

In einem Biomasseheizkessel wird ein Rauchgasstrom $\dot{m}_G = 0,33 \text{ kg/s}$ ($c_p = 1,2 \text{ kJ/(kg K)}$) von $t_1 = 1480^\circ\text{C}$ auf $t_2 = 220^\circ\text{C}$ isobar ($p = p_U$) abgekühlt. Dabei wird ein Wassermassenstrom bei $t^{LV} = 200^\circ\text{C}$ gerade vollständig verdampft ($\Delta h^{LV} = 1940 \text{ kJ/kg}$)

Welcher Dampfstrom kann verdampft werden?

Welcher Exergieverluststrom $\Delta \dot{E}_V$ tritt bei der Wärmeübertragung auf? ($T_U = 273,15 \text{ K}$)

Geben Sie ein Senkey-Diagramm für Energie- und Exergiefluss an.

| | | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|--|
| $\dot{m}^\circ G := 0.33 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ | $T_1 := 1488^\circ\text{C} + T_0$ | $T_2 := 220^\circ\text{C} + T_0$ | $c_{pG} := 1.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | $T_U := 0^\circ\text{C} + T_0$ $T_U = 273.15 \text{ K}$ |
| $p_U := p_0$ | $T_{LV} := 200^\circ\text{C} + T_0$ | $\Delta L V_h := 1939 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $p_2 := \text{stmi_psatt}(200)$ | $p_2 = 1.555 \times 10^3$ |

Daten aus der Wasserdampf tabel:

| | | | |
|---|--|---|--|
| $h'_{p2} := \text{stmi_hfp}(p_2) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $h''_{p2} := \text{stmi_hgp}(p_2) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | | |
| $h'_{p2} = 852.4 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $h''_{p2} = 2790.9 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $h''_{p2} - h'_{p2} = 1938.6 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $\Delta L V_h = 1939 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ |
| $s'_{p2} := \text{stmi_sfp}(p_2) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | $s''_{p2} := \text{stmi_sgp}(p_2) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | | |
| $s'_{p2} = 2.3 \frac{1}{\text{K}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $s''_{p2} = 6.4 \frac{1}{\text{K}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $s''_{p2} - s'_{p2} = 4.097 \frac{1}{\text{K}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $\Delta L V_s := 4.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |

Energiebilanz zur Ermittlung des Dampfstroms

| | | |
|---|---|--|
| $Q^\circ G := \dot{m}^\circ G \cdot c_{pG} \cdot (T_1 - T_2)$ | $c_{pG} \cdot (T_1 - T_2) = 1521.6 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ | $Q^\circ G = 502.1 \cdot \text{kW}$ |
| $Q^\circ D := Q^\circ G$ | $\dot{m}^\circ D := \frac{Q^\circ D}{h''_{p2} - h'_{p2}}$ | $\dot{m}^\circ D = 0.259 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ |

Energiebilanz über Stoffströme

| | | | |
|---|--|---|-------------------------------------|
| $H^\circ 1 + H^{\circ} De = H^\circ 2 + H^{\circ} Da$ | | | |
| $H^{\circ} De := \dot{m}^\circ D \cdot (h'_{p2})$ | $H^{\circ} De = 220.8 \text{ kW}$ | $H^\circ 1 := \dot{m}^\circ G \cdot c_{pG} \cdot (T_1 - T_0)$ | $H^\circ 1 = 589.2 \cdot \text{kW}$ |
| $H^{\circ} Da := \dot{m}^\circ D \cdot (h''_{p2})$ | $H^{\circ} Da = 722.9 \cdot \text{kW}$ | $H^\circ 2 := \dot{m}^\circ G \cdot c_{pG} \cdot (T_2 - T_0)$ | $H^\circ 2 = 87.1 \cdot \text{kW}$ |

Energieflussbild über Wärme- oder Stoffströme:

| | | | |
|--------------------------|--|---|---|
| $Q^\circ D := Q^\circ G$ | $H^\circ 1 - H^\circ 2 = 502.1 \text{ kW}$ | $H^\circ 1 + H^{\circ} De = 810 \text{ kW}$ | $H^\circ 2 + H^{\circ} Da = 810 \text{ kW}$ |
|--------------------------|--|---|---|

Exergiebilanz über Wärmeströme

$$E^{\circ}QG = E^{\circ}QD + \Delta E^{\circ}verl$$

Exergie der vom Gas abgegebenen Wärme mit Mitteltemperatur

$$\Delta H^{\circ}G := Q^{\circ}G$$

$$T_{mG} := \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

$$T_{mG} = 996.1 \text{ K}$$

$$T_{mG} - T_0 = 723.0^{\circ}\text{C}$$

$$E^{\circ}QG := \frac{T_{mG} - T_U}{T_{mG}} \cdot Q^{\circ}G$$

$$E^{\circ}QG = 364.4 \cdot \text{kW}$$

Exergie der vom Dampf aufgenommenen Wärme, $T = \text{const} = T_{LV}$

$$E^{\circ}QD := \frac{T_{LV} - T_U}{T_{LV}} \cdot Q^{\circ}D$$

$$E^{\circ}QD = 212.2 \cdot \text{kW}$$

$$\Delta E^{\circ}verl := E^{\circ}QG - E^{\circ}QD$$

$$\bullet = \left(\frac{T_{mG} - T_U}{T_{mG}} - \frac{T_{LV} - T_U}{T_{LV}} \right) \cdot Q^{\circ}D$$

$$\Delta E^{\circ}verl = 152.2 \cdot \text{kW}$$

Exergieflussbild über Wärmeströme:

$$E^{\circ}QG = E^{\circ}QD + \Delta E^{\circ}verl$$

Exergiebilanz über Stoffströme

$$E^{\circ}1 + E^{\circ}De = E^{\circ}2 + E^{\circ}Da + \Delta E^{\circ}verl$$

Exergieänderung Gas:

$$e_1 := c_{pG} \cdot (T_1 - T_U) - T_U \cdot \left(c_{pG} \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_U}\right) \right)$$

$$e_1 = 1174.7 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E^{\circ}1 := e_1 \cdot m^{\circ}G$$

$$E^{\circ}1 = 387.7 \cdot \text{kW}$$

$$e_2 := c_{pG} \cdot (T_2 - T_U) - T_U \cdot \left(c_{pG} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_U}\right) \right)$$

$$e_2 = 70.35 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E^{\circ}2 := e_2 \cdot m^{\circ}G$$

$$E^{\circ}2 = 23.2 \cdot \text{kW}$$

$$\Delta E^{\circ}G := m^{\circ}G \cdot \left[c_{pG} \cdot (T_1 - T_2) - T_U \cdot \left(c_{pG} \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) \right) \right]$$

$$\bullet = E^{\circ}1 - E^{\circ}2$$

$$\bullet = E^{\circ}QG$$

$$\Delta E^{\circ}G = 364.4 \cdot \text{kW}$$

Exergieänderung Dampf (nur Verdampfung, $T_{LV} = \text{const.}$)

$$\Delta E^{\circ}D := m^{\circ}D \cdot [h'p_2 - h'p_2 - T_U \cdot (s'p_2 - s'p_2)]$$

$$\bullet = E^{\circ}QD$$

$$\Delta E^{\circ}D = 212.3 \cdot \text{kW}$$

$$\Delta E^{\circ}verl := (E^{\circ}1 - E^{\circ}2) - \Delta E^{\circ}D$$

geringfügige Differenz wegen $\Delta L_{Vh} = 2110$

$$\Delta E^{\circ}verl = 152.2 \cdot \text{kW}$$

nur Zusatz!!! für Exergieflussbild mit Stoffströmen

Berechnung der Dampferexergie schwierig, weil Umgebungszustand (flüssiges Wasser bei T_U , p_U) festgelegt werden muss
Werte aus ausführlicher Wasserdampf-Tafel (oder hier Zustandsgleichung), Zustand liegt nicht auf der Siedelinie!

$$h_{UW} := \text{stmi_hpt} \left(\frac{p_U}{\text{kPa}}, \frac{T_U - T_0}{^\circ\text{C}} \right) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{UW} = 0.062 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_{UW} := \text{stmi_spt} \left(\frac{p_U}{\text{kPa}}, \frac{T_U - T_0}{^\circ\text{C}} \right) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$s_{UW} = -0.146 \frac{1}{\text{K}} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$e_U := h_{UW} - h_U - T_U \cdot (s_{UW} - s_U)$$

$$e_U = 0 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$e_{De} := h'_{p2} - h_{UW} - T_U \cdot (s'_{p2} - s_{UW})$$

$$e_{De} = 215.6 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E^{\circ}De := m^{\circ}D \cdot e_{De}$$

$$E^{\circ}De = 55.9 \cdot \text{kW}$$

$$e_{Da} := h''_{p2} - h_{UW} - T_U \cdot (s''_{p2} - s_{UW})$$

$$e_{Da} = 1035.1 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E^{\circ}Da := m^{\circ}D \cdot e_{Da}$$

$$E^{\circ}Da = 268.1 \cdot \text{kW}$$

$$E^{\circ}Da - E^{\circ}De = 212.3 \text{ kW}$$

$$E^{\circ}1 + E^{\circ}We = E^{\circ}2 + E^{\circ}Wa + \Delta E^{\circ}verl$$

$$\Delta E^{\circ}verl := (E^{\circ}1 - E^{\circ}2) - (E^{\circ}Da - E^{\circ}De)$$

$$\Delta E^{\circ}G = \Delta E^{\circ}D$$

$$\Delta E^{\circ}verl = 152.2 \cdot \text{kW}$$

Exergieflussbild über Stoffströme

$$E^{\circ}1 + E^{\circ}De = E^{\circ}2 + E^{\circ}Da + \Delta E^{\circ}verl$$

