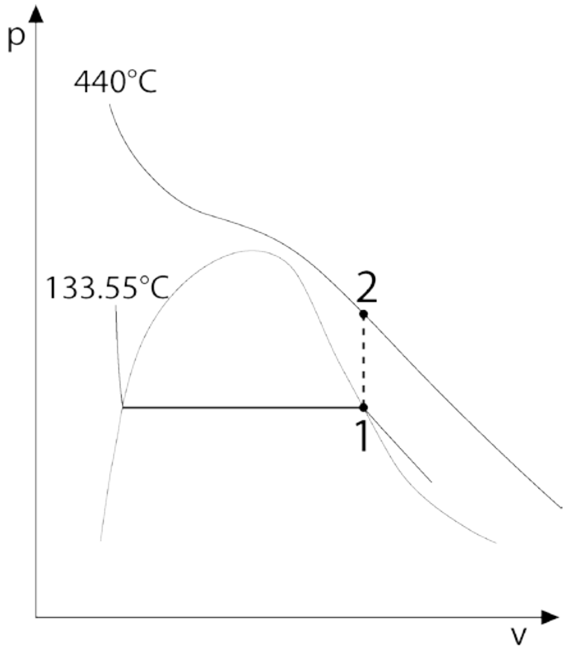
Thermodynamik I, Wi11
Musterlösung

Aufgabe 1

a) p-v-Diagramm Wasserdampf:



b) Druck des Wasserdamfs $p_{2,w}$:

$1 \rightarrow 2$:

Tabelle A-4 bei 3 bar:

$$v_1 = 0.606 \frac{m^3}{kg} = v_2 ,$$

Durch Interpolation bei 440°C zwischen p= 5 bar und p= 7 bar (A-4):

$p_{2,w}$= 5.519 bar mit $v_{5\,bar}$= 0.6548 m^3/kg und $v_{7\,bar}$= 0.4667 m^3/kg

c) Wärmemenge Q_w über den 1. HS durch Interpolation aus Tab. A-4:

$$Q_w = m_w \left(u_{2,w} - u_{1,w} \right) = \frac{V}{v_1} \left(u_{2,w} - u_{1,w} \right) =$$

$$= \frac{1 m^3}{0.606 \frac{m^3}{kg}} \left(3028.1 \frac{kJ}{kg} - 2543.6 \frac{kJ}{kg} \right) = 799.47 kJ$$

d) $p_{2,L}$:

mit $Q_w = Q_L$:

$$Q_L = m_L\left(u_{2,L} - u_{1,L}\right) \quad \Rightarrow \quad u_{2,L} = \frac{Q_L}{m_L} + u_{1,L} = \frac{799.47kJ}{2.55kg} + 293.43\frac{kJ}{kg} = 607.0\frac{kJ}{kg}$$

mit: $m_L = \dfrac{p_{1,L}V}{RT_{1,L}} = \dfrac{3\cdot 10^5 Pa\cdot 1m^3}{286.987\dfrac{J}{kgK}410K} = 2.55kg$

Interpolation mit Tabelle A-22: $T_{2,L} = 818K = 545°C$

$$p_{2,L} = \frac{p_{1,L}}{T_{1,L}}T_{2,L} = 5.99bar$$

$$\Rightarrow \quad p_{2,L} - p_{2,w} = 0.47bar$$

e) da 0.8 bar> Δp_2 würde die Membran nach dem Erwärmen nicht kollabieren.

Aufgabe 2

a) 1.HS, stationäres, adiabates System: $\dfrac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R22}} = h_1 - h_2$

aus Tab. A-18 bei 1.4 MPa und 60°C:

$$h_1 = 281.53\frac{kJ}{kg} \qquad s_1 = 0.9452\frac{kJ}{kgK} = s_{2,s}$$

$h_{2,s}$ bei p= 1.2 MPa, Tab. A-18 durch Interpolation: $h_{2,s}$= 277.42 kJ/kg

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R22}} = \left(h_1 - h_{2,s}\right)\eta_{T,s} = \left(281.53\frac{kJ}{kg} - 277.42\frac{kJ}{kg}\right)0.85$$

$$= 3.50\frac{kJ}{kg}$$

Aus Tab. A-17 bei 1.2 MPa, T_{sat}: h_3= 81.90 kJ/kg und v_3= 0.8546 10^{-3} m^3/kg:

$$\frac{\dot{W}_P}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = \frac{h_3 - h_{4,s}}{\eta_{P,s}} = \frac{v_3\left(p_3 - p_4\right)}{\eta_{P,s}} = \frac{0.8546\cdot 10^{-3}\dfrac{m^3}{kg}\left(-0.2\cdot 10^6 Pa\right)}{0.7} = -244.17\frac{J}{kg}$$

b) Massenstrom des Kreisprozesses:

$$\dot{m}_{R22} = \frac{\dot{W}_{tot}}{\dfrac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R22}} + \dfrac{\dot{W}_P}{\dot{m}_{R22}}} = \frac{10^7 W}{3.5\cdot 10^3\dfrac{J}{kg} - 244.17\dfrac{J}{kg}} = 3075.9\frac{kg}{s}$$

Mit 1. HS, stationär, ohne Arbeit:

$$\dot{Q}_{Sonne} = \dot{m}_{R22}\left(h_1 - h_4\right) = 3075.9\frac{kg}{s}\left(281.53\frac{kJ}{kg} - 82.144\frac{kJ}{kg}\right) = 613.29MW,$$

wobei: $h_4 = h_3 - \frac{\dot{W}_P}{\dot{m}_{R22}} = 82.144 \frac{kJ}{kg}$

c) Abwärmestrom Wärmetauscher:

$$\dot{Q}_{Wärmetauscher} = \dot{m}_{R22}\left(h_3 - h_2\right) = 3075.9 \frac{kg}{s}\left(81.9 \frac{kJ}{kg} - 278.03 \frac{kJ}{kg}\right) = -603.29 MW = -\dot{Q}_{Sonne} + \dot{W}_{tot}$$

wobei: $h_2 = h_1 - \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_{R22}} = 278.03 \frac{kJ}{kg}$

Mit Tab. A-2:

$$\dot{Q}_{Wärmetauscher} = \dot{m}_w\left(h_{w,in} - h_{w,out}\right) \quad \Rightarrow$$

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}_{Wärmetauscher}}{\left(h_{w,in} - h_{w,out}\right)} = \frac{-603.29 \cdot 10^3 kW}{(83.96 - 188.45) \frac{kJ}{kg}} = 5773.6 \frac{kg}{s}$$

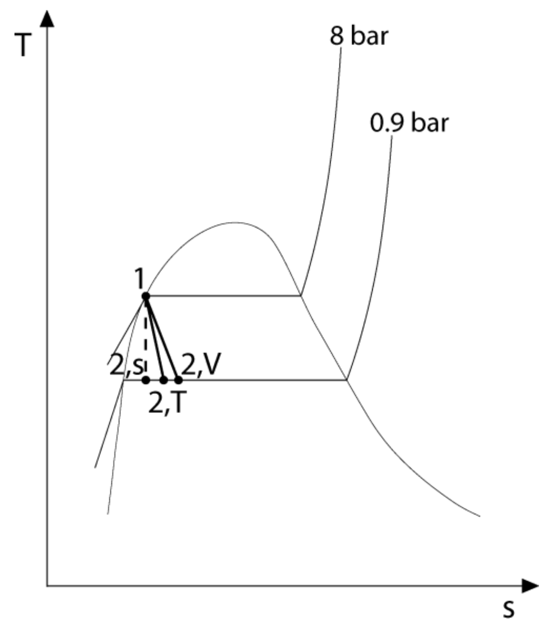
d) Thermischer Wirkungsgrad des Kreisprozesses:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{tot}}{\dot{Q}_{Sonne}} = \frac{10 MW}{613.29 MW} = 1.63\%$$

Man könnte am Ausgang der Turbine (Zustand 2) den Druck p_2 senken und den Dampf mindestens bis zur Sättigungstemperatur nutzen, so dass weniger Wärme ungenutzt an den Wärmetauscher abgegeben wird.

Aufgabe 3

a) c) T-s Diagram für das Ventil:



b) Entropieproduktionsrate des Ventils:

$$\dot{S}_{erz,V} = S_2 - S_1 - \int \cancelto{0\,(adiabat)}{\frac{\dot{Q}}{T_b}} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

Aus Tab. A-3 bei 8 bar: s_1= 2.0462 kJ/kgK,

$$\cancelto{0}{\dot{E}} = \cancelto{0}{\dot{Q}} - \cancelto{0}{\dot{W}} + \dot{m}\left(h_1 - h_2 + \cancelto{0}{\frac{v_1^2 - v_2^2}{2}} + g\left(\cancelto{0}{z_1 - z_2}\right)\right) \quad \Rightarrow \quad h_1 = h_2$$, isenthalper Prozess

Aus Tab. A-3 bei 0.9 bar: h_f= 405.15 kJ/kg, h_g= 2670.9 kJ/kg

Somit: x_V= 13.95% und s_2= 2.1237 kJ/kgK

$$\dot{S}_{erz,V} = \dot{m}(s_2 - s_1) = \frac{2}{60}\frac{kg}{s}(2.1237 - 2.0462)\frac{kJ}{kgK} = 2.583\frac{W}{K}$$

d) $\dot{W}_{T,\max} = \dot{W}_{T,rev} = ?$

$$\dot{S}_{erz,T,rev} = S_2 - S_1 - \int \cancelto{0}{\frac{\dot{Q}}{T_b}} = \dot{m}(s_2 - s_1) = 0 \quad \Rightarrow \quad s_{2,T} = s_1 = s_{2,s}$$

Isentroper Prozess, da für $\dot{W}_{T,rev}$ die Entropieerzeugung = 0 gelten muss.

$$\cancelto{0}{\dot{E}} = \cancelto{0}{\dot{Q}} - \dot{W} + \dot{m}\left(h_1 - h_{2,s} + \cancelto{0}{\frac{v_1^2 - v_2^2}{2}} + g\left(\cancelto{0}{z_1 - z_2}\right)\right) \quad \Rightarrow \quad \dot{W} = \dot{m}\left(h_1 - h_{2,s}\right)$$

Aus Tab. A-3 bei 0.9 bar:

$$x_T = \frac{s_{2s} - s_{2,f}}{s_{2,g} - s_{2,f}} = \frac{2.0462\,kJ/kgK - 1.2695\,kJ/kgK}{7.3949\,kJ/kgK - 1.2695\,kJ/kgK} = 12.68\%$$

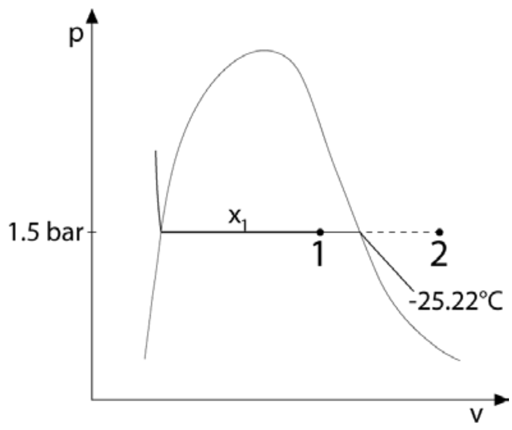
$h_{2,s}$=692.45 kJ/kg

$$\dot{W}_{rev} = \frac{2}{60}\frac{kg}{s}\left(721.11\frac{kJ}{kg} - 692.45\frac{kJ}{kg}\right) = 0.955kW$$

Da alleine schon die reversible, also ideale Leistung der Turbine klein ist, wird die reale, mit Irreversibilitäten behaftete Turbine eine noch kleinere Leistung haben, somit lohnt es sich nicht das Ventil mit einer Turbine zu ersetzen.

Aufgabe 4

a) p-v Diagram:



b) Elektrische Arbeit W_{el}:

1.HS für ein geschlossenes System:

$$\Delta U_{12} = \underbrace{Q_{12}}_{0(adiabat)} - W_{12} \quad \Rightarrow \quad W_{12} = W_{el} + W_{Kolben}$$

$$W_{el} = W_{tot} - W_{Kolben} = -\Delta U_{12} - \int_1^2 pdV = m\left[(u_1 - u_2) - p_1(v_2 - v_1)\right]$$

Mit Tab. A-14 bei 1.5 bar:

$$u_1 = u_{1,f} + x_1\left(u_{1,g} - u_{1,f}\right) = 65.1\frac{kJ}{kg} + 0.8(1293.8 - 65.1)\frac{kJ}{kg} = 1048.06\frac{kJ}{kg}$$

Mit Tab. A-15 bei 1.5 bar:

Interpoliert für v_2=1.4*v_1=1.4*0.6233 m^3/kg =0.8726 m^3/kg → u_2= 1339.5 kJ/kg

⇒ W_{el}=-657.62 kJ

c) Exergieverlust $Ex_{verl,12}$ mit Tab. A-14 und A-15 und adiabat:

$$Ex_{verl} = T_0 S_{erz} = T_0\left(S_2 - S_1 - \int \frac{Q}{T_b}\right) = T_0 m(s_2 - s_1) = 288K \cdot 2kg\,(5.9264 - 4.6121)\frac{kJ}{kgK}$$
$$= 757.04kJ$$

d) Exergieänderung $Ex_{verl,12}$

$$Ex_2 - Ex_1 = m\left(u_2 - u_1 + p_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1)\right)$$
$$= 2kg\left(1339.5\frac{kJ}{kg} - 1048.06\frac{kJ}{kg} + 10^5 Pa \cdot 0.4 \cdot 0.6233\frac{m^3}{kg} - 288K(5.9264 - 4.6121)\frac{kJ}{kgK}\right)$$
$$= -124.36kJ$$

Alternativ über die Exergiebilanz (Ex_Q=0):

$$Ex_2 - Ex_1 = -Ex_{Wel} - Ex_{Wkolben} - Ex_{verl}$$
$$= -W_{el} - m(p_1 - p_0)(v_2 - v_1) - T_0 m(s_2 - s_1)$$
$$= -124.36kJ$$