

a) Nach **Erg. 13** mit $x = 1,4$

$$\pi_{\text{opt}} = (T_3/T_1)^{x/(2x-2)} = (1023/288)^{1,4/(2,8-2)}$$

$$\pi_{\text{opt}} = 9,2 \quad \text{also vorhandenes } \pi \text{ günstig!}$$

b) $w_{t,K,s} = \Delta h_{K,s} = \frac{x}{x-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\pi^{(x-1)/x} - 1 \right]$

$$w_{t,K,s} = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 288 \cdot \left[9^{(1,4-1)/1,4} - 1 \right] \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K} \right]$$

$$w_{t,K,s} = 252684 \text{ J/kg} \approx 253 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,T,s} = \Delta h_{T,s} = \frac{x}{x-1} \cdot R \cdot T_3 \cdot \left[1 - (1/\pi)^{(x-1)/x} \right]$$

$$w_{t,T,s} = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 1023 \cdot \left[1 - (1/9)^{(1,4-1)/1,4} \right]$$

$$w_{t,T,s} = 479093 \text{ J/kg} \approx 479 \text{ kJ/kg}$$

Mit den Werten ergibt sich:

$$\Delta h_{N,s} = \Delta h_{T,s} - \Delta h_{K,s} = w_{t,T,s} - w_{t,K,s}$$

$$\Delta h_{N,s} = 479 - 253 = 226 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{A,th} = \eta_{A,s} = \Delta h_{N,s} / \Delta h_{T,s} = 226/479 = 0,47$$

Oder nach **Erg. 13**:

$$\eta_{A,th} = 1 - (1/\pi)^{(x-1)/x} = 1 - (1/9)^{(1,4-1)/1,4}$$

$$\eta_{A,th} = 0,466 \approx 0,47 \quad (\text{wie zuvor!})$$

c) Nach Unterabschnitt 11.4.4

Rauchgaswerte: $x = 1,37$; $R = 277 \text{ J/(kg K)}$

Erwartete Wirkungsgrade bei
 vielstufigem Axialverdichter $\eta_{K,s} = 0,88$
 mehrstufiger Axialturbine $\eta_{T,s} = 0,9$

Kompressor: $w_{t,K} = w_{t,K,s} / \eta_{K,s}$ mit

$$w_{t,K,s} = \Delta h_{K,s} \approx 253 \text{ kJ/kg} \quad (\text{nach Frage a})$$

$$w_{t,K} = 253/0,88 = 287,5 \text{ kJ/kg}$$

Turbine: $w_{t,T} = w_{t,T,s} \cdot \eta_{T,s}$

$$w_{t,T,s} = \Delta h_{T,s} = \frac{x}{x-1} \cdot R \cdot T_3 \cdot \left[1 - (1/\pi_T)^{(x-1)/x} \right] \quad \text{wobei}$$

$$\pi_T = p_3/p_4$$

$$p_4 = p_1 = 1 \text{ bar}$$

$$p_3 = p_2 - \Delta p_{BK} = p_2 - 0,05 \cdot p_2 = 0,95 \cdot p_2$$

$$p_3 = 0,95 \cdot \pi_K \cdot p_1 = 0,95 \cdot 9 \cdot 1 = 8,55 \text{ bar}$$

$$\pi_T = 8,55/1 = 8,55$$

$$w_{t,T,s} = \frac{1,37}{1,37-1} \cdot 277 \cdot 1023 \cdot \left[1 - (1/8,55)^{(1,37-1)/1,37} \right]$$

$$w_{t,T,s} = 461511 \text{ J/kg} \approx 461,5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,T} = 461,5 \cdot 0,9 = 415 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,N} = w_{t,T} - w_{t,K} = 415 - 287,5 = 127,5 \text{ kJ/kg}$$

d)

Pkt. 1, Kompressoreintritt: $p_1 = 1 \text{ bar}$; $t_1 = 15^\circ \text{C}$

Pkt. 2, Kompressorausstritt: $p_2 = \pi_K \cdot p_1 = 9 \text{ bar}$

$$\Delta T_K = T_2 - T_1 = \eta_{K,s}^{-1} \cdot T_1 \cdot \left[\pi^{(x-1)/x} - 1 \right] \quad (\text{Erg. 13})$$

$$= 288 \cdot 0,88^{-1} \cdot \left[9^{(1,37-1)/1,37} - 1 \right] [\text{K}] = 265 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 + \Delta T_K = 288 + 265 = 553 \text{ K} \rightarrow t_2 = 278^\circ \text{C}$$

Pkt. 3, Turbineneintritt: $p_3 = 8,55 \text{ bar}$; $t_3 = 750^\circ \text{C}$

Pkt. 4, Turbinenausstritt: $p_4 = p_1 = 1 \text{ bar}$

$$\Delta T_T = T_3 - T_4 = \eta_{T,s} \cdot T_3 \cdot \left[1 - (1/\pi_T)^{(x-1)/x} \right] \quad (\text{Erg. 13})$$

$$= 0,9 \cdot 1023 \cdot \left[1 - (1/8,55)^{(1,37-1)/1,37} \right] = 405 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 - \Delta T_T = 1023 - 405 = 618 \text{ K} \rightarrow t_4 = 345^\circ \text{C}$$

e) Nach Gl. (394.1) mit $T_3/T_2 = 1023/558 = 1,85$

$$\eta_g = \frac{(T_3/T_2) \cdot \eta_{T,s} - 1/\eta_{K,s}}{(T_3/T_2) - 1} = \frac{1,85 \cdot 0,9 - 1/0,88}{1,85 - 1} = 0,62$$

f) Mit geschätzt $\eta_{BK} = 0,96$ und $\eta_m = 0,98$ nach **Ab. 17.13**:

$$\eta_A = \eta_{A,th} \cdot \eta_g \cdot \eta_{BK} \cdot \eta_m = 0,47 \cdot 0,62 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,27$$

g) Mit $\dot{m}_T = 0,95 \cdot \dot{m}_K$ aus

$$P_N = \dot{m}_T \cdot w_{t,T} - \dot{m}_K \cdot w_{t,K} = \dot{m}_K \cdot (0,95 \cdot w_{t,T} - w_{t,K})$$

$$\dot{m}_K = \frac{P_N}{0,95 \cdot w_{t,T} - w_{t,K}} = \frac{8200}{0,95 \cdot 415 - 287,5} \left[\frac{\text{kW}}{\text{kJ/kg}} \right]$$

$$\dot{m}_K = 76,8 \text{ kg/s}$$

h) Nach Unterabschnitt 11.4.5.3:

$\dot{m}_{Lu,0} = 14,5 \text{ kgLu/kgBr}$ und $H_u = 42 \text{ MJ/kgBr}$ nach **Tab. 11-9**. Hieraus folgt die vom Kraftstoff auf die theoretische Verbrennungsluftmenge bezogene Wärme:

$$q_{BK,th} = \frac{H_u}{\dot{m}_{Lu,0}} = \frac{42000}{14,5} \left[\frac{\text{kJ/kgBr}}{\text{kgLu/kgBr}} \right] \approx 2897 \text{ kJ/kgLu}$$

Dagegen beträgt die der Verbrennungsluft tatsächlich zugeführte Wärme nach **Erg. 13**:

$$q_{BK} = 996 \cdot (T_3 - T_2) + 0,11 \cdot (T_3^2 - T_2^2) [\text{J/kgLu}]$$

$$q_{BK} = 996 \cdot (1023 - 553) + 0,11 \cdot (1023^2 - 553^2)$$

$$q_{BK} = 549599 \text{ J/kgLu} \approx 549,6 \text{ kJ/kgLu}$$

Damit die zulässige Rauchgastemperatur nicht überschritten wird, muß die Luftüberschußzahl λ betragen:

$$\lambda = q_{BK,th} / q_{BK} = 2897/549,6 = 5,27 \approx 5,3$$

i) $\dot{Q}_{Br} = q_{BK} \cdot \dot{m}_{Lu}$ mit $\dot{m}_{Lu} = \dot{m}_T = 0,95 \cdot \dot{m}_K$

$$\dot{Q}_{Br} = 549,6 \cdot 0,95 \cdot 76,8 [\text{kJ/kg} \cdot \text{kg/s}]$$

$$\dot{Q}_{Br} = 40098 \text{ kJ/s} \approx 40 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{Br} = \frac{\dot{Q}_{Br}}{H_u \cdot \eta_{BK}} = \frac{40098}{42000 \cdot 0,96} \left[\frac{\text{kJ/s}}{\text{kJ/kg}} \right] = 0,995 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_{Lu}} = \frac{\dot{m}_{Lu} + \dot{m}_{Br}}{\dot{m}_{Lu}} = \frac{76,8 + 0,995}{76,8} = 1,01296 \quad \text{Oder}$$

$$\frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_{Lu}} = \frac{\lambda \cdot \dot{m}_{Lu,0} + 1 \text{ kg}}{\lambda \cdot \dot{m}_{Lu,0}} = \frac{5,3 \cdot 14,5 + 1}{5,3 \cdot 14,5} = 1,0130$$

$$j) \quad q_{WT} = \bar{c}_p \cdot [(t_4 - \Delta t) - t_2]$$

Mit näherungsweise $\bar{c}_p \approx c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{grd})$

$$q_{WT} = 1005 \cdot [(345 - 50) - 278] \left[\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \cdot ^\circ\text{C} \right]$$

$$q_{WT} = 17085 \text{ J/kg} \approx 17,1 \text{ kJ/kg} \quad \text{Damit}$$

$$\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_T \cdot q_{WT} = 0,95 \cdot \dot{m}_K \cdot q_{WT}$$

$$\dot{Q}_{WT} = 0,95 \cdot 78,6 \cdot 17,1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 1277 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{WT} \approx 1,28 \text{ MW}$$

Brennstoffeinsparung:

$$\dot{Q}_{WT}/H_u = 1,28/42 \left[\frac{\text{MW}}{(\text{MWs/kg})} \right] = 0,030 \text{ kg/s}$$

Das sind ca. 3 % des Brennstoffbedarfs ohne Wärmetauscher. Der Einsatz eines (fast immer aufwendigen) Wärmetauschers lohnt somit kaum.

$$k) \quad \eta_{A,th} = 1 - \pi^{(\gamma-1)/\gamma} \cdot (T_1/T_3) \quad (\text{Ab. 17.13})$$

$$\underline{\eta_{A,th}} = 1 - 9^{(1,4-1)/1,4} \cdot (288/1023) = \underline{0,472}$$