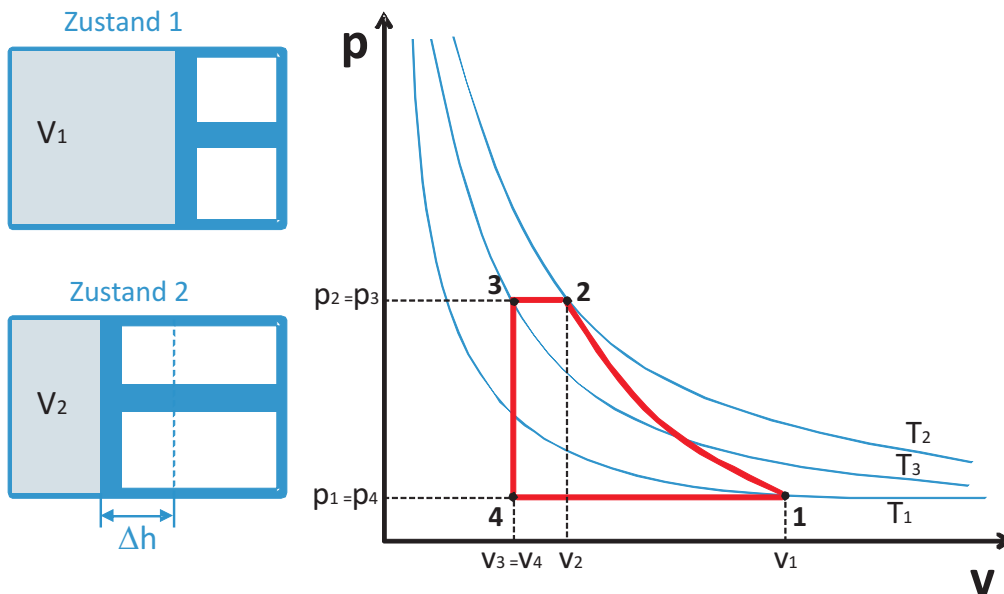


# Musterlösung Aufgabe 1: «Ideales Gas»

## I. TEILAUFGABE A) ⇒ 4 PUNKTE



## II. TEILAUFGABE B) ⇒ 4 PUNKTE

$$V_2 = V_1 - \Delta V = V_1 - \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \Delta h}{4} = 0.18850 - \frac{3.14 \cdot (0.4)^2 \cdot 0.90}{4} = 0.07540 \text{ m}^3,$$

$$1 \rightarrow 2 \text{ reversibel adiabat} \Rightarrow p \cdot V^\kappa = \text{const.}$$

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa \Rightarrow \text{mit } (p \cdot V = m \cdot R \cdot T) \Rightarrow \frac{T_1}{V_1} V_1^\kappa = \frac{T_2}{V_2} V_2^\kappa$$

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ oder}$$

$$\ln \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \Rightarrow (\kappa - 1) \cdot \ln \left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\kappa - 1 = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(V_1/V_2)} \Rightarrow \kappa = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(V_1/V_2)} + 1$$

$$\kappa = \frac{\ln(423.15/293.15)}{\ln(0.18850/0.07540)} + 1 = \boxed{1.4006}$$

### III. TEILAUFGABE C) ⇒ 2 PUNKTE

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}, R = c_p - c_v$$

$$R = c_p - \frac{c_p}{\kappa} = c_p \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) = 0.9085 \left(1 - \frac{1}{1.4006}\right) = 0.25984$$

$$R = \frac{R_m}{M} \Rightarrow M = \frac{R_m}{R} = \frac{8.31447}{0.25984} = \boxed{31.999 \text{ g/mol}} \Rightarrow O_2$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \Rightarrow m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1}$$

$$m = \frac{1,013 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}\right) \cdot 0,18850 (\text{m}^3)}{0,25984 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot 293,15 (\text{K})} = 2,5068 \cdot 10^2 \left(\frac{\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{m}^3}{\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}\right)$$

$$= 2,5068 \cdot 10^2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{m}^3}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \text{K}}\right) = \boxed{0.25068 \text{ kg}}$$

### IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 2 PUNKTE

$$4 \rightarrow 1 \text{ isobare Zustandsänderung} \Rightarrow \frac{T_4}{V_4} = \frac{T_1}{V_1} \Rightarrow T_4 = \frac{T_1 \cdot V_4}{V_1}$$

$$V_4 = V_3 \text{ (isochore Zustandsänderung)}$$

$$2 \rightarrow 3 \text{ isobare Zustandsänderung} \Rightarrow \frac{T_2}{V_2} = \frac{T_3}{V_3} \Rightarrow V_3 = \frac{T_3 \cdot V_2}{T_2}$$

$$\Rightarrow T_4 = \frac{T_1 \cdot V_4}{V_1} = \frac{T_1 \cdot V_3}{V_1} = \frac{T_1 \cdot T_3 \cdot V_2}{T_2 \cdot V_1}$$

$$T_4 = \frac{293,15 \cdot 373,15 \cdot 0,07540}{423,15 \cdot 0,18850} = \boxed{103,40 \text{ K}}$$

### V. TEILAUFGABE E) ⇒ 4 PUNKTE

1 → 2 reversibel adiabate Zustandsänderung:

Volumenänderungsarbeit:

$$(w_{12})_{rev.ad.} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \Rightarrow (W_{12})_{rev.ad.} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\kappa - 1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$(W_{12})_{rev.ad.} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 0,18850}{1,4006 - 1} \cdot \left(\frac{423,15}{293,15} - 1\right) = \boxed{21,138 \text{ kJ}}$$

Wärme:

$$(Q_{12})_{rev.ad.} = 0$$

2  $\rightarrow$  3 isobare Zustandsänderung:

Volumenänderungsarbeit:

$$(w_{23}) = \int_2^3 p dv = -p \cdot (v_3 - v_2)$$

$$\Rightarrow (W_{23}) = -p \cdot (V_3 - V_2) \quad \text{mit} \quad V_3 = \frac{T_3 \cdot V_2}{T_2}$$

$$(W_{23}) = -p \cdot \left( \frac{T_3 \cdot V_2}{T_2} - V_2 \right)$$

$$p_2 = p_3 = \frac{T_3 \cdot p_4}{T_4} = \frac{T_3 \cdot p_1}{T_4} = \frac{373,15 \cdot 1,013}{103,4} = 3,6556 \text{ bar}$$

$$(W_{23}) = -3,6556 \cdot 10^5 \cdot \left( \frac{373,15 \cdot 0,07540}{423,15} - 0,07540 \right) = \boxed{3,256 \text{ kJ}}$$

Wärme:

$$(Q_{23}) = m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 0,25068 \cdot 0,9085 \cdot (373,15 - 423,15) = \boxed{-11,387 \text{ kJ}}$$

3  $\rightarrow$  4 isochore Zustandsänderung:

Volumenänderungsarbeit:

$$(W_{34}) = 0$$

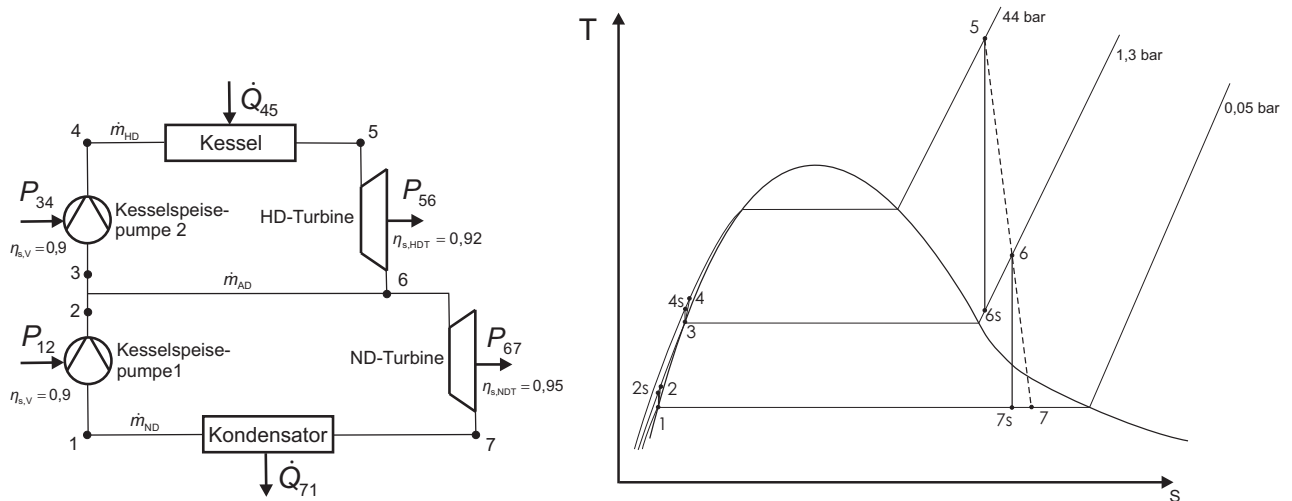
Wärme:

$$(Q_{34}) = m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3) = m \cdot \frac{c_p}{\kappa} \cdot (T_4 - T_3)$$

$$= 0,25068 \cdot \frac{0,9085}{1,4006} \cdot (103,40 - 373,15) = \boxed{-43,862 \text{ kJ}}$$

# Musterlösung Aufgabe 2: «Kreisprozess»

## I. TEILAUFGABE A) ⇒ 4 PUNKTE



## II. TEILAUFGABE B) ⇒ 2 PUNKTE

Gesucht ist die Temperatur  $t_4$  nach der Druckerhöhung der 2. Kesselspeisepumpe. Die Enthalpie  $h_3$  und die Entropie  $s_3$  können aus der Stoffdatentabelle direkt entnommen werden.

Aus  $s_{4s} = s_3 \Rightarrow h_{4s}$  wird durch Interpolation bzw. aus der Tabelle direkt

$h_{4s} = 453,6 \frac{kJ}{kg}$  ermittelt. Daraus ergibt sich für  $h_4$  aus

$$w_{t34} = \frac{1}{\eta} \cdot w_{34s} = \frac{1}{0,9} \cdot (453,6 - 449,1) \frac{kJ}{kg} = 5 \frac{kJ}{kg} \Rightarrow h_4 = h_3 + 5 \frac{kJ}{kg} = 454,1 \frac{kJ}{kg}$$

die Temperatur  $\Rightarrow T_4 = 107,54C$

## III. TEILAUFGABE C) ⇒ 1 PUNKTE

Gesucht ist der Massenstrom  $\dot{m}_{45}$  der nötig ist um den Wärmestrom  $\dot{Q}_{45}$  aufzunehmen.

$$\dot{Q}_{45} = \dot{m}_{45} \cdot (h_4 - h_5) \Rightarrow \dot{m}_{45} = \frac{\dot{Q}_{45}}{(h_4 - h_5)} = 600 \frac{kg}{s}$$

#### IV. TEILAUFGABE D) ⇒ 4 PUNKTE

Gesucht sei die Enthalpiebilanz der Vermischung des Massenstroms und das Verhältniss der Massenströme:  $\frac{\dot{m}_{ND}}{\dot{m}_{HD}}$ .

$$\dot{H}_3 = \dot{H}_6 + \dot{H}_2 \text{ und } \dot{m}_{AD} = \dot{m}_{HD} - \dot{m}_{ND} \implies$$

$$\dot{m}_{HD} \cdot h_3 = \dot{m}_{AD} \cdot h_6 + \dot{m}_{ND} \cdot h_2$$

$$\dot{m}_{HD} \cdot h_3 = (\dot{m}_{HD} - \dot{m}_{ND}) \cdot h_6 + \dot{m}_{ND} \cdot h_2$$

$$\dot{m}_{HD} \cdot h_3 = \dot{m}_{HD} \cdot h_6 - \dot{m}_{ND} \cdot h_6 + \dot{m}_{ND} \cdot h_2$$

$$\dot{m}_{HD} \cdot h_3 - h_6 = \dot{m}_{ND} \cdot h_2 - h_6 \implies$$

$$\frac{\dot{m}_{HD}}{\dot{m}_{ND}} = \frac{h_3 - h_6}{h_2 - h_6}$$

$h_6$  wird aus  $s_{6s} = s_5$  und über den Turbinenwirkungsgrad mit  $h_5$  berechnet.

$$\text{Aus Interpolation: } h_{6s} = 2759,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{s,HDT} = \frac{w_{t56}}{w_{t56s}} \implies w_{t56} = \eta_{s,HDT} \cdot w_{t56s} \implies h_5 - h_6 = \eta_{s,HDT} \cdot w_{t56s}$$

$$h_6 = h_5 - (\eta_{s,HDT} \cdot w_{t56s}) = 2841,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{\dot{m}_{HD}}{\dot{m}_{ND}} = \frac{h_3 - h_6}{h_2 - h_6} = \frac{(449,1 - 2841,43) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(138,0 - 2841,43) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,885$$

$$\implies \dot{m}_{ND} = \dot{m}_{HD} \cdot 0,885 = 530,95 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### V. TEILAUFGABE E) ⇒ 5 PUNKTE

Gesucht ist die Nutzleistung  $P_{Nutz}$

$$P_{Nutz} = P_{12} + P_{34} + P_{56} + P_{67}$$

$$P_{12} = \dot{m}_{ND} \cdot w_{t12} = 530,95 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (138,0 - 137,77) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 122,12 \text{ kW}$$

$$P_{34} = \dot{m}_{HD} \cdot w_{t34} = 600 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (454,1 - 449,1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3 \text{ MW}$$

$$P_{56} = \dot{m}_{HD} \cdot w_{t56} = 600 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (2841,43 - 3787,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -567,58 \text{ MW}$$

$$P_{67} = \dot{m}_{ND} \cdot w_{t12} = 530,95 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (2356,01 - 2841,43) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -257,73 \text{ MW}$$

$$P_{Nutz} = -822,2 \text{ MW}$$

Ermittlung von  $h_7$  erfolgt:

Aus  $s_6 = s_7 \implies s_6$  wird durch Interpolation bzw. aus der Tabelle über  $h_6$

$s_6 = 7,6414 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  ermittelt. Für diesen Entropiewert ergibt sich, dass die Entspannung ins Nassdampf-

gebiet erfolgt. (siehe Entropiewerte im Zweiphasengebiet bei 0,05 bar) Der Dampfgehalt nach dem Turbinenaustritt ergibt sich aus:

$$Z(T, x) = Z' + x(Z''(T) - Z'(T)) \implies x = \frac{Z(T, x) - Z'(T)}{Z''(T, x) - Z'(T)} \implies x = \frac{7,6413 - 0,4763}{8,393 - 0,4763} = 0,905$$

$$h_{7s} = 137,77 + 0,905 \cdot (2560,77 - 137,77) = 2330,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{t67} = \eta_{s,NDT} \cdot w_{67s} = 0,95 \cdot (h_6 - h_{7s}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \implies h_7 = h_6 - (\eta_{s,NDT} \cdot w_{t67s}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2356,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

## VI. TEILAUFGABE F) $\Rightarrow$ 3 PUNKTE

$$\eta_{th} = \frac{P_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} = 0,411 \implies 41,1\%$$

$$\eta_{ex} = \frac{P_{Nutz}}{\dot{E}_{zu}} = \frac{P_{Nutz}}{(1 - \frac{T_u}{T_a}) \cdot \dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{Nutz}}{\dot{m}_{HD}} (\Delta h_{45} - T S_{45}) \implies 88,1\%$$

# Musterlösung Aufgabe 3: CO<sub>2</sub> – Fass

## I. TEILAUFGABE A) → 3 PUNKTE

Masse an umgefülltem CO<sub>2</sub> (= Masse im Fass nach dem Umfüllen):

$$|\Delta m_{12}| = |m_{T,2} - m_{T,1}| = |(\rho_{T,2} - \rho_{T,1}) \cdot V| = |(0,81631 - 0,85631) \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 1000 \text{ dm}^3| = 40 \text{ kg} = m_F$$

Dichte des CO<sub>2</sub> im Fass nach dem Umfüllen:

$$\rho_{F,2} = \frac{m_F}{V_F} = \frac{40 \text{ kg}}{80 \text{ dm}^3} = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

$$\text{Dampfgehalt: } v = v' + x \cdot (v'' - v') \quad \Rightarrow \quad x = \frac{v - v'}{v'' - v'}$$

$$\Rightarrow x_{F,2} = \frac{\frac{1}{0,5} - \frac{1}{0,7734}}{\frac{1}{0,1942} - \frac{1}{0,7734}} = 0,183$$

## II. TEILAUFGABE B) → 4 PUNKTE

Innere Energie vor der Erwärmung:

$$u_{F,2} = u' + x_{F,2}(u'' - u') = 248,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,183 \cdot (378,4 - 248,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 272,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Innere Energie nach der Erwärmung:

$$\rho_{F,3} = \rho_{F,2} \quad \Rightarrow \quad x_{F,3} = \frac{\frac{1}{0,5} - \frac{1}{0,6553}}{\frac{1}{0,28911} - \frac{1}{0,6553}} = 0,2452$$

$$\Rightarrow u_{F,3} = 279,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,2452 \cdot (357,4 - 279,1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 298,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow Q_{23} = m_F(u_{F,3} - u_{F,2}) = 40 \text{ kg} \cdot (298,3 - 272,27) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1041,2 \text{ kJ}$$

## III. TEILAUFGABE C) → 3 PUNKTE

Masse der Flüssigkeit nach der Erwärmung:

$$m_{F,3,fl} = (1 - x_{F,3})m_F = (1 - 0,2452) \cdot 40 \text{ kg} = 30,192 \text{ kg}$$

Volumen der Flüssigkeit nach der Erwärmung:  $V_{F,3,fl} = \frac{m_{F,3,fl}}{\rho_{F,3}} = \frac{30,192 \text{ kg}}{0,6553 \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}}} = 46,07 \text{ dm}^3$

Spiegelhöhe nach der Erwärmung:

$$z_3 = \frac{V_{F,3,fl}}{A_F} \quad \text{wobei: } A_F = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 12,566 \text{ dm}^2$$

$$\Rightarrow z_3 = \frac{46,07 \text{ dm}^3}{12,566 \text{ dm}^2} = 3,667 \text{ dm}$$

#### IV. TEILAUFGABE D) → 3 PUNKTE

Umgefüllte Masse:  $\Delta m_{F,34} = m_{F,3} - m_{F,4}$

$$\text{mit: } m_{F,4} = \rho_{F,4} \cdot V_F = 0,21108 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 80 \text{ dm}^3 = 16,89 \text{ kg}$$

$$\text{Entnahmemassenstrom: } \dot{m} = \frac{\Delta m_{F,34}}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{\Delta m_{F,34}}{\dot{m}} = \frac{(40 - 16,89) \text{ kg}}{0,2645 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 87,37 \text{ h}$$

#### V. TEILAUFGABE E) → 2 PUNKTE

p,v - Diagramm für CO<sub>2</sub>

