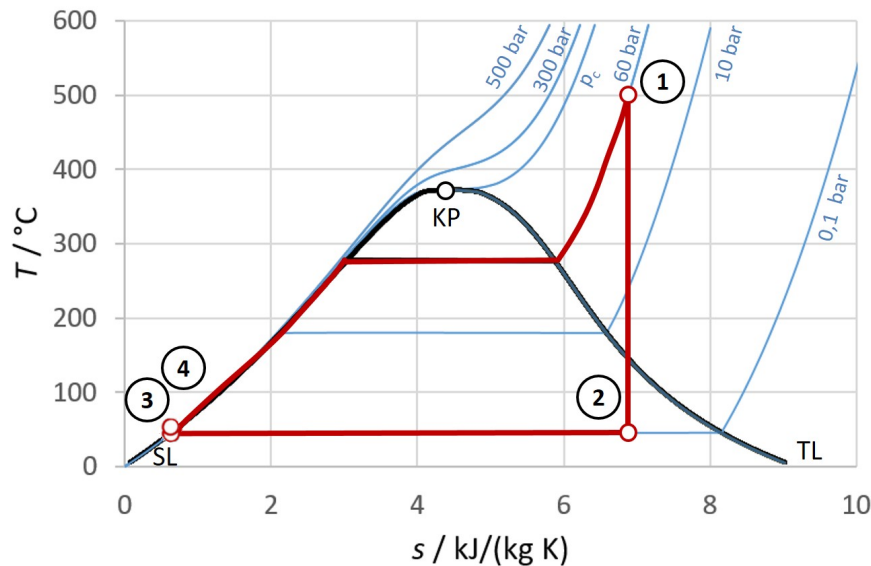


### Aufgabe 13.1 – Lösung

a)



|                 | ①             | ②   | ③               | ④  |
|-----------------|---------------|---|-----------------|----|
| $T$ [°C]        | 500           | $T_s(0.1 \text{ bar}) = 45.81^\circ\text{C}$ (Tab.) | $T_3 = T_2$     | -  |
| $p$ [bar]       | 60            | 0.1   | 0.1             | 60 |
| $h$ [kJ/kg]     | 3423 (Tab.)   | ?   | 191.81 (Tab.)   | ?  |
| $s$ [kJ/(kg K)] | 6.8824 (Tab.) | $s_2 = s_1$ (rev.ad.)                               | 0.649 24 (Tab.) | -  |

b) Die genutzte spezifische technische Arbeit ist die Summe aus den spezifischen technischen Arbeiten, die über die Systemgrenzen gehen:

$$w_{\text{Nutz}} = w_{t,12} + w_{t,34} \quad (1)$$

Dabei wissen wir bereits, dass  $w_{t,34}$  positiv ist (in den Prozess hineingeht). In der Praxis wird die eingespeiste Leistung  $P_{34}$  direkt aus der gewonnenen Leistung  $P_{12}$  entnommen, verkleinert also die Nutzleistung. Daher beziehen wir  $w_{t,34}$  in  $w_{\text{Nutz}}$  mit ein.

①  $\rightarrow$  ②:

$$1. \text{ HS: } \dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \iff w_{t,12} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$\text{rev.ad.: } s_1 = s_2 \implies \underbrace{s'(0.1 \text{ bar})}_{=0.649\,24 \text{ kJ/(kg K)}} < \underbrace{s_2}_{=6.8824 \text{ kJ/(kg K)}} < \underbrace{s''(0.1 \text{ bar})}_{=8.148\,75 \text{ kJ/(kg K)}} \quad (3)$$

$\implies$  ② liegt im Zweiphasengebiet

Dampfmassenanteil in ②:

$$x_2 = \frac{s_1 - s'(0.1 \text{ bar})}{s''(0.1 \text{ bar}) - s'(0.1 \text{ bar})} \quad (4)$$

$$= \frac{6.8824 \text{ kJ/(kg K)} - 0.649 24 \text{ kJ/(kg K)}}{8.148 75 \text{ kJ/(kg K)} - 0.649 24 \text{ kJ/(kg K)}} = 0.8311 \quad (5)$$

Spezifische Enthalpie in ② über  $x_2$  berechnen:

$$h_2 = h(0.1 \text{ bar}, x_2) = h'(0.1 \text{ bar}) + x_2 \cdot (h''(0.1 \text{ bar}) - h'(0.1 \text{ bar})) \quad (6)$$

$$= 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.8311 \cdot \left( 2583.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 2179.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \boxed{w_{t,12}} = h_2 - h_1 = 2179.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3423 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{-1243.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (8)$$

③  $\longrightarrow$  ④:

$$1. \text{ HS: } \dot{Q}_{34} + P_{34} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) \iff w_{t,34} = h_4 - h_3 \quad (9)$$

$$h_3 \text{ aus Tabelle: } h_3 = h'(0.1 \text{ bar}) = 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (10)$$

$$h_4 \text{ aus 1.HS: } \dot{Q}_{41} + P_{41} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \implies q_{41} = h_1 - h_4 \quad (11)$$

$$\iff h_4 = h_1 - q_{41} = 3423 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3225 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 198 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \boxed{w_{t,34}} = h_4 - h_3 = 198 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 191.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{6.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \boxed{w_{\text{Nutz}}} = w_{t,12} + w_{t,34} = -1243.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 6.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{-1236.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (14)$$

Anmerkung: In der Lösung oben wird zur Berechnung von  $w_{t,34}, w_{\text{Nutz}}$  der 1. HS zunächst um die Pumpe, dann um den Dampferzeuger ausgewertet. Alternativ könnte der 1. HS auch um Pumpe und Dampferzeuger zusammen ausgewertet werden.  
 $\implies q_{41} + w_{34} = h_1 - h_3.$

c)

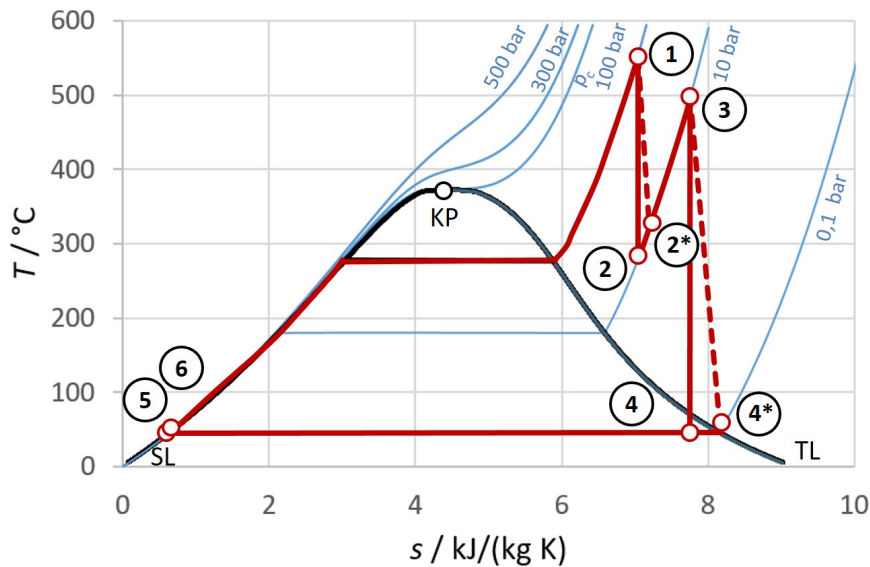
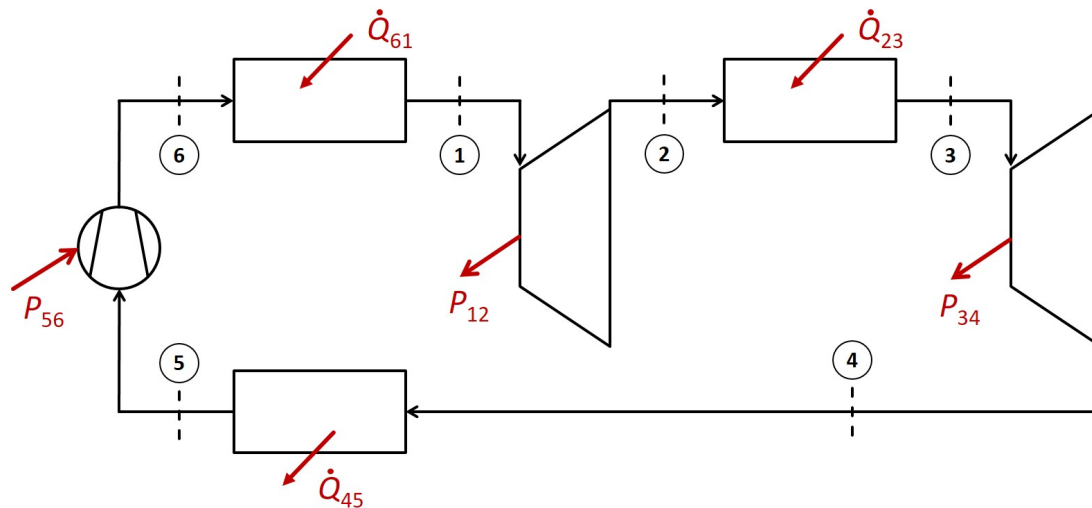
$$\boxed{\eta_{\text{th}}} = \frac{|P_{\text{Nutz}}|}{\dot{Q}_{41}} = \frac{\dot{m} \cdot |w_{\text{Nutz}}|}{\dot{m} \cdot q_{41}} = \frac{|-1236.93 \text{ kJ/kg}|}{3225 \text{ kJ/kg}} = \boxed{38.35 \%} \quad (15)$$

d)

$$\boxed{\eta_{\text{ex}}} = \frac{|P_{\text{Nutz}}|}{\dot{E}_{Q_{41}}} = \frac{\dot{m} \cdot |w_{\text{Nutz}}|}{\dot{m} \cdot e_{Q_{41}}} = \frac{|w_{\text{Nutz}}|}{\left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right) \cdot q_{41}} \quad (16)$$

$$= \frac{1236.93 \text{ kJ/kg}}{\left(1 - \frac{(20 + 273.15) \text{ K}}{(244.22 + 273.15) \text{ K}}\right) \cdot 3225 \text{ kJ/kg}} = \boxed{88.5 \%} \quad (17)$$

### Aufgabe 13.2 – Lösung



Stoffdaten von Wasser:

| $T$ [°C] | $p$ [bar] | $h'$ [kJ/kg] | $h''$ [kJ/kg] | $s'$ [kJ/(kg K)] | $s''$ [kJ/(kg K)] |
|----------|-----------|--------------|---------------|------------------|-------------------|
| 179.88   | 10.00     | 762.52       | 2777.1        | 2.138 06         | 6.585 02          |
| 41.51    | 0.08      | 173.85       | 2576.2        | 0.592 51         | 8.227 30          |
|          |           |              | $h$ [kJ/kg]   |                  | $s$ [kJ/(kg K)]   |
| 45.00    | 0.08      |              | 2582.9        |                  | 8.2486            |
| 50.00    | 0.08      |              | 2592.5        |                  | 8.3079            |
| 210      | 10.00     |              | 2852.2        |                  | 6.7456            |
| 220      | 10.00     |              | 2875.5        |                  | 6.7934            |
| 500      | 10.00     |              | 3479.0        |                  | 7.7640            |
| 550      | 100.00    |              | 3501.9        |                  | 6.7584            |

|                 | ①             | ② (*)  | ③             | ④    | ⑤      | ⑥   |
|-----------------|---------------|--------|---------------|------|--------|-----|
| $T$ [°C]        | 550           | -      | 500           | -    | -      | -   |
| $p$ [bar]       | 100           | 10     | 10            | 0.08 | 0.08   | 100 |
| $h$ [kJ/kg]     | 3501.9 (Tab.) | ?      | 3479.0 (Tab.) | ?    | 173.85 | ?   |
| $s$ [kJ/(kg K)] | 6.7584 (Tab.) | 6.7584 | 7.7640 (Tab.) | -    | -      | -   |

(\*) Zustandspunkt ② liegt zwischen den beiden markierten Zeilen und muss interpoliert werden

a) Gesucht:  $w_{t,12}$ ,  $w_{t,34}$ ,  $x_4$ ,  $\eta_{th}$

①  $\rightarrow$  ②:

1. HS für stationäre Fließprozesse:

$$P_{12} + \cancel{\dot{Q}_{12}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (18)$$

$$\implies w_{t,12} = h_2 - h_1 \quad (19)$$

rev.ad. Zustandsänderung:  $s_2 = s_1 \rightarrow h_2$  kann durch lineare Interpolation ermittelt werden:

$$h_2 = \frac{(6.7584 - 6.7934) \text{ kJ}/(\text{kg K})}{(6.7456 - 6.7934) \text{ kJ}/(\text{kg K})} \cdot (2852.2 - 2875.5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2875.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (20)$$

$$= 2858.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\implies \boxed{w_{t,12}} = 2858.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3501.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{-643.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (21)$$

③  $\rightarrow$  ④:

1. HS für stationäre Fließprozesse:  $P_{34} + \cancel{\dot{Q}_{34}} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) \implies w_{t,34} = h_4 - h_3$

rev.ad. Zustandsänderung:  $s_4 = s_3 = 7.7640 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

$\rightarrow s'(0.08 \text{ bar}) < s_4 < s''(0.08 \text{ bar})$

$\rightarrow$  Der Zustandspunkt ④ liegt im Nassdampfgebiet.

$\rightarrow h_4$  kann über den Dampfmassenanteil  $x_4$  berechnet werden:

$$\boxed{x_4} = \frac{s_4 - s'(0.08 \text{ bar})}{s''(0.08 \text{ bar}) - s'(0.08 \text{ bar})} \quad (22)$$

$$= \frac{7.7640 \text{ kJ}/(\text{kg K}) - 0.59251 \text{ kJ}/(\text{kg K})}{8.22730 \text{ kJ}/(\text{kg K}) - 0.59251 \text{ kJ}/(\text{kg K})} = \boxed{0.9393} \quad (23)$$

$$h_4 = h(0.08 \text{ bar}, x_4) \quad (24)$$

$$= h'(0.08 \text{ bar}) + x_4 \cdot (h''(0.08 \text{ bar}) - h'(0.08 \text{ bar})) \quad (25)$$

$$= 173.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.9393 \cdot (2576.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 173.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = 2430.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (26)$$

$$\Rightarrow w_{t,34} = 2430.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3479.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{-1048.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (27)$$

⑤  $\rightarrow$  ⑥:

Zunächst  $w_{t,56}$  berechnen:

$$w_{t,56} = \int_5^6 v dp = v \cdot (p_6 - p_5) \quad (28)$$

( $v = \text{const.}$ , da flüssiges Wasser inkompressibel sein soll)

$$\Leftrightarrow w_{t,56} = 1.0085 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot (100 - 0.08) \cdot 10^5 \text{ Pa} = \boxed{10.08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (29)$$

Mit dem 1. HS kann  $h_6$  bestimmt werden:

$$1. \text{ HS: } P_{56} + \dot{Q}_{56} = \dot{m} \cdot (h_6 - h_5) \quad (30)$$

$$\Rightarrow w_{t,56} = h_6 - h_5 \quad (31)$$

$$\Rightarrow h_6 = h_5 + w_{t,56} = 173.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 10.08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 183.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (32)$$

⑥  $\rightarrow$  ①:

$$1. \text{ HS: } P_{61} + \dot{Q}_{61} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) \quad (33)$$

$$\Rightarrow q_{61} = h_1 - h_6 = 3501.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 183.93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{3317.97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (34)$$

②  $\rightarrow$  ③:

$$1. \text{ HS: } P_{23} + \dot{Q}_{23} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (35)$$

$$\Rightarrow q_{23} = h_3 - h_2 = 3479.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2858.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{620.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (36)$$

Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{|w_{t,12} + w_{t,34} + w_{t,56}|}{q_{61} + q_{23}} \quad (37)$$

$$= \frac{|-643.46 \text{ kJ/kg} - 1048.25 \text{ kJ/kg} + 10.08 \text{ kJ/kg}|}{3317.97 \text{ kJ/kg} + 620.56 \text{ kJ/kg}} = \boxed{42.7 \%} \quad (38)$$

b) Die Entspannung in der ND-Turbine verläuft nun irreversibel. Sie endet damit im Zustandspunkt ④\* (siehe  $T, s$ -Diagramm).

③  $\longrightarrow$  ④\*:

$$\eta_{S,T,34} = \frac{w_{t,34*}}{w_{t,34}} \quad (39)$$

$$\implies \boxed{w_{t,34*}} = \eta_{S,T,34} \cdot w_{t,34} = 0.85 \cdot (-1048.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = \boxed{-891.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (40)$$

$$1. \text{ HS: } \cancel{\dot{Q}_{34*}} + P_{34*} = \dot{m} \cdot (h_{4*} - h_3) \quad (41)$$

$$\implies w_{t,34*} = h_{4*} - h_3 \quad (42)$$

$$\implies \boxed{h_{4*}} = h_3 + w_{t,34*} = 3479.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 891.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \boxed{2588.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (43)$$

$h_{4*} > \underbrace{h''(0.08 \text{ bar})}_{=2576.2 \text{ kJ/kg(Tab.)}} \rightarrow \textcircled{4*} \text{ liegt nicht im Nassdampfgebiet.}$

$\rightarrow$  Lineare Interpolation bei  $p_4 = 0.08 \text{ bar}$  zwischen den Temperaturen  $45^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$  um  $T_{4*}$  zu erhalten:

$$\alpha = \frac{2588.0 \text{ kJ/kg} - 2592.5 \text{ kJ/kg}}{2582.9 \text{ kJ/kg} - 2592.5 \text{ kJ/kg}} \quad (44)$$

$$\implies \boxed{T_{4*}} = \alpha \cdot (45^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}) + 50^\circ\text{C} = \boxed{47.66^\circ\text{C}} \quad (45)$$