg K} \cdot (70 - 35) \text{ K}} = 1,09 \text{ kg/s}$

Berechnen Sie die adiabate Verbrennungstemperatur eines Brennstoffes mit einem Heizwert von 18 MJ/kg, der einen minimalen Luftbedarf von  $M_{L,\min} = \dot{m}_{L,\min}/\dot{m}_{B,\min} = 5$  hat und mit einem Luftüberschuss von  $\lambda = 1,2$  verbrannt wird. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Rauchgases kann mit  $c_{pm} = 1,2 \text{ kJ/(kg K)}$  angenommen werden.

Welcher spezifische Energieverlust  $\Delta e_v$  tritt bei der Verbrennung auf? ( $T_0 = 280 \text{ K}$ )

$$M_L = \lambda \cdot M_{L,\min} = 6$$

$$\dot{m}_C = \dot{m}_B + \dot{m}_L \quad | \div \dot{m}_B$$

$$\Rightarrow M_g = 1 + M_L = 7 = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_B}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_G = \dot{m}_B \cdot 7$$

$$\Rightarrow T_{adu} = T_0 \cdot \frac{H_i}{M_g \cdot c_{pg}} = 280 \text{ K} \cdot \frac{18000 \text{ kJ/kg}}{7 \cdot 1,2 \text{ kJ/kg K}} = 2423 \text{ K}$$

$$T_{adu} = \frac{T_{adu} - T_0}{\ln\left(\frac{T_{adu}}{T_0}\right)} = 993 \text{ K} \quad T_a = \frac{T_{adu} - T_0}{T_{adu}} = 0,718$$

$$e_g = \tau_{g,i} \cdot H_i = 14,36 \text{ MJ/kg}$$

$$\Delta e_v = e_g - e_a = H_i - e_a = 5640 \text{ kJ/kg}$$

Nachfolgend kommen Fragen vor 2014 (bei denen alle Unterlagen erlaubt waren). Manche sind auch nur mit Formelsammlung leicht zu rechnen.  
 Aufgaben zu Themen, die nicht behandelt wurden, werden hier ausgelassen.

Im Heizkessel (Wärmeübertrager) eines Biomassekraftwerks wird ein Thermoölstrom  $\dot{m}_{0,l} = 20 \text{ kg/s}$  ( $c_p = 2,8 \text{ kJ/(kg K)}$ ) von  $t_1 = 200^\circ\text{C}$  auf  $t_2 = 300^\circ\text{C}$  isobar erwärmt. Im Verbrennungsraum kann eine konstante Temperatur vom  $t_g = 950^\circ\text{C}$  angenommen werden. Welcher Exergieverluststrom  $\Delta E_v$  tritt insgesamt auf, wenn ein Wärmeverlust von 5 % über die Kesseloberfläche berücksichtigt wird? ( $T_U = 273,15 \text{ K}$ )

$$\dot{Q}_{\text{Wär}} = \dot{m}_{0,l} \cdot c_{p0,l} (t_2 - t_1) = 5600 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Wär}} = \dot{m}_{0,l} \cdot c_{p0,l} \cdot \Delta T = 5600 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Wär}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{T_g}{T_U}\right)} = \frac{100 \text{ K}}{\ln\left(\frac{950}{273,15}\right)} = 521,4 \text{ K}$$

$$(T_U = 273,15 \text{ K})$$

$$\dot{Q}_{\text{Nutz}} = \dot{m}_G \cdot c_{p,G} \cdot (t_1 - t_2) = 5600 \text{ kW}$$

$$T_{\text{mwü}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{100 \text{ K}}{\ln\left(\frac{523}{473}\right)} = 521,4 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_B = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{1-0,05} = 5894,7 \text{ kW}$$

$$T_g = 1223,15 \text{ K}$$

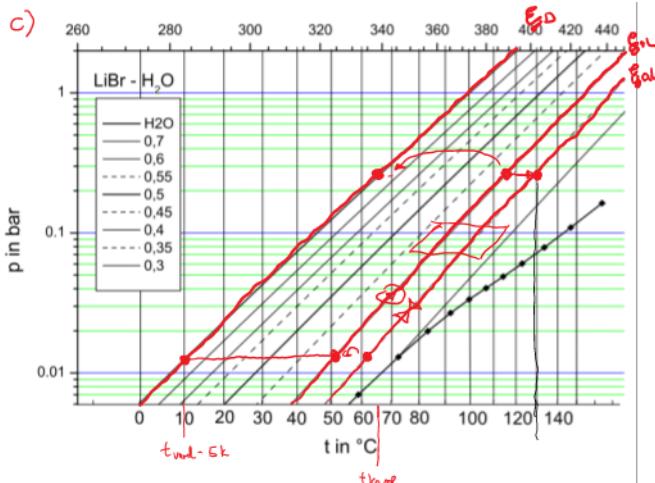
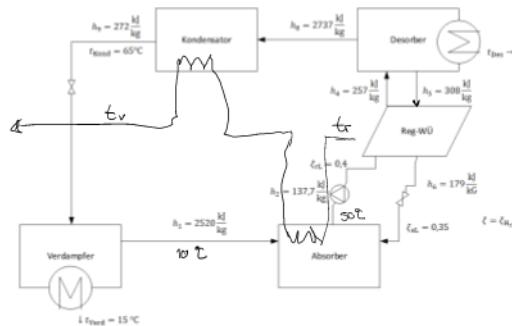
$$\dot{E}_g = \frac{T_g - T_{\text{v}}} {T_g} \cdot \dot{Q}_B = \tau_v \cdot \dot{Q}_B = 4578,3 \text{ kW}$$

$$\dot{E}_{\text{Nutz}} = \frac{T_{\text{mwü}} - T_{\text{v}}} {T_{\text{mwü}}} \cdot \dot{Q}_{\text{Nutz}} = T_{\text{mwü}} \cdot \dot{Q}_{\text{Nutz}} = 2701,3 \text{ kW}$$

$$\Delta \dot{E}_v = \dot{E}_g - \dot{E}_{\text{Nutz}} = 1877 \text{ kW}$$

Eine Absorptionswärmepumpe, die zur Rückgewinnung von Abwärme aus Industrieabwasser eingesetzt wird, arbeitet mit dem Arbeitsmittelgemisch Wasser-LiBr unter den im Schema angegebenen Bedingungen. In allen Apparaten können die minimalen Temperaturdifferenzen mit jeweils 5 K angenommen werden.

- Bestimmen Sie den spezifischen Lösungsumlauf im Prozess.
- Bestimmen Sie die im Desorber zuführende spezifische Wärme.
- Skizzieren Sie den Prozess im untenstehenden Ig(p)-T-Diagramm. (Eingetragene Lösung ist nicht unbedingt richtig)
- Welche Heizmitteltemperatur muss im Desorber mindestens zur Verfügung stehen?
- Auf welche Temperatur kann der Vorlauf eines angeschlossenen Nutzwärmekreislaufs maximal erwärmt werden?
- Berechnen Sie das Wärmeverhältnis der AWP (Die Arbeit der Lösungspumpe ist zu vernachlässigen)



a) LiBr:  $\xi_D = 1$

$$\Rightarrow f = \frac{\xi_D - \xi_{\text{al}}}{\xi_{\text{gr}} - \xi_{\text{al}}} = \frac{1 - 0,35}{0,4 - 0,35} = 13$$

b)  $q_{\text{Des}} + h_4 = h_8 + h_5$   
 $\Rightarrow q_{\text{Des}} = 2788 \text{ kJ/kg}$

d) Annahme: Ermittelte Werte aus Diagramm korrekt.  
 $\Rightarrow t_{\text{Des}} = 130 \text{ °C}$

e)  $t_v = t_{\text{kond}} + 5 \text{ K} = 70 \text{ °C}$

$$q_{\text{kond}} = h_8 - h_9 = 2465 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{abs}} = h_1 + h_6 - h_2 = 2561,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\Xi_{\text{AWP}} = \frac{q_{\text{abs}} + q_{\text{kond}}}{q_{\text{des}}} = 1,8$$

Wasserdampftafel benötigt!  
 $\hookrightarrow$  bei  $t^{\text{L}} = 150 \text{ °C} : s'' = 6,8381 \text{ kJ/kgK}$   
 $s' = 1,8416 \text{ kJ/kgK}$   
 $\hookrightarrow T_{\text{kond}} = \frac{\Delta h^{\text{L}}}{s'' - s'} = 422,3 \text{ K}$   
 (ohne WD-Tafel kann  $T^{\text{L}} \approx T_{\text{kond}}$  geschätzt werden, da  $T^{\text{L}} \approx \text{const.}$ )

In einem Biomasse-Heizkessel wird ein Rauchgasstrom von  $\dot{m}_G = 5 \text{ kg/s}$  ( $c_p = 1,1 \text{ kJ/(kg K)}$ ) von  $t_1 = 900 \text{ °C}$  auf  $t_2 = 200 \text{ °C}$  isobar bei Normaldruck abgekühlt. Dabei wird ein Wassermassenstrom bei  $t^{\text{L}} = 150 \text{ °C}$  gerade vollständig verdampft ( $\Delta h^{\text{L}} = 2110 \text{ kJ/kg}$ ). Welcher Exergieverluststrom  $\Delta \dot{E}_v$  tritt bei der Wärmeübertragung auf? ( $T_U = 273,15 \text{ K}$ )

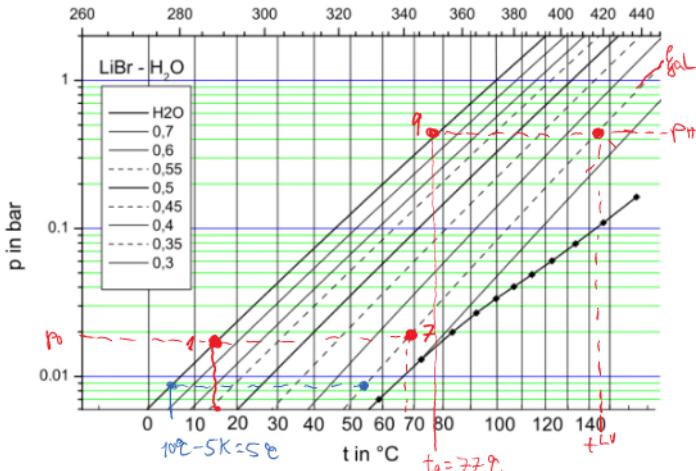
$$\dot{Q}_{\text{zu}} = \dot{m}_G \cdot c_{p,G} \cdot (t_1 - t_2) = 3,85 \text{ MW}$$

$$\overline{T}_{\text{Hm}} = \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} = 770,7 \text{ K}$$

$$\Delta \dot{E}_v = \left( \frac{\overline{T}_{\text{Hm}} - T_U}{\overline{T}_{\text{Hm}}} - \frac{T_{\text{kond}} - T_U}{T_{\text{kond}}} \right) \dot{Q}_{\text{zu}} = 1,126 \text{ MW}$$

Eine Absorptionswärmepumpe mit LiBr wird zur Rückgewinnung von Abwärme aus Industriewasser eingesetzt, das von 50 °C auf 20 °C abgekühlt wird. Als Heizmedium steht kondensierter Satt dampf mit  $t^{LV} = 150$  °C zur Verfügung.  $\Delta T$  beträgt überall 5 K.

- In welchem Temperaturbereich kann der Frischwasserstrom durch die Wärmepumpe erwärmt werden, bei max. LiBr = 65 Ma%
- Zeichnen Sie den Prozess im Diagramm und je eine Bedingung für die Eintritts- und Austrittstemperatur des Frischwassers in die WP ein.
- Ist es sinnvoll das Abwasser bis auf 10 °C auszukühlen, wenn das zu erwärmende Frischwasser mit  $t = 15$  °C aus der Leitung entnommen wird? Begründen Sie.



- c) Ja, es ist sinnvoll. Bei  $f_{AL} = 0,35$  kristallisiert nichts aus.

Im Kondensator eines Heizkraftwerks kondensiert  $m_D = 0,9$  kg/s Turbinenab dampf bei  $p = 1$  bar ( $\Delta h_{LV} = 2257$  kJ/kg,  $t_{Kond} = 100$  °C) und erwärmt einen Heizwasserstrom ( $c_p = 4,2$  kJ/(kg K)) von  $t_E = 60$  °C auf  $t_A = 90$  °C.  $t_H = 10^\circ\text{C}$

$$\hookrightarrow 333 \text{ K} \quad \hookrightarrow 363 \text{ K} \quad \hookrightarrow 285 \text{ K}$$

- Weicher Energieverlust  $\Delta E_v$  tritt im Wärmeübertrager auf?
- Sinkt oder steigt der Energieverluststrom im Wärmeübertrager, wenn der Dampf bei  $p = 1,5$  bar kondensiert? Begründen Sie.

Eigenschaften von Wasser auf der Siede- und Kondensationslinie.

$p$	$t$	$h'$	$h''$	$s'$	$s''$
bar	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
1	99,6	417,43	2674,95	1,303	7,359
1,5	11,4	467,08	2693,11	1,433	7,223

$$a) \quad T_{H,m} = \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{2257 \text{ kJ/kg}}{(7,359 - 1,303) \text{ kJ/kg K}} = 372,7 \text{ K} \quad \tau_H = \frac{T_{H,m} - T_H}{T_{H,m}} = 0,241$$

$$T_{WU,m} = \frac{T_A - T_E}{\ln\left(\frac{T_A}{T_E}\right)} = \frac{(363 - 333) \text{ K}}{\ln\left(\frac{363}{333}\right)} = 347,8 \text{ K} \quad \tau_{WU} = \frac{T_{WU,m} - T_W}{T_{WU,m}} = 0,186$$

$$\dot{E}_{zu} = \tau_H \cdot \dot{Q}_{zu} = 489,5 \text{ kW} \quad \dot{E}_{nutz} = \tau_{WU} \cdot \dot{Q}_{zu} = 377,8 \text{ kW}$$

$$\Delta E_v = \dot{E}_{zu} - \dot{E}_{nutz} = \underline{111,7 \text{ kW}}$$

$$b) \quad T_{Hm,b} = \frac{h'' - h'}{s'' - s'} = \frac{(2693,11 - 467,08) \text{ kJ/kg}}{(7,223 - 1,433) \text{ kJ/kg K}} = 384,5 \text{ K} \Rightarrow \tau_{H,b} = 0,264$$

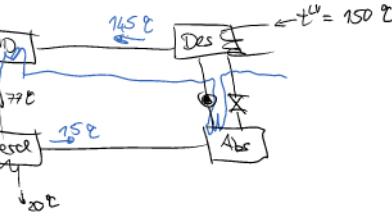
$$\dot{Q}_{zu,b} = m_D \cdot (h'' - h') = 2003,43 \text{ kW}$$

$\tau_{WU}$  bleibt unverändert.

$$\Delta E_{v,b} = (\tau_{H,b} - \tau_{WU}) \cdot 2003,43 \text{ kW} = \underline{156,3 \text{ kW}}$$

↪ Der Energieverlust steigt!

$$\max \text{ LiBr} = 65 \text{ Ma\%} \\ \Rightarrow \min H_2O = f_{AL} = 0,35$$



- a) Diagramm:  $t_1 = 77$  °C  
 $\Rightarrow t_{FW,in} = 72$  °C
- b) Bedingung: Damit al zur Absorption fröhig ist, darf sie  $\approx 68$  °C nicht überschreiten. Das Frischwasser muss also  $< 68$  °C sein (siehe Punkt Z im Diagramm)

Wasser dampftafel benötigt!

Ein Biogasfermenter wird konstant auf  $t_F = 35^\circ\text{C}$  gehalten. Es besteht ein Wärmeverluststrom von  $\dot{Q}_v = 20 \text{ kW}$ . Um die Wärmeverluste auszugleichen, wird in einem Wärmeübertrager Wasser von  $80^\circ\text{C}$  auf  $40^\circ\text{C}$  abgekühlt.

Berechnen Sie die beiden Exergieverluste ( $t_u = 10^\circ\text{C}$ ).

Steigt der Gesamtexergieverlust, wenn die Temperatur in dem Fermenter auf  $45^\circ\text{C}$  erhöht wird? Begründen Sie.

$$T_F = \text{const.} = T_{Fm} = 308 \text{ K} \quad T_F = \frac{T_{Fm} - T_U}{T_{Fm}} = 0,081$$

$$\bar{T}_{m,WÜ} = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} = \frac{(353 - 313) \text{ K}}{\ln\left(\frac{353}{313}\right)} = 333 \text{ K} \quad T_{WÜ} = \frac{T_{m,WÜ} - T_U}{T_{m,WÜ}} = 0,15$$

$$\dot{E}_{v,F} = T_F \cdot \dot{Q}_v = \underline{1,62 \text{ kW}} \quad \dot{E}_{v,WÜ} = T_{WÜ} \cdot \dot{Q}_v = \underline{3 \text{ kW}}$$

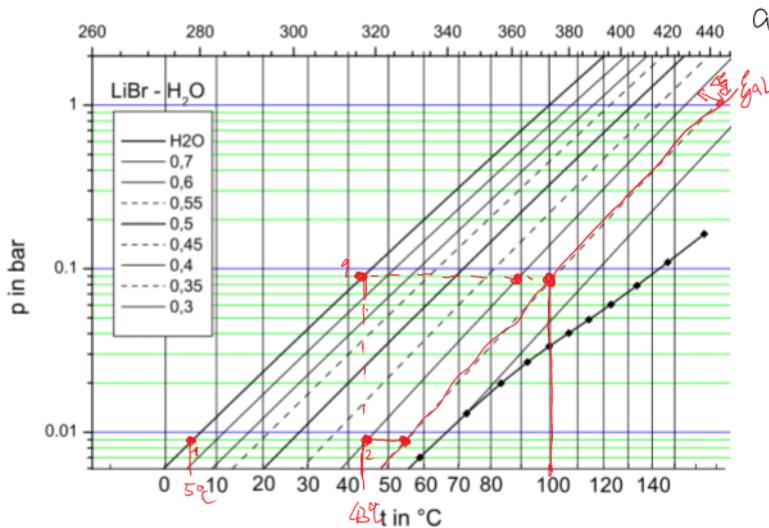
$$\bar{T}_{F,45^\circ\text{C}} = \frac{318 \text{ K} - 283 \text{ K}}{318 \text{ K}} = 0,11 > \bar{T}_{F,35^\circ\text{C}} \Rightarrow \text{Exergieverlust steigt, da Energie des Systems steigt (mit denselben Wärmeverlusten)}$$

In einer Absorptionskältemaschine (Li-Br -  $\text{H}_2\text{O}$ ) wird ein Kühlraum von  $15^\circ\text{C}$  auf  $8^\circ\text{C}$  abgekühlt. Als Heizmedium steht kondensierender Dampf mit  $103^\circ\text{C}$  zur Verfügung. Der Anteil Wasser in der Lösung soll mindestens 35 Ma% betragen. In jedem WÜ ist eine minimale Temperaturdifferenz von 3 K zu berücksichtigen.

a) Welche Temperatur muss das Kühlwasser haben, wenn  $\Delta\xi = 5\%$  betragen soll?

b) Ermitteln Sie den Lösungsumlauf.

c) Wie hoch ist die Absorberwärme pro kg Dampf, wenn  $h_{aL} = 180 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_{rL} = 135 \text{ kJ/kg}$  und  $h_{Dampf} = 2572 \text{ kJ/kg}$ ?



$$\begin{aligned} a) \quad t_1 &= 8^\circ\text{C} - 3 \text{ K} = 5^\circ\text{C} \\ t_2 &= 103^\circ\text{C} - 3 \text{ K} = 100^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Diagramm: } t_{q/2} &= 43^\circ\text{C} \\ \rightarrow t_{KW} &= \underline{40^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

$$b) \quad \text{Li-Br} \rightarrow \xi_{q0} = 1$$

$$\Rightarrow f = \frac{1 - \xi_{q0}}{\Delta\xi} = \underline{13}$$

$$\begin{aligned} c) \quad \text{ABS} &\xrightarrow{h_D} \text{Vahal} \xrightarrow{h_{hL}} q_{Abs} + h_{rL} = h_{aL} + h_D \\ q_{Abs} &= h_{aL} + h_D - h_{rL} = \underline{2617 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

