

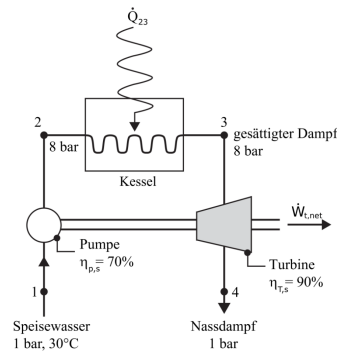
Vorrechenübung

Aufgabe 9.1 ●●○ Stationärer Dampfkraftwerksprozess

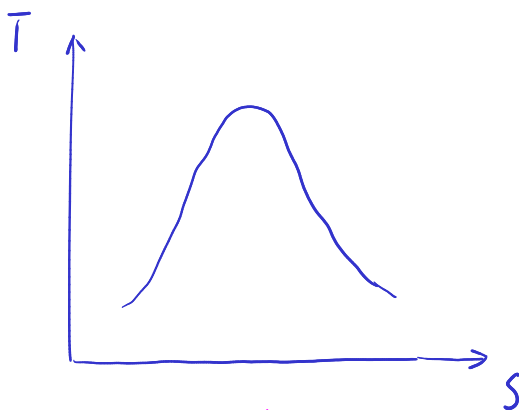
Ein stationärer Dampfkraftwerksprozess mit dem Arbeitsmittel Wasser besteht aus einer Pumpe, einem Kessel und einer Turbine. Die Pumpe pumpt Speisewasser bei $T_1 = 30^\circ\text{C}$ und $p_1 = 1\text{ bar}$ auf einen Druck von $p_2 = 8\text{ bar}$ (mit isentropem Wirkungsgrad $\eta_{P,s} = 70\%$). Im Kessel wird das Wasser bei konstantem Druck verdampft und verlässt den Kessel als gesättigter Dampf. In der Turbine (mit isentropem Wirkungsgrad $\eta_{T,s} = 90\%$) wird der Dampf wiederum auf einen Druck von $p_4 = 1\text{ bar}$ entspannt und liegt als Nassdampf vor. Die Turbine liefert die erforderliche Leistung, um die Pumpe anzutreiben, und gibt zusätzlich weitere Leistung ab.

Annahmen:

- Flüssiges Wasser kann als ideale Flüssigkeit mit konstanter Wärmekapazität betrachtet werden.
- Pumpe und die Turbine sind adiabat.
- Die Änderung von potentiellen und kinetischen Energien ist vernachlässigbar.



a) Skizzieren Sie den Prozess qualitativ in einem T - s Diagramm.



- ① Achse beschriften, T , s
- ② Für real stoff Wasser ND Kurve einzeichnen
- ③ ...

Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

ND? (Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)



1. $P_2 = 1 \text{ bar}$ $T_2 = 30^\circ\text{C}$

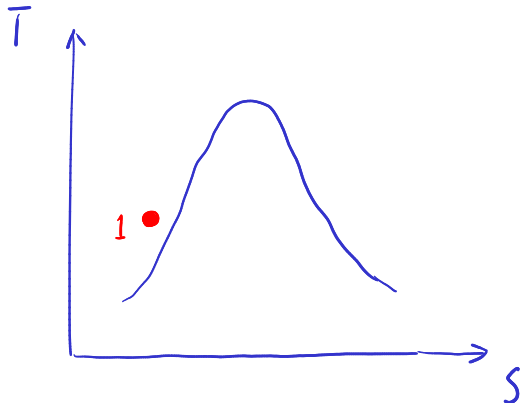
schaut in ND TAB-A3

für ND gekoppelte Beziehung

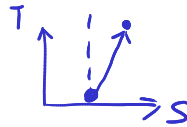
$P = 1 \text{ bar}$ $T = 99.63^\circ\text{C}$

$\Rightarrow$ Unterkühlte Flüssigkeit

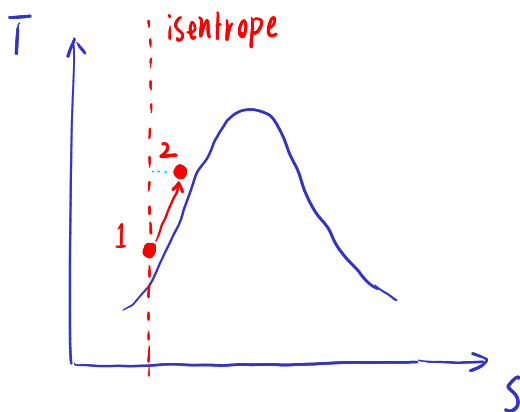
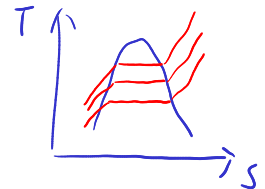
in TAB heißt "compressed Liquid", gleiche Begriff



2. irrev. Pumpe $\Rightarrow \dot{S}_{erz} > 0$



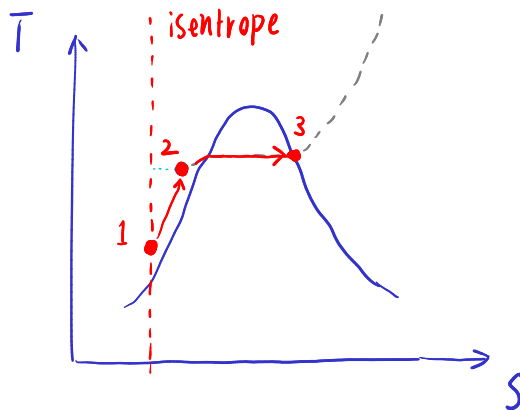
⚠ Wie sieht isobare in T-s für Wasser aus?



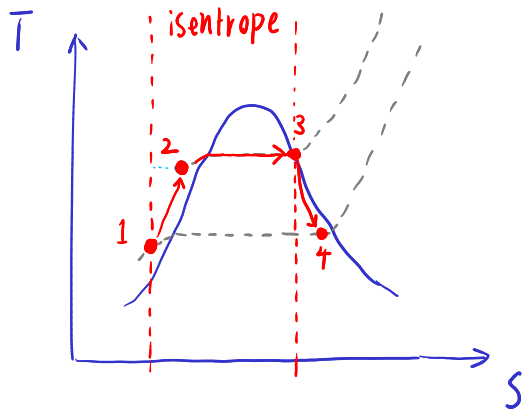
1 bar $\rightarrow$ 8 bar

3. isobare Erwärmung (als rev. annimmt) bis zum Sattdampf

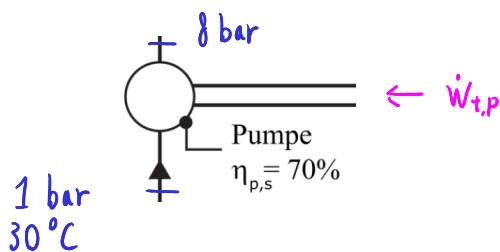
⇓
bleibt auf eine isobare



4. irrev. Entspannung auf 1 bar



b) Bestimmen Sie die erforderliche spezifische Leistung der Pumpe $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$.



Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} \left[h_e - h_a + \frac{(w_e^2 - w_a^2)}{2} + g(z_e - z_a) \right] + \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{t,n}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{W}_{t,P}$$

stationär

$$0 = h_1 - h_2 - \frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$$

Welche Größe EZ lösbar?

h_1 : P, T geg. mit TAB. leicht lösbar

Welche Unbekannt?

$h_2(P, T)$, $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$

⚠ irrev. Fall hier, $\eta_{p,s} = 70\%$. Isentroper Wirkungsgrad geg.

Arbeit W und Enthalpie h_2 sind von $\eta_{p,s}$ abhängig

Ans ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter) $\eta_{V,s} = \frac{w_{t,12}^{\text{rev}}}{w_{t,12}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{V,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}$
genau unseres Bsp.

$w_{t,12}^{\text{rev}}$: reibungsfreie, perfekter Pumper, Verdichter benötigte Arbeit

$w_{t,12}$: reale Arbeit $\leftarrow$ dies ist ges.

$w_{t,12}^{\text{rev}}$ ist nur zw. Resultat,

$$\eta_{p,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}$$

Ans Appendix W. 08, Ü. 06

Falls Arbeitsmedium kein IG, sondern Wasser, Dampf ... (Realstoff)

Dann TAB,

Key $\Delta S = 0$ Suchen $S_{2s} = S_1 \leftarrow$ Eingang
 $\uparrow$
für Ausgangsbedingung z.B. $P_2, V_2, \dots$

Diese Schritt ist um $h_{2,s}$ zu finden

$\uparrow$
rev. Enthalpie

geg.

$$\eta_{p,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}$$

$\xrightarrow{\text{EZ bestimmt}}$ ges. reale Enthalpie

dann einsetzen in Energiebilanz
um Arbeit zu lösen

① mit $\Delta S = 0$ nach $h_{2,s}$ zu suchen

- Flüssiges Wasser kann als ideale Flüssigkeit mit konstanter Wärmekapazität betrachtet werden.

Ideale Flüssigkeit ($v^{if} = \text{const.}$)

$$c_p^{if}(T) = c_v^{if}(T) = c^{if}(T)$$

$$u^{if}(T_2) - u^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT$$

$$h^{if}(T_2, p_2) - h^{if}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT + v^{if}(p_2 - p_1)$$

$$s^{if}(T_2) - s^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c^{if}(T)}{T} dT$$

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten
(gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

$$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$$

$$\text{Wenn } h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T)): \quad h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$$

$$s^{if}(T, p) = s_f(T)$$

Zustand 1: 1 bar, 30 °C Näherung mit TAB A-2

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table											
Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30

$$h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{ bar}) = 125,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,0043 \times 10^{-3} \text{ m}^3 (100 \text{ kPa} - 4,246 \text{ kPa})$$

$$= 125,88 \underline{\underline{6}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{ bar}) = 0,4369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \stackrel{!}{=} s_{2,s}^{if}$$

↑
s. steht für isentrop

② Zustand 2 : 8 bar

$$s_{2,s}^{if}(T_{2,s}, 8 \text{ bar}) = s_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1 \text{ bar}) = 0,4369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Für ideale Flüssigkeit, Ausser Enthalpie, alle sind nur von Temp. abhängig
 $\Rightarrow$ Entropie für ideale Flüssigkeit, nur Funktion der Temp.

$$S_{2,s}^{if}(T_{2,s}) = S_1^{if}(30^\circ\text{C}) = 0,4369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\Rightarrow T_{2,s} = T_1 = 30^\circ\text{C}$$

③ $h_{2,s}$?

$$\begin{aligned} h_{2,s}^{if}(T_{2,s}, 8 \text{ bar}) &= h_{2,s}^{if}(30^\circ\text{C}, 8 \text{ bar}) \\ &= h_f(30^\circ\text{C}) + 1,0043 \times 10^{-3} \text{ m}^3 (800 \text{ kPa} - 4,246 \text{ kPa}) \\ &= 126,59 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &\quad \text{,589} \end{aligned}$$

④ Einsetzen

$$\eta_{p,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2} \Rightarrow h_1 - h_2 = -1,0143 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1,004$$

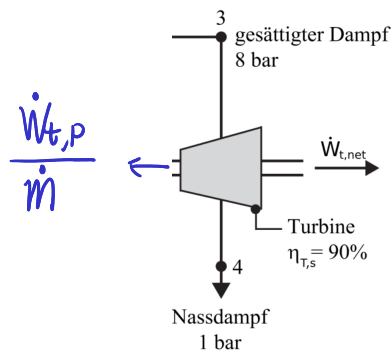
$$0 = h_1 - h_2 - \frac{\dot{W}_{t,p}}{\dot{m}} \Rightarrow \frac{\dot{W}_{t,p}}{\dot{m}} = -1,0143 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1,004$$

Es macht schon ein Unterschied
Wenn man eine nach Komma Stelle
mehr hat.

c) Bestimmen Sie die spezifische Nettoleistung des Gesamtprozesses $\frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}}$.

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$

Nun an der Turbine



Welche Größe EZ zu bestimmen?

Sattdampf 8 bar $\Leftarrow$ ND TAB
 $\chi = 1$

$$\underbrace{\frac{dE}{dt}}_{\text{stationär}} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \underbrace{\dot{Q}}_{\text{adiabat}} - \dot{W}_T \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

⚠ irrev. Fall hier, $\eta_{T,s} = 90\%$. Isentroper Wirkungsgrad geg.
Arbeit $\dot{W}_T$ und Enthalpie h_4 sind von $\eta_{T,s}$ abhängig

Aus ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)

$$\eta_{T,s} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12}^{rev}}, \text{ wenn } \underline{\text{adiabat}} \text{ und } \underline{\Delta ke + \Delta pe = 0}: \eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$$

geg. $\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$ $\leftarrow$ lösen
isotrop

① mit $\Delta S = 0$ nach $h_{4,s}$ zu suchen

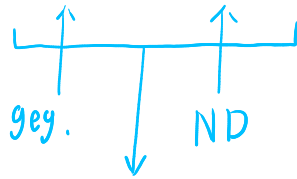
Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{kJ}{kg}$

$S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

TAB A-3

$$s_{4,s} (1 \text{ bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} s_3 = 6,6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$h_{4,s} (1 \text{ bar}, 99,63^\circ\text{C}) \quad \text{isentropie gekoppelte Enthalpie}$$



Zustand Bekannt bis auf Dampfgehalt x ,
dann alle bestimmbar

Um $h_{4,s}$ zu bestimmen, braucht man $x_{4,s}$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$

Bei 1 bar, 99,63°C

Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

$$s_{4,s} = s_f + x_{4,s}(s_g - s_f)$$

$$x_{4,s} = 88,4988 \%$$

$$h_{4,s} = h_f + x_{4,s}(h_g - h_f) \Rightarrow h_{4,s} = 2415,764649 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Bei 1 bar, 99,63°C

② Einsetzen lösen nach $h_4 \leftarrow \text{real Fall}$

$$\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}} \Rightarrow h_3 - h_4 = 318,0018 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

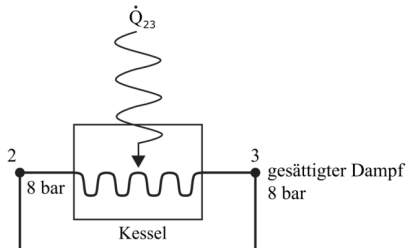
$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = 318,0018 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_T + \dot{W}_V \quad | \cdot m^{-1} \Rightarrow \frac{\dot{W}_{\text{t.net}}}{\dot{m}} = [318,0018 - 1,004] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 316,997815 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 316,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Naia, Passt}$$

d) Bestimmen Sie den spezifischen Wärmestrom $\frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{m}}$, der im Kessel an das Fluid abgegeben wird.



Bilanzgleichung

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_2 - h_3) + \dot{Q} - \dot{W}$$

stationär 0 keine Arbeit.

$$0 = \dot{m}(h_2 - h_3) + \dot{Q}$$

$$\frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{m}} = h_3 - h_2$$

$$h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{aus c)}$$

$$h_1 - h_2 = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{aus a)}$$

$$h_1 = 125,88 \underline{6} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \Rightarrow h_2 = 126,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 = 2642,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ml. 2642,2 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ✓