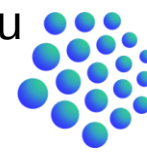


Thermodynamik I Übungsstunde 09

Juncheng Fu (Elias)
06. Dezember 2024

Übungsmaterial





- Die Übungsstunde wird von mir aufgezeichnet!
- **Nicht offiziell**
- (Screen recording) Lade ich später auf YT hoch
- Keine Garantie für Qualität, es ist nur in der Not zu nutzen (Falls Krank...)

Nächste Woche: meine Thermo I Übungsstunde Finale

Letzter Semester Woche am Freitag werde ich nicht in Präsenz sein:

Semesterwoche 14.

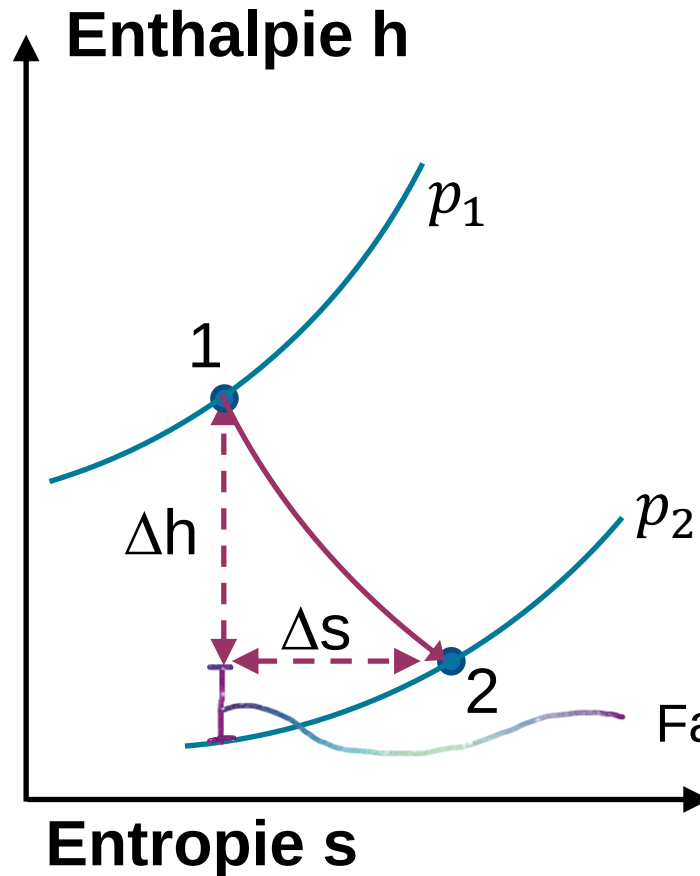
20. Dez Übungsstunde 11

d.h. nächste Woche ist meine letzte Übungsstunde von diesem Semester
Ich werde meine Kamera mitbringen und mit der als Zusatz aufnehmen.

Isentroper Wirkungsgrad



Das **h-s** Diagramm



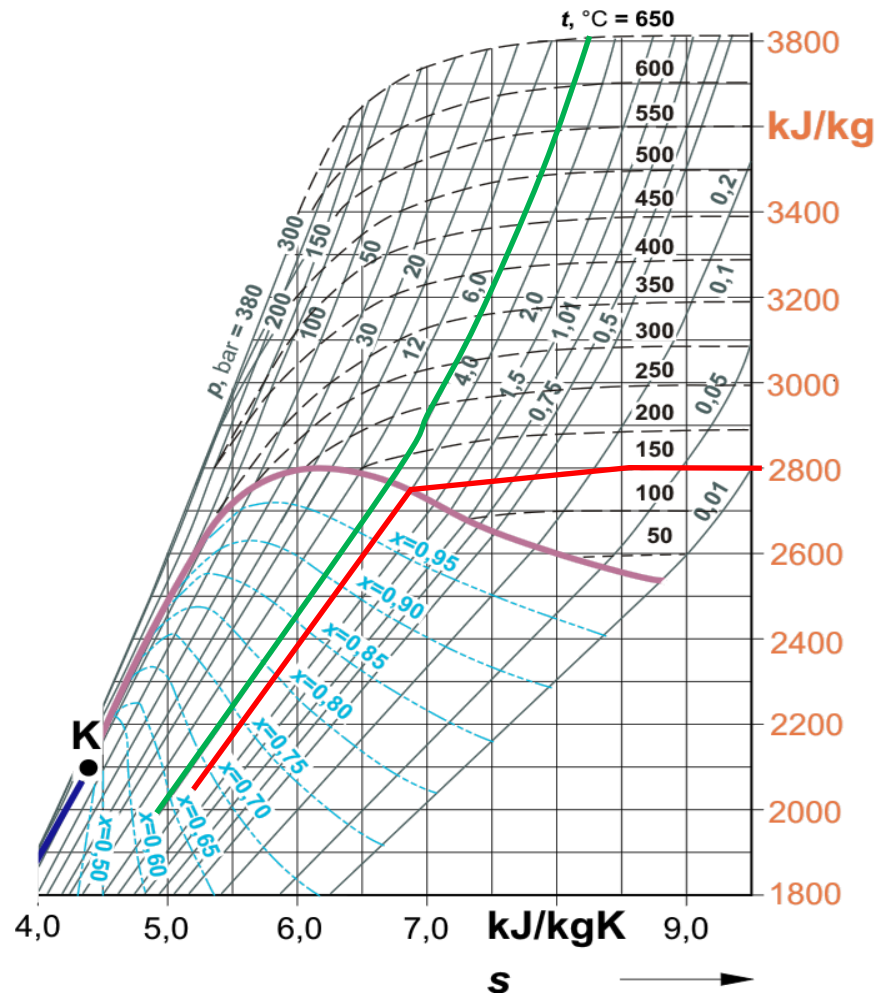
Mit h-s Diagramm, kann man den Wirkungsgrad von:

- Turbinen
 - Kompressoren
 - Düsen
- besser analysieren.

Isentroper Wirkungsgrad sehen wir gleich

Falls isentrop, zusätzliche Arbeit, die man nutzen könnte

Das **h-s** Diagramm für Wasser



Isobare fahre durch,

Isotherme biegt ab

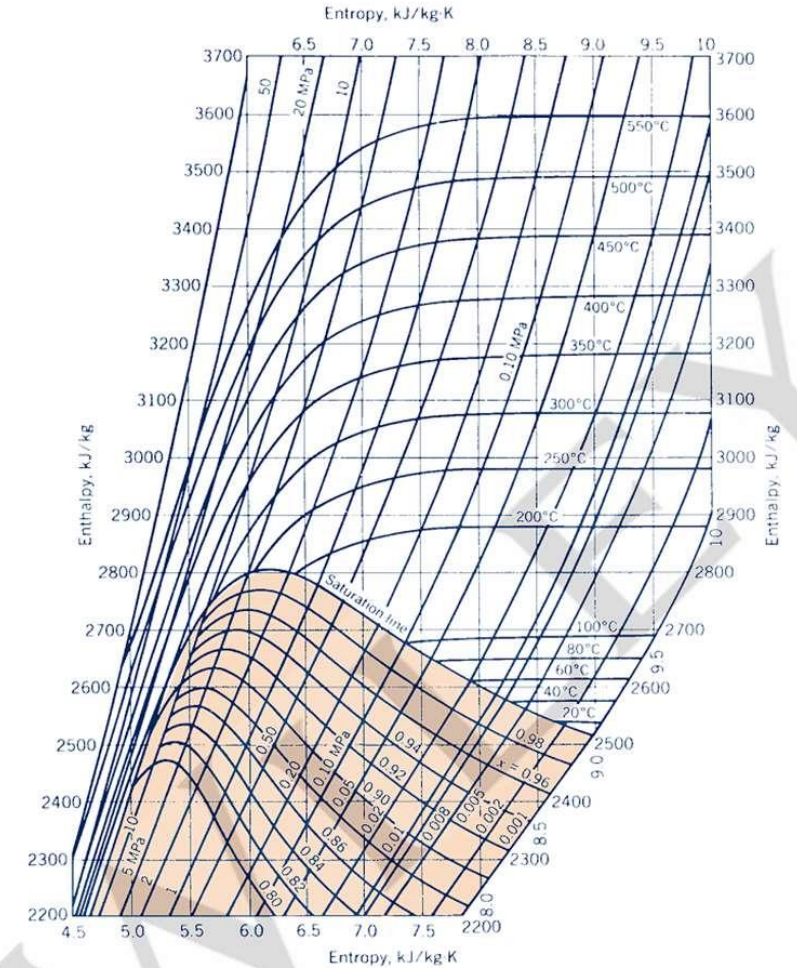
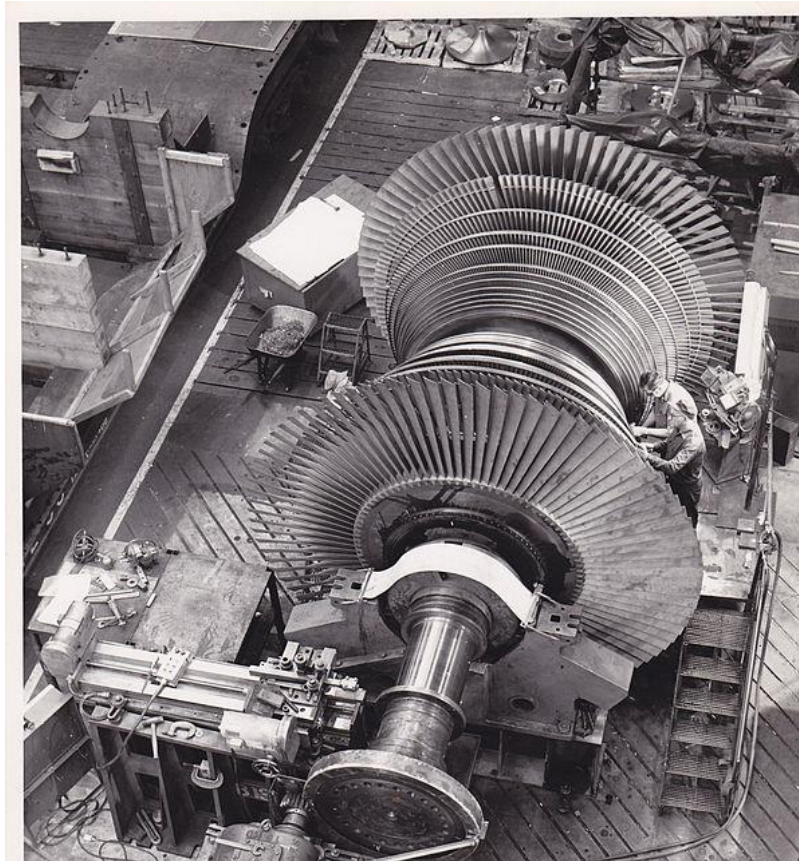


Figure A-8 Enthalpy-entropy diagram for water (SI units). Source: J. B. Jones and G. A. Hawkins, *Engineering Thermodynamics*, 2nd ed., Wiley, New York, 1986.

Technische Arbeit in offenen Systemen

Kein Kolben
oder ähnliches...



Was ist technische Arbeit in stationären Fließprozessen ?

Technische Arbeit in offenen Systemen

Technische Arbeit im offenen System (z.B. Flugzeugturbine)

$$w_{t,12} = - \left(\int_1^2 v dp + \varphi_{12} + \Delta ke + \Delta pe \right) = - \left(\underbrace{\int_1^2 v dp + \Delta ke + \Delta pe}_{w_{t,12}^{\text{rev}}} \right) - \varphi_{12}$$

v und p sind Zustandsgrösse von Arbeitsmedium (Gas/Fluid)

$w_{t,12}^{\text{rev}}$

$\int_1^2 v dp$: Druckänderungsarbeit

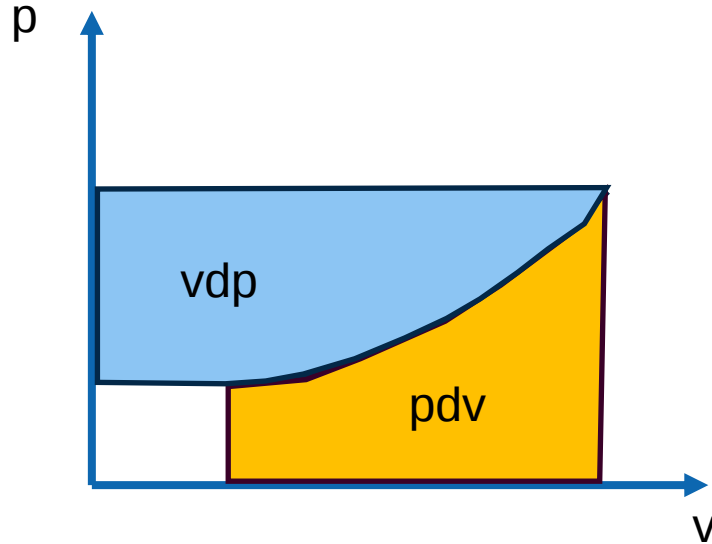
$\Delta ke + \Delta pe$: mechanische Arbeit zur Änderung kinetischer und potentieller Energie

φ_{12} : Dissipation, z.B. durch Reibung

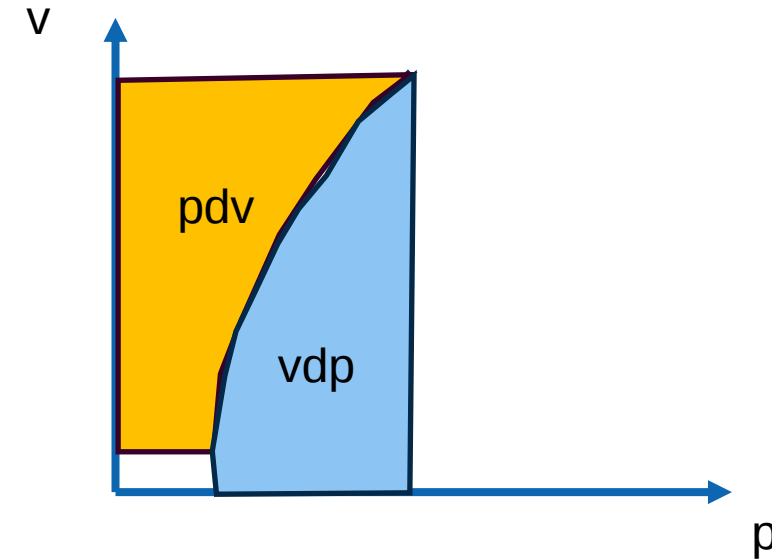
1->2 von Arbeitsmedium
(Ende-Anfang)

Vorzeichen!

Technische Arbeit in offenen Systemen



$$w_{V,12}^{\text{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\text{rev}}}{m} = \int_1^2 \boxed{p \, dv}$$



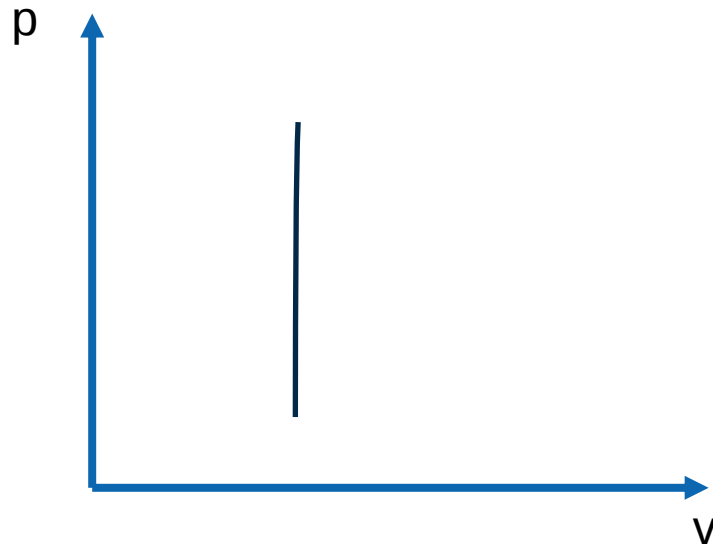
$$w_{t,12}^{\text{rev}} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{\text{rev}}}{\dot{m}} = - \left(\int_1^2 \boxed{v \, dp} + \Delta ke + \Delta pe \right)$$

pdv, vdp die gleiche Arbeit ergeben?

Technische Arbeit in offenen Systemen

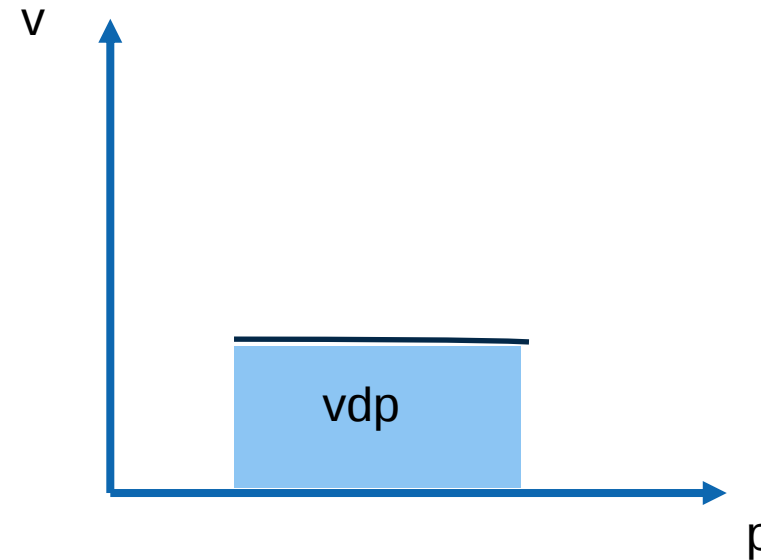
Bsp. an einer Wasser Pumpe, ideale Flüssigkeit

$p dv$ für incompressible Fluid = 0



Volumenarbeit = 0,
Aber Pumpe hat doch Arbeit geleistet!

$v dp$ für incompressible Fluid $\neq 0$



Sinnvoller diese zu verwenden

$$w_{t,12}^{\text{rev}} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{\text{rev}}}{\dot{m}} = - \left(\int_1^2 v dp + \Delta ke + \Delta pe \right)$$



Technische Arbeit in offenen Systemen

Arbeit

$$w_{12} = w_{12}^{\text{rev}} - \varphi_{12} \quad \text{mit } \varphi_{12}: \text{Dissipation}$$

Spezifische Volumenarbeit

(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\text{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\text{rev}}}{m} = \int_1^2 p \, dv$$

Volumenarbeit für
geschlossenes
Sys.

- für Polytrope, $n = 1$:
$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n=1} = p_1 v_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$
- für Polytrope, $n \neq 1$:
$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n \neq 1} = \frac{1}{1-n} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$
- für Polytrope, $n \neq 1$:
(ideales Gas)
$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n \neq 1} = \frac{1}{1-n} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$$

Spezifische technische Arbeit

(reversibler stationärer
Fließprozess)

$$w_{t,12}^{\text{rev}} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{\text{rev}}}{\dot{m}} = - \left(\int_1^2 v \, dp + \Delta ke + \Delta pe \right)$$

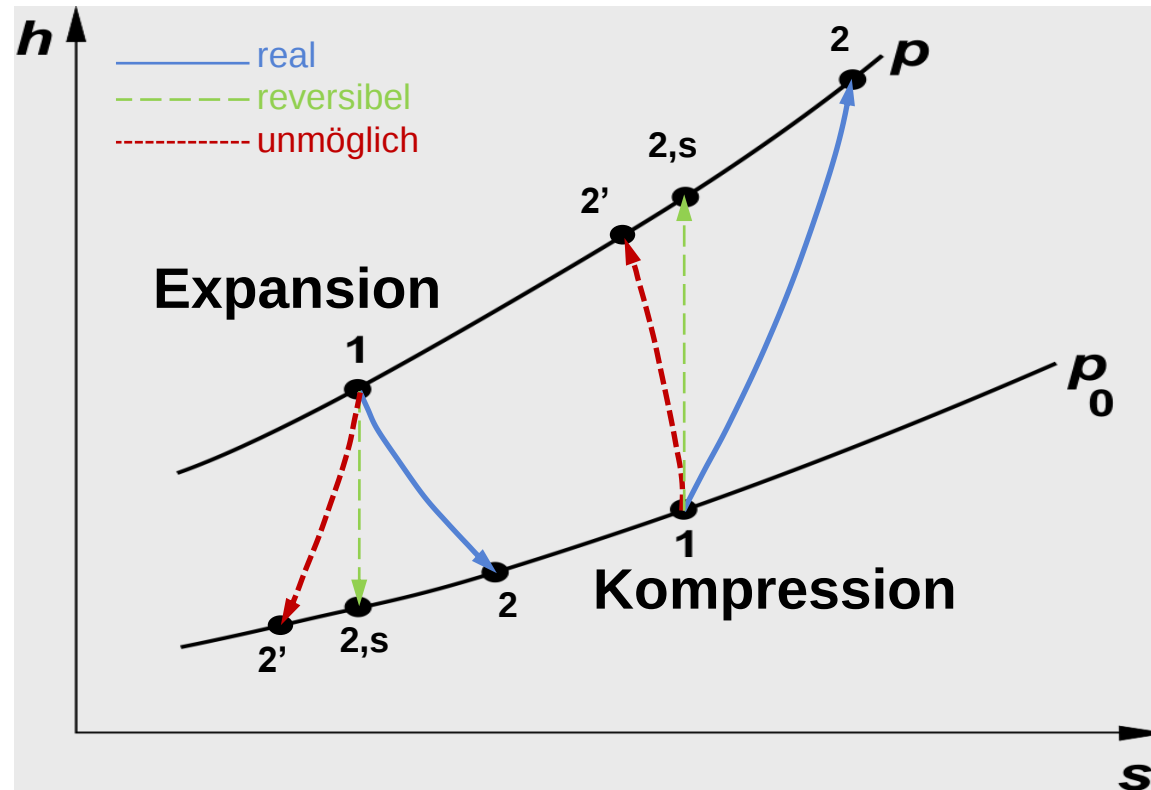
Technische Arbeit
für Fließprozess

- für Polytrope, $n = 1$:
$$\left(\int_1^2 v \, dp \right)_{n=1} = - \left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n=1}$$
- für Polytrope, $n \neq 1$:
$$\left(\int_1^2 v \, dp \right)_{n \neq 1} = -n \left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n \neq 1}$$

n muss
konstant
bleiben, damit
die Formel
anwendbar ist

Adiabate Arbeitsprozesse

z.B. Verdichter, Turbinen



$$0 = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \sum_i \frac{\dot{Q}_j(t)}{\bar{T}_j(t)} + \dot{S}_{\text{erz}}(t)$$

0

Isentrope Wirkungsgrade

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)

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

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)

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



Isentrope Wirkungsgrad macht ein Vergleich zw. bestmöglicher Arbeit w_t^{rev} und reale Arbeit w_t

Mit Energiebilanz kann man gut herleiten

Nun, diese «S»

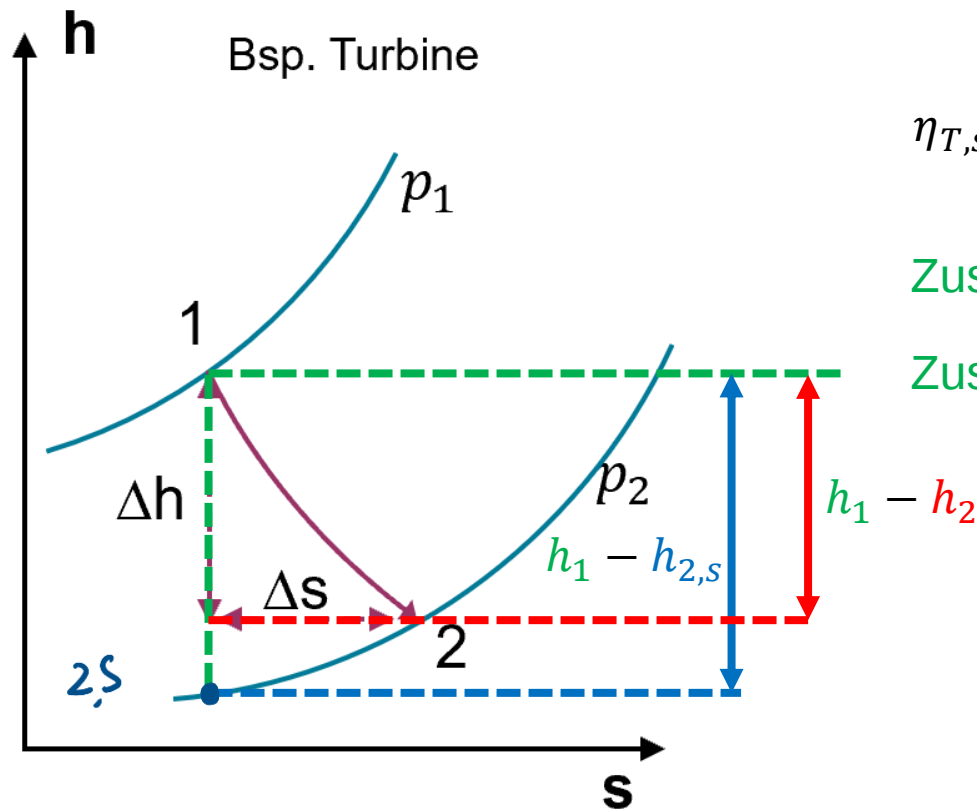
Isentrope Wirkungsgrade

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)

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

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)

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



$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}}$$

Zustand 1 -> Zustand 2,s : eine Isentrope Zustandsänderung

Zustand 1 -> Zustand 2 : reale Zustandsänderung

Wie berechnet man $h_{2,s}$?

Stellt immer zuerst die Frage:

Welche Stoffmodel?

Wie berechnet man $h_{2,s}$?

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}} \quad \text{Zustand 1} \rightarrow \text{Zustand 2} : \text{reale Zustandsänderung}$$

Zustand 1 $\rightarrow$ Zustand 2,s : eine Isentrope Zustandsänderung

Wie berechnet man $h_{2,s}$? Stellt immer zuerst die Frage:

Welche Stoffmodel?

z.B. für IG:

Zustandsänderungen idealer Gase

Isotherme

$$n = 1$$

Isentrope

$$n = \kappa = \frac{c_p^{\text{ig}}}{c_v^{\text{ig}}}$$

Polytropes

Temperaturverhältnis

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}$$

geg. $\rightarrow$ löst

löst $h_1 - h_{2,s}$

$$h^{\text{pg}}(T_2) - h^{\text{pg}}(T_1) = c_p^{\text{pg}}(T_2 - T_1)$$

$$h^{\text{ig}}(T_2) - h^{\text{ig}}(T_1)$$

Mit IG TAB lösen
oder andere Methode z.B. IG $\rightarrow$ PG

Wie berechnet man $h_{2,s}$?

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}} \quad \begin{array}{l} \text{Zustand 1} \rightarrow \text{Zustand 2} : \text{reale Zustandsänderung} \\ \text{Zustand 1} \rightarrow \text{Zustand 2,s} : \text{eine Isentrope Zustandsänderung} \end{array}$$

Wie berechnet man $h_{2,s}$? Stellt immer zuerst die Frage:

Welche Stoffmodel?

z.B. für IG:

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

$$\cancel{s^{\text{ig}}(T_2, p_2) - s^{\text{ig}}(T_1, p_1)} = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$\xrightarrow{\text{Isentrop}} 0$
 $\uparrow$ geg.

$$s^0(T_2) = s^0(T_1) + R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$\uparrow$
lese TAB. ggf. lerp. get $T_{2,s}$

$$\begin{array}{l} \rightarrow h^{\text{ig}}(T_2) - h^{\text{ig}}(T_1) \quad \text{Mit TAB, oder PG} \\ \rightarrow h^{\text{pg}}(T_2) - h^{\text{pg}}(T_1) = c_p^{\text{pg}}(T_2 - T_1) \end{array}$$

IG/PG
Annahme abhängig
 $\downarrow$

Wie berechnet man $h_{2,s}$?

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}} \quad \text{Zustand 1} \rightarrow \text{Zustand 2} : \text{reale Zustandsänderung}$$

Zustand 1 $\rightarrow$ Zustand 2,s : eine **Isentrope** Zustandsänderung

Wie berechnet man $h_{2,s}$? Stellt immer zuerst die Frage:

Welche Stoffmodel?

z.B. für Ideale Flüssigkeit:

$$s^{\text{if}}(T_2) - s^{\text{if}}(T_1) \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{isentrop}$$

$$\Downarrow$$

$$T_1 = T_2$$

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

(Note: The integral term is crossed out with a diagonal line in the original image, indicating it is zero for an incompressible liquid model.)

Wie berechnet man $h_{2,s}$?

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}}$$

Zustand 1 -> Zustand 2 : reale Zustandsänderung
Zustand 1 -> Zustand 2,s : eine Isentrope Zustandsänderung

Wie berechnet man $h_{2,s}$? Stellt immer zuerst die Frage:

Welche Stoffmodel?

z.B. für Reale Stoff mit TAB:

Superheated Vapor

140 bar → 15 bar

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 140 \text{ bar} = 14.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
360	0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
400	0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
440	0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
480	0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
520	0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
560	0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
600	0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
640	0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
700	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
740	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

Handwritten: Zustand 1 (green), h_1 (green), circled 3846.2

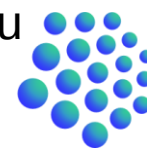
Zustand 2,s

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 15.0 \text{ bar} = 1.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
200	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
240	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
280	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
320	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
360	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
400	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
440	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
500	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
540	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
600	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
640	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391

Handwritten: $h_{2,s}$ (blue), isentrop (blue), circled 3081.9

ggf.
lerp.

Es ist nur Beispiel.
In der Prüfung
muss man richtige
genaue Werte
nehmen.



Wie berechnet man h_2 ?

$$\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} = \frac{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2}}{\text{Zustand 1} - \text{Zustand 2,s}}$$

Zustand 1 -> Zustand 2 : reale Zustandsänderung

Zustand 1 -> Zustand 2,s : eine Isentrope Zustandsänderung

Wenn wir $h_{2,s}$ kennen, h_2 ist dann Mathe Problem, meistens $\eta_{T,s}$ ist geg.

Oder durch EB, h_2 ermitteln... wenn real Arbeit geg. ist.
Aber dann $\eta_{T,s}$ unbekannt und als gesuchte Wert in Aufgabe.

Je nach Problem, gibt es verschiedene Lösungsweg.



LESE

epse
ENERGY & PROCESS SYSTEMS ENGINEERING

Vorrechenübung



Vorrechenübung

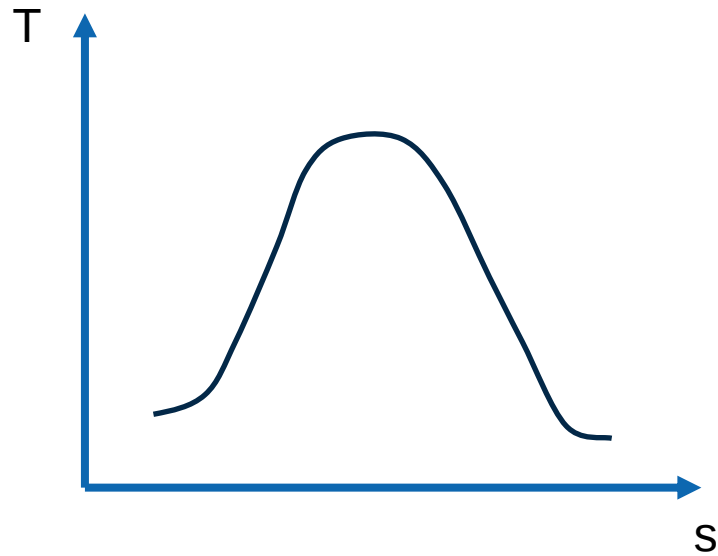
Aufgabe 9.1 ●●○ Stationärer Dampfkraftwerksprozess

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:

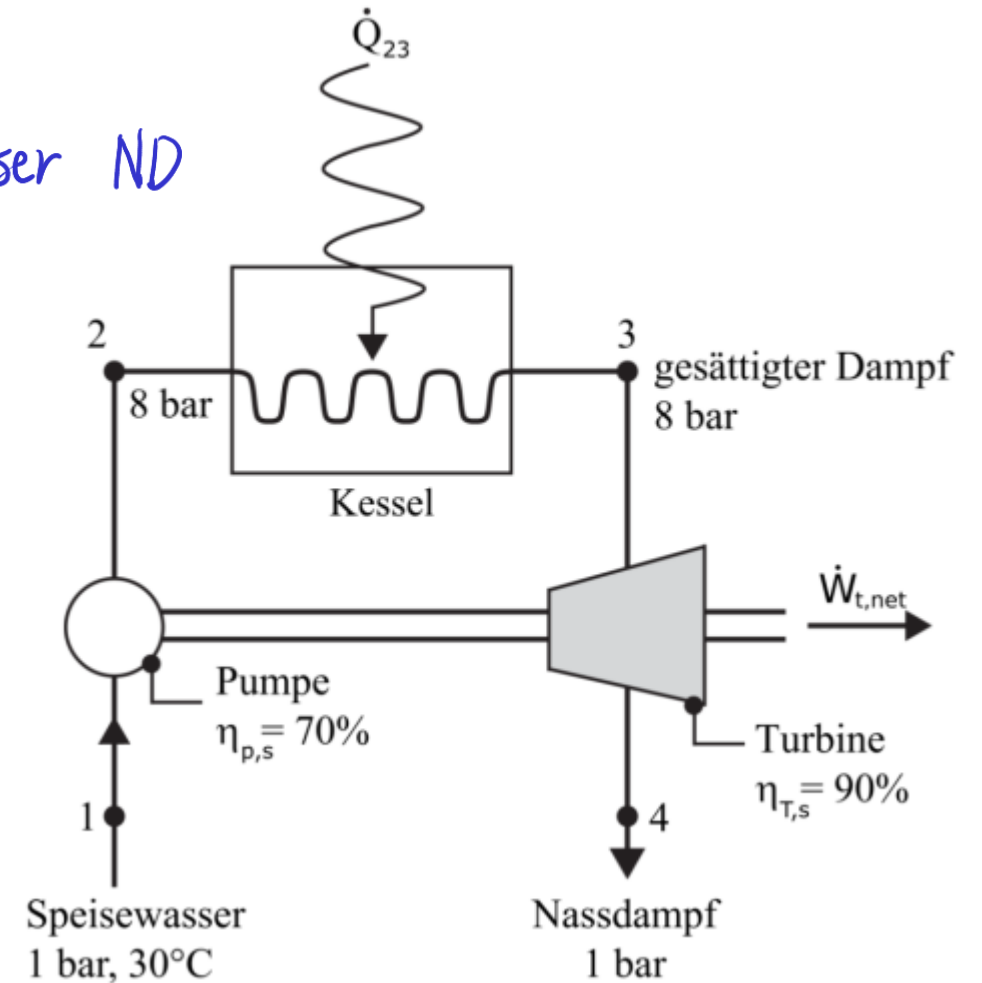
- Flüssiges Wasser kann als ideale Flüssigkeit mit konstanter Wärmekapazität betrachtet werden.
- Pumpe und die Turbine sind adiabat.
- Die Änderung von potentiellen und kinetischen Energien ist vernachlässigbar.

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

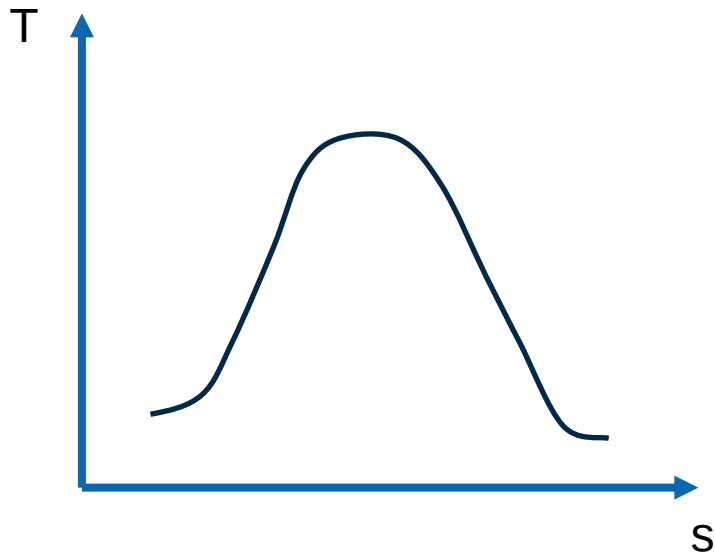


① Achse beschriften, T , s

② Für real stoff Wasser ND
Kurve einzeichnen



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



① Achse beschriften, T , s

② Für real stoff Wasser ND
Kurve einzeichnen

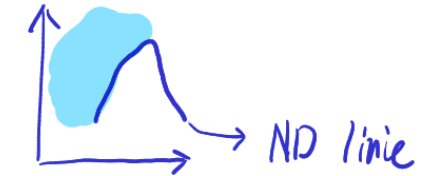
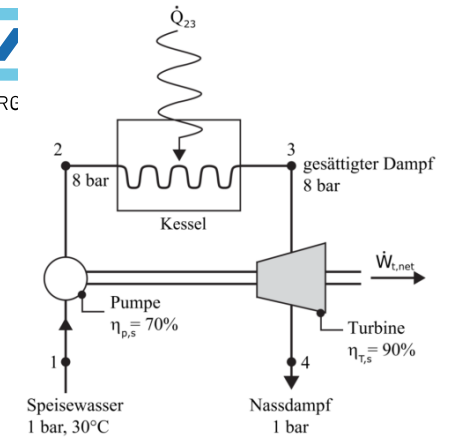
Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

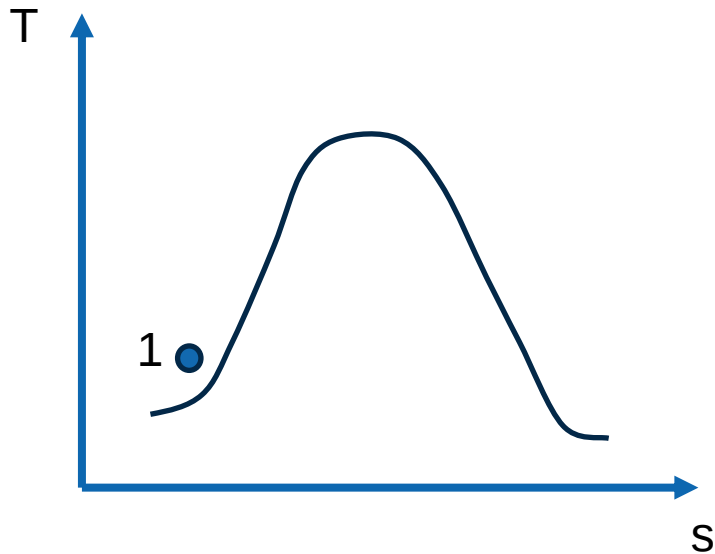
ND?

(Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)



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



① Achse beschriften, T , s

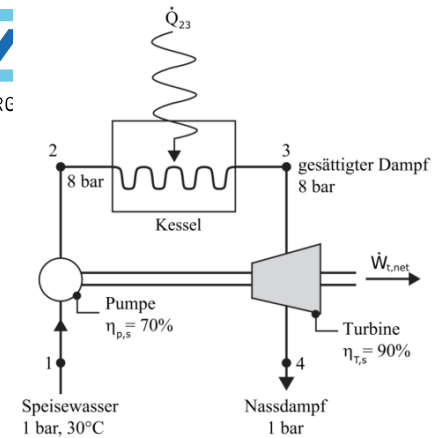
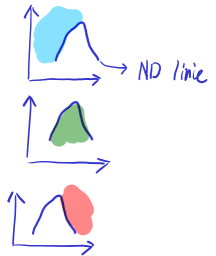
② Für real stoff Wasser ND
Kurve einzeichnen

Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

ND? (Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)



$$1, \quad P_1 = 1 \text{ bar} \quad T_1 = 30^\circ\text{C}$$

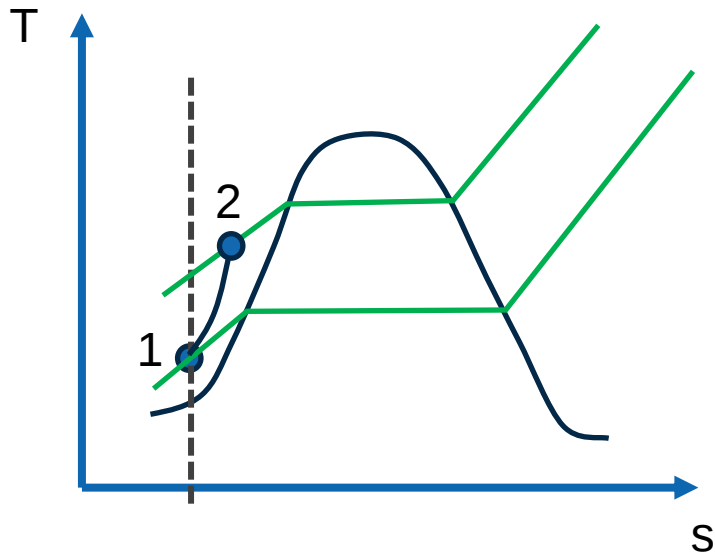
Schaut in ND TAB-A3
für ND gekoppelte Beziehung

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

$\Rightarrow$ Unterkühlte Flüssigkeit

in TAB heisst "compressed liquid", gleiche Begriff

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



1. $P_1 = 1 \text{ bar}$ $T_1 = 30^\circ\text{C}$

① Achse beschriften, T , s

② Für real stoff Wasser ND Kurve einzeichnen

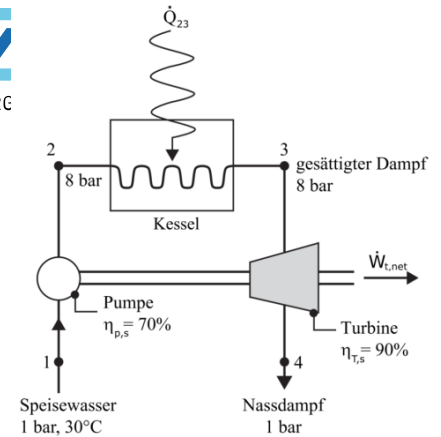
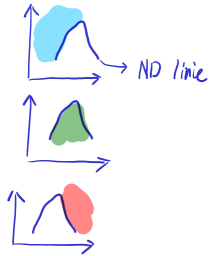
Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

ND?

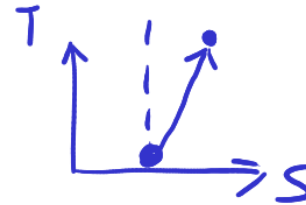
(Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)

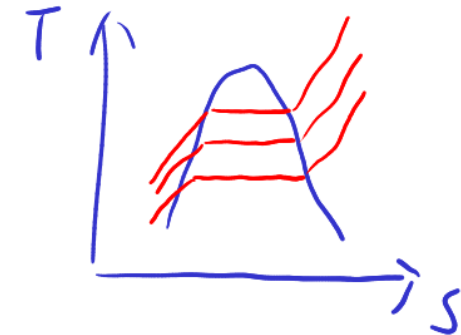


2. irrev. Pumpe $\Rightarrow \dot{S}_{erz} > 0$

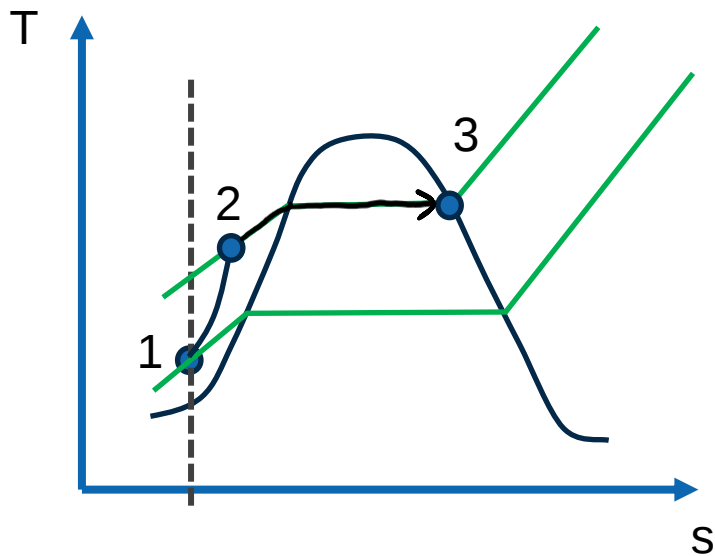
1 bar $\rightarrow$ 8 bar



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



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



1. $P_1 = 1 \text{ bar}$ $T_1 = 30^\circ\text{C}$

2. irrev. Pumpe $\Rightarrow \dot{S}_{\text{erz}} > 0$
 $1 \text{ bar} \rightarrow 8 \text{ bar}$



① Achse beschriften, T , s

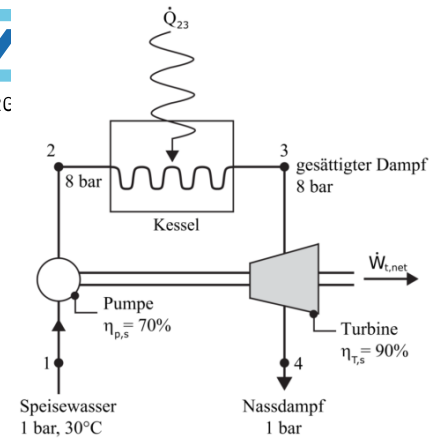
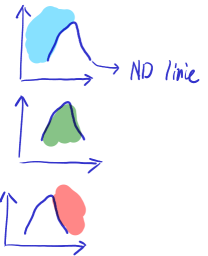
② Für real stoff Wasser ND
 Kurve einzeichnen

Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

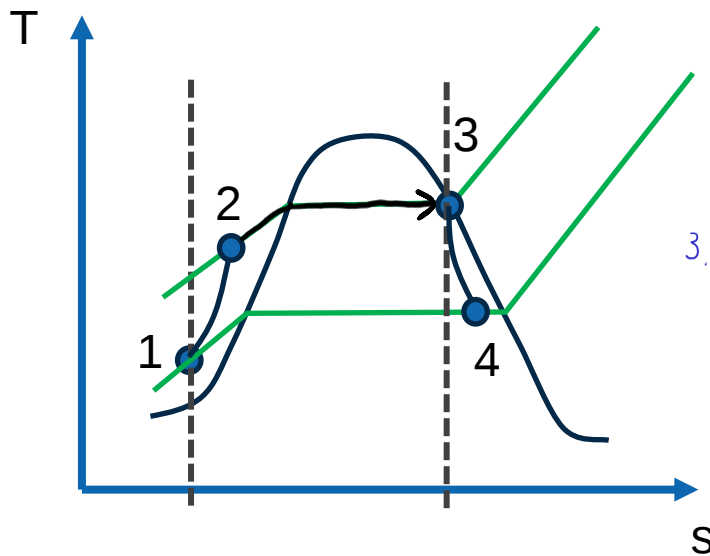
ND? (Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)



3. isobare Erwärmung (als rev. annimmt) bis zum Sattdampf
 $\Downarrow$
 bleibt auf eine isobare

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



1. $P_1 = 1 \text{ bar}$ $T_1 = 30^\circ\text{C}$

2. irrev. Pumpe $\Rightarrow \dot{S}_{\text{erz}} > 0$
 $1 \text{ bar} \rightarrow 8 \text{ bar}$



3. isobare Erwärmung (als rev. annimmt) bis zum Sattdampf
 $\Downarrow$
 bleibt auf eine isobare

① Achse beschriften, T , s

② Für real stoff Wasser ND
 Kurve einzeichnen

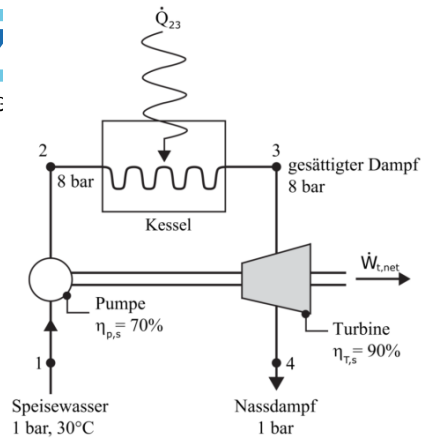
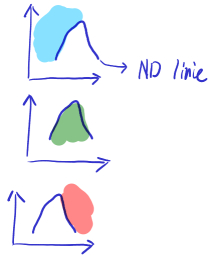
Dann entscheiden:

Unterkühlte Flüssigkeit? (compressed liquid)

ND?

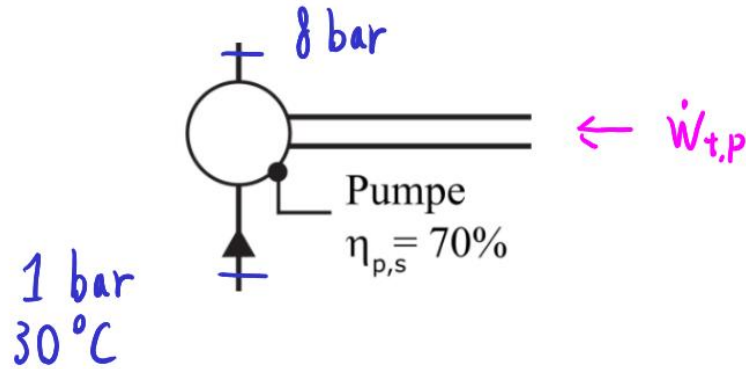
(Liquid-Vapor)

überhitzte Dampf? (superheated vapor)



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:

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

Welche Größe EZ lösbar?

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

Welche Unbekannt?

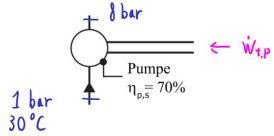
$h_2(P, T)$, $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$

Massenfluss
nicht gegeben!

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

stationär

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



Stationär

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{W}_{t,P} \quad h_1: P, T \text{ geg. mit TAB. leicht lösbar} \quad h_2(P, T), \quad \frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$$

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

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

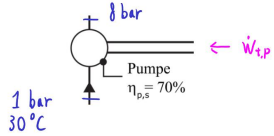
Ans ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)

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

genau unseres Bsp.

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



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

stationär

h_1 : P, T geg. mit TAB. leicht lösbar $h_2(P, T)$, $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$

Aus ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)

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

genau unseres Bsp.

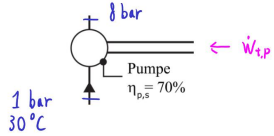
$w_{t,12}^{\text{rev}}$: reibungsfreie, perfekter Pumper, Verdichter benötigte Arbeit

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

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

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

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



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

stationär

h_1 : P, T geg. mit TAB. leicht lösbar $h_2(P, T)$, $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$

$$\eta_{p,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2} \quad \textcircled{1} \text{ mit } \Delta S = 0 \text{ nach } h_{2,s} \text{ zu suchen}$$

Welche Stoffmodel nutzen wir?

Unterkühlte
Flüssigkeit

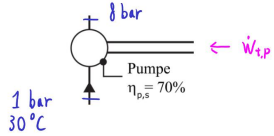
Ein stationärer Dampfkraftwerksprozess mit dem Arbeitsmittel Wasser besteht aus einer Pumpe, einem Kessel und einer Turbine. Die Pumpe pumpt Speisewasser bei $T_1 = 30^\circ\text{C}$ und $p_1 = 1 \text{ bar}$ auf einen Druck von $p_2 = 8 \text{ bar}$ (mit isentropem Wirkungsgrad $\eta_{P,s} = 70\%$). 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:

Unterkühlte Flüssigkeit -> ideale

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

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



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

stat. oder

h_1 : P, T geg. mit TAB. leicht lösbar $h_2(P, T)$, $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}}$

$$\eta_{p,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2} \quad \textcircled{1} \text{ mit } \Delta S = 0 \text{ nach } h_{2,s} \text{ zu suchen}$$

Welche Stoffmodel nutzen wir?

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

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

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

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

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

[RF-IF_Approximation.pdf](#)

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten
(gesättigte Flüssigkeit):

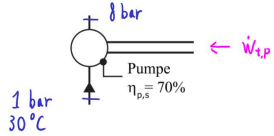
$$v^{\text{if}}(T, p) = v_f(T) \quad u^{\text{if}}(T, v) = u_f(T)$$

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

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

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

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



Stat. orien.

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

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

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

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

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

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

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):

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

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

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

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

TABLE A-2

Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

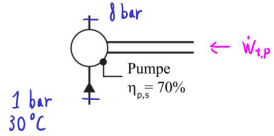
Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

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

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

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

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



Stationär

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

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

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

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

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

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

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):

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

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

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

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

TABLE A-2

Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

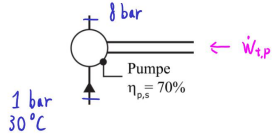
Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

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

$$h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 125,88 \underline{6} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

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



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

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

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

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

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

Zustand 1: 1 bar, 30 °C Näherung mit TAB A-2 $h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 125,88 \underline{6} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

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

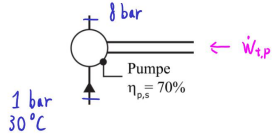
② Zustand 2: 8 bar

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

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

Druck hier ist egal, Entropien hängen nur von der Temp. ab.
 Isentrop $\Rightarrow$ Temp. muss gleich sein, damit Entropie gleich bleibt.

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



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

stationär

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

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

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

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

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

$$h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 125,88 \underline{6} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

② Zustand 2: 8 bar

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

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

③ $h_{2,s}$?

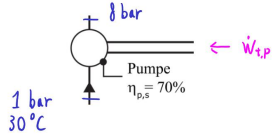
$$h_{2,s}^{if}(T_{2,s}, 8\text{bar}) = h_{2,s}^{if}(30^\circ\text{C}, 8\text{bar})$$

$$= h_f(30^\circ\text{C}) + 1,0043 \times 10^{-3} \text{m}^3 (\text{800 kPa} - 4,246 \text{kPa}) = 126,59 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

[RF-IF_Approximation.pdf](#)

589

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



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

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

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

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

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

$$h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 125,88 \underline{\underline{6}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2,s}^{if}(30^\circ\text{C}, 8\text{bar}) = 126,59 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

,589

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

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):

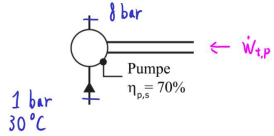
$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

$$h_1^{if}(30^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 125,88 \underline{\underline{6}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2,s}^{if}(30^\circ\text{C}, 8\text{bar}) = 126,59 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

,589

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

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

stationär

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

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,0143 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

-1,004

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

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):

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

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

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

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

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

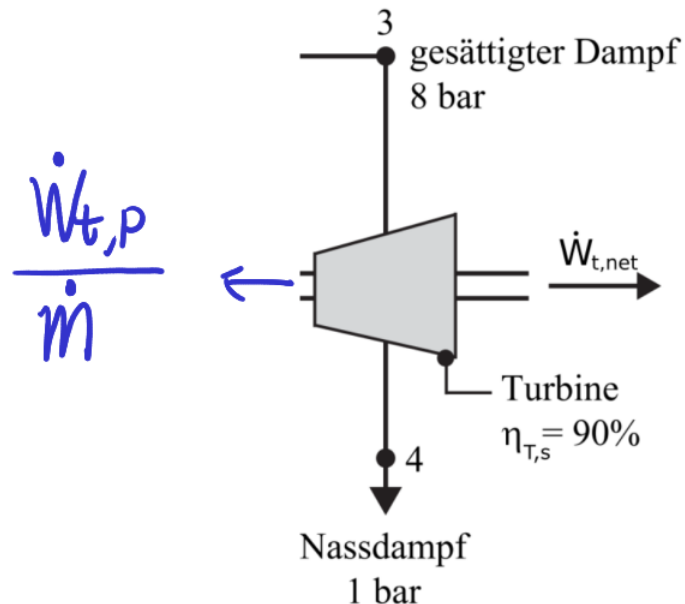
nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,p}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$

Nun an der Turbine

Now it is your turn to solve this problem!

I encourage you to give it a try!

You may follow the thinking step and hints with the upcoming slides.



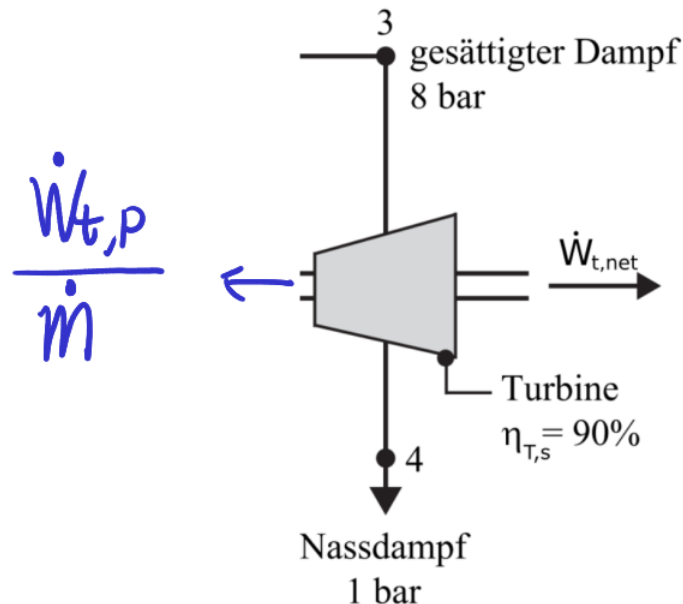
c) Bestimmen Sie die spezifische Nettoleistung des Gesamtprozesses $\frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}}$.

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

Nun an der Turbine

Mit der Info aus dieser Skizze könnte ihr eigentlich das Problem lösen

Welche Größe EZ zu bestimmen?

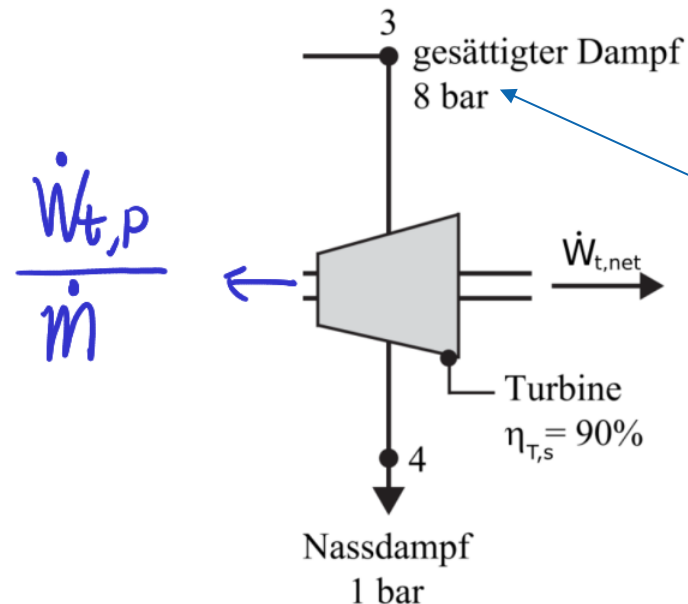


c) Bestimmen Sie die spezifische Nettoleistung des Gesamtprozesses $\frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}}$.

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

Nun an der Turbine

Mit der Info aus dieser Skizze könnte ihr eigentlich das Problem lösen



Welche Größe EZ zu bestimmen?

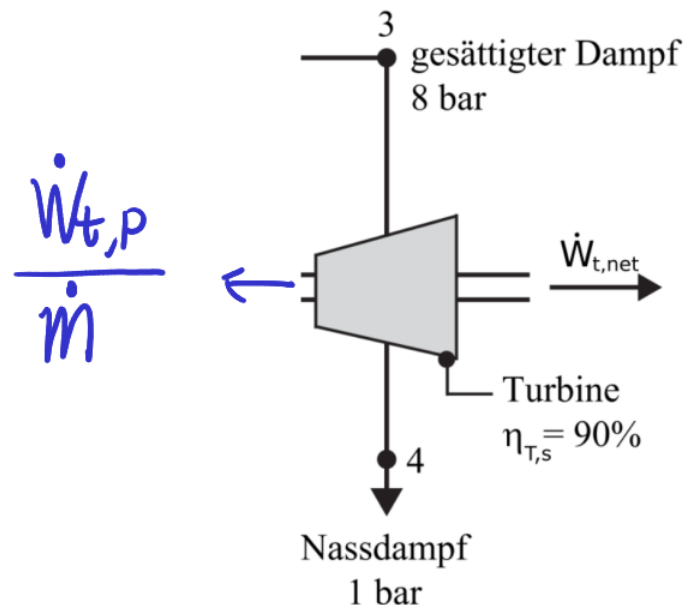
Sattdampf 8 bar, ND TAB
 $\chi = 1$

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

Energie Bilanz & Isentrope Wirkungsgrad aus ZF

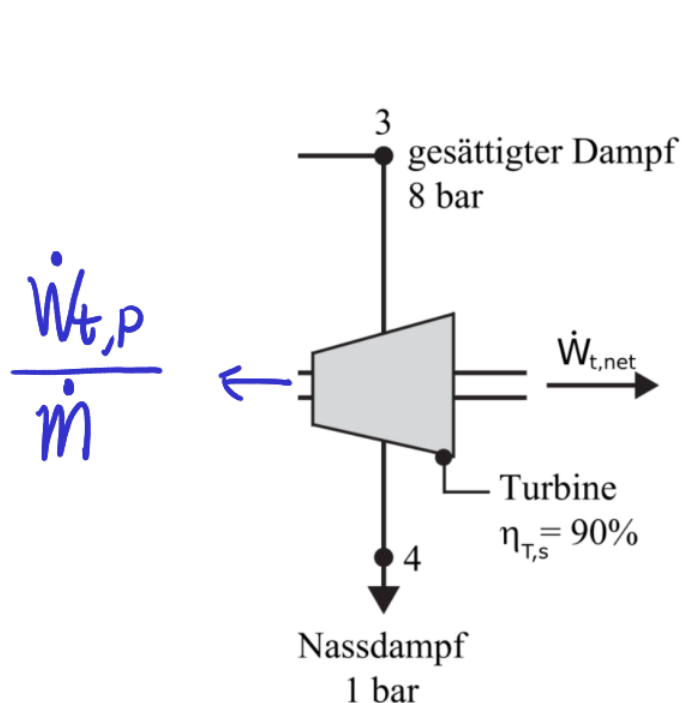


c) Bestimmen Sie die spezifische Nettoleistung des Gesamtprozesses $\frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}}$.

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

Nun an der Turbine

Energie Bilanz & Isentrope Wirkungsgrad aus ZF



$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

stationär adiabat

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

Aus ZF

Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)

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

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

isotrop

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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T$$

stationär adiabat

$$\Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

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

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

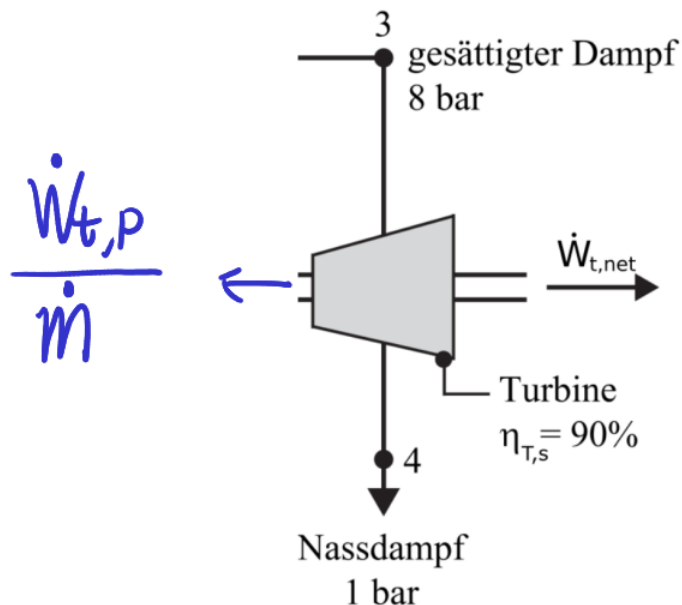
isotrop

Nun an der Turbine

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

Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) =$

$S_3 = S_g(8\text{bar}) =$



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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

stationär adiabat

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

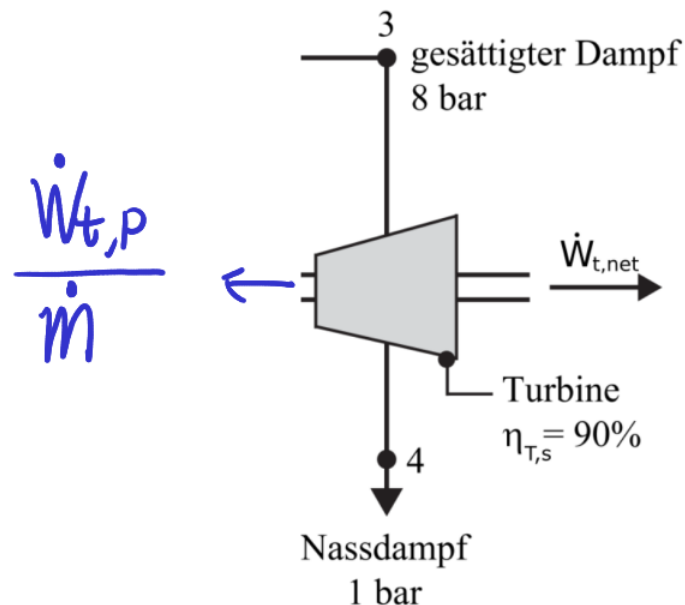
Nun an der Turbine

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

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

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

TAB A-3



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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T$$

stationär adiabatisch

$$\Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

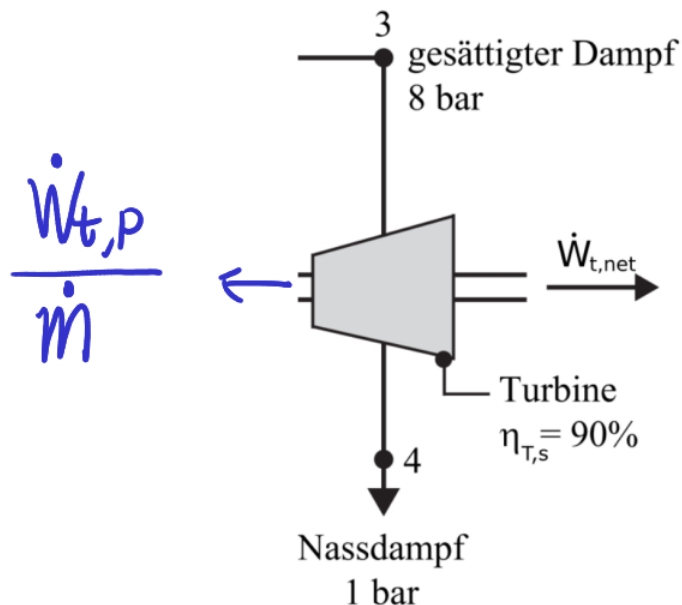
$$\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

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

(kontrolle)

Nun an der Turbine

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



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

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

3 $\rightarrow$ 4,s isentrop

$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=}$

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

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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

stationär adiabatisch

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

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

(Control)

Nun an der Turbine

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

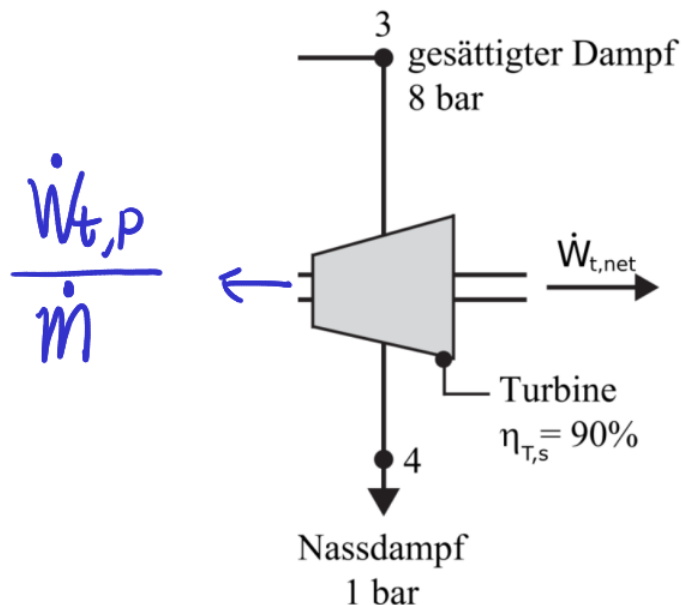
Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ TAB A-3
 $S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

3 → 4,s isentrop

$$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} S_3 = 6,6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

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

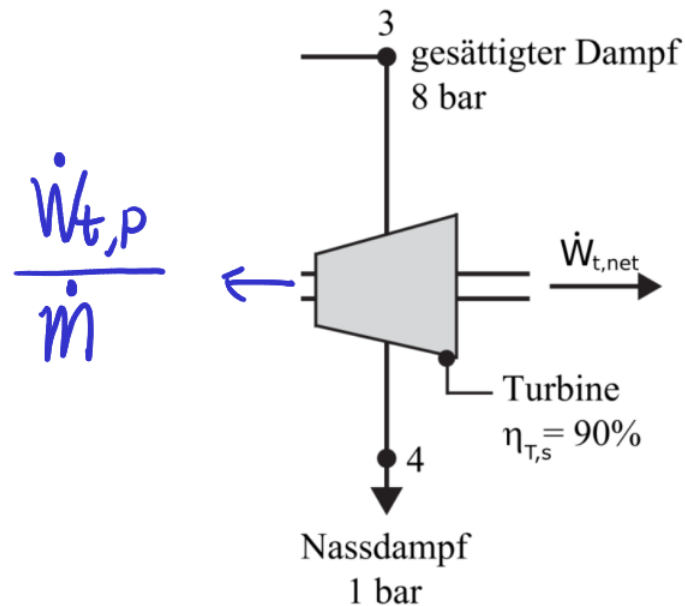
Um $h_{4,s}$ zu bestimmen, braucht man $x_{4,s}$ Wieso ist es in ND?



c) Bestimmen Sie die spezifische Nettoleistung des Gesamtsystems

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,p}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ $\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}$
stationär adiab

Nun an der Turbine



① mit $\Delta S = 0$ nach

Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ TA
 $S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

3 → 4,s isentrop

$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} S_3$

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

Um $h_{4,s}$ zu bestimmen, braucht man $x_{4,s}$ Wieso ist es in ND?

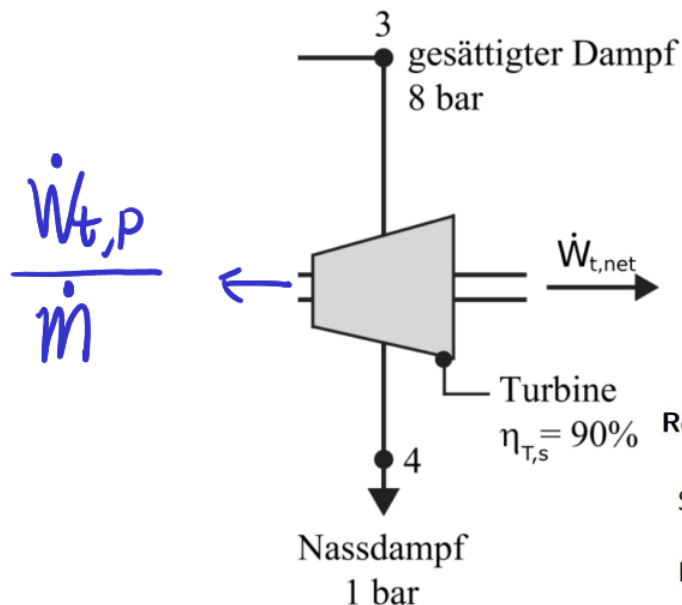
Entropy kJ/kg · K		Press. bar	
Sat. Liquid S_f	Sat. Vapor S_g		
0.4226	8.4746	0.04	$-h_4$ lösen
0.5210	8.3304	0.06	$-h_{4,s}$ (cont.)
0.5926	8.2287	0.08	
0.6493	8.1502	0.10	
0.8320	7.9085	0.20	chen
0.9439	7.7686	0.30	
1.0259	7.6700	0.40	
1.0910	7.5939	0.50	
1.1453	7.5320	0.60	
1.1919	7.4797	0.70	
1.2329	7.4346	0.80	
1.2695	7.3949	0.90	
1.3026	7.3594	1.00	← 1 bar

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

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$ $\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$ $\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$ lösen

Nun an der Turbine

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



Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{kJ}{kg}$ TAB A-3
 $S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} S_3 = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$
 $h_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C})$

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

Bei 1 bar, $99,63^\circ\text{C}$

$$S_{4,s} = S_f + x_{4,s}(S_g - S_f)$$

$$x_{4,s} =$$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

Dampfataeln $\phi = f(T, p)$

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

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

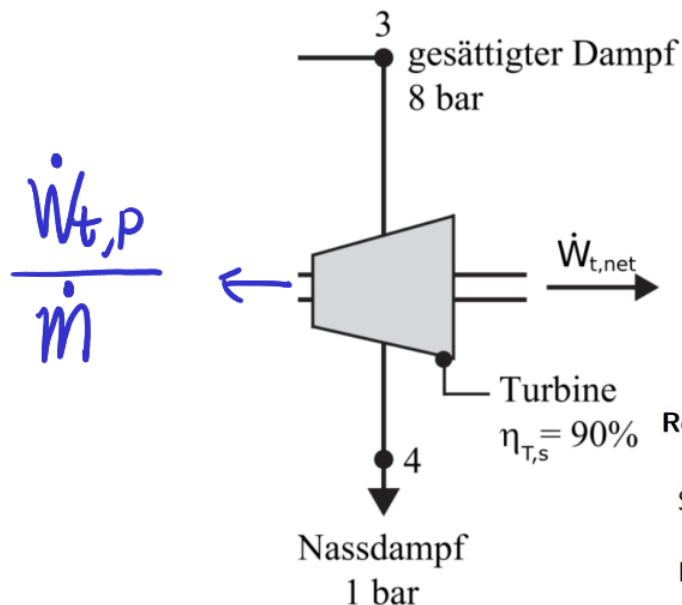
Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

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

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$ $\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$ $\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$ lösen

Nun an der Turbine

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



Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{kJ}{kg}$ TAB A-3
 $S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} S_3 = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$
 $h_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C})$

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

Bei 1 bar, $99,63^\circ\text{C}$

$$S_{4,s} = S_f + x_{4,s}(S_g - S_f)$$

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

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

Dampfataeln $\phi = f(T, p)$

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

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

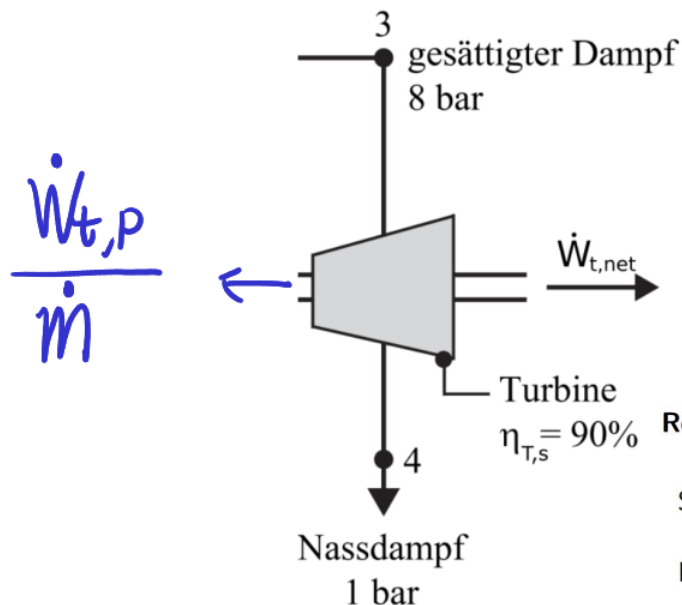
Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

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

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$ $\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$ $\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$ $\Rightarrow h_{4,s} = h_3 - \eta_{T,s}(h_3 - h_4)$ $\Rightarrow h_{4,s} = 2769,1 - 0,9(2769,1 - 1919,6) = 1919,6$ $\Rightarrow h_{4,s} = 1919,6 \frac{kJ}{kg}$ $\Rightarrow \frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$

Nun an der Turbine

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



Zustand 3: $h_3 = h_g(8bar) = 2769,1 \frac{kJ}{kg}$ TAB A-3
 $S_3 = S_g(8bar) = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$S_{4,s}(1bar, 99,63^\circ C) \stackrel{!}{=} S_3 = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ Um $h_{4,s}$ zu bestimmen, braucht man $x_{4,s}$
 $h_{4,s}(1bar, 99,63^\circ C)$

$x_{4,s} = 88,4988\%$ Bei 1 bar, $99,63^\circ C$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

Dampfataeln $\phi = f(T, p)$

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

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

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

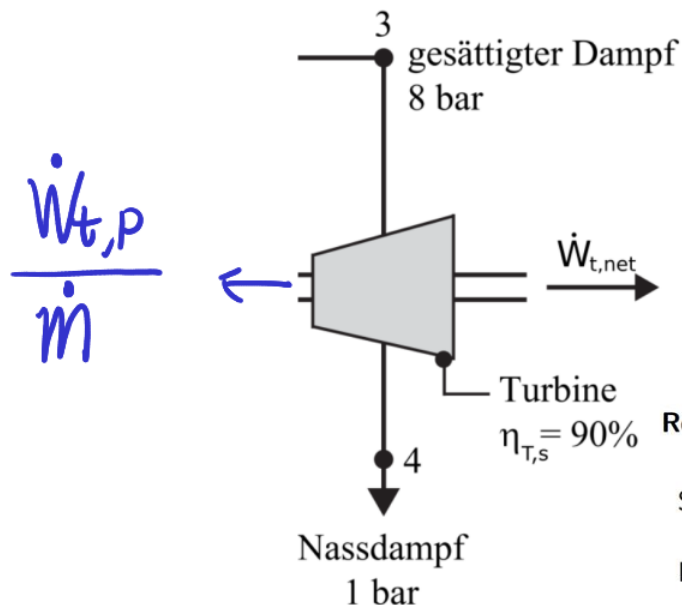
$h_{4,s} =$

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

nehme ML. weiter Rechnen. $\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$ $\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = h_3 - h_4$ $\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$ lösen

Nun an der Turbine

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



Zustand 3: $h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{kJ}{kg}$ TAB A-3
 $S_3 = S_g(8\text{bar}) = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

$S_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}) \stackrel{!}{=} S_3 = 6,6628 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ Um $h_{4,s}$ zu bestimmen, braucht man $x_{4,s}$
 $h_{4,s}(1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C})$

$x_{4,s} = 88,4988\%$ Bei $1\text{bar}, 99,63^\circ\text{C}$

$$h_{4,s} = h_f + x_{4,s}(h_g - h_f)$$

$$h_{4,s} = 2415,764649 \frac{kJ}{kg}$$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

Dampfataeln $\phi = f(T, p)$

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

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

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,p}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}(h_3 - h_4) + \dot{Q} - \dot{W}_T \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_T = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

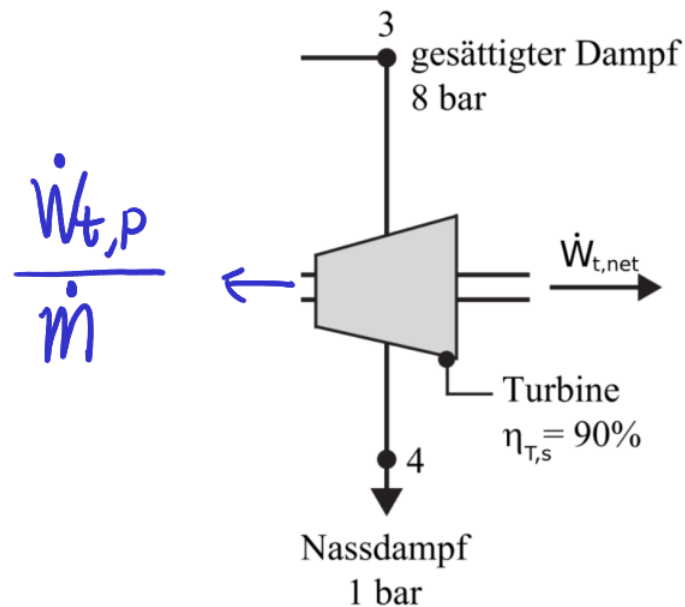
stationär adiabot

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

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

isotrop

Nun an der Turbine



② Einsetzen lösen nach $h_4 \leftarrow$ real Fall

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

$$h_{4,s} = 2415,764649 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}} \Rightarrow h_3 - h_4 =$$

$$\frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}} =$$

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

nehme ML. weiter Rechnen.

$$\frac{\dot{W}_{t,P}}{\dot{m}} = -1,004 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

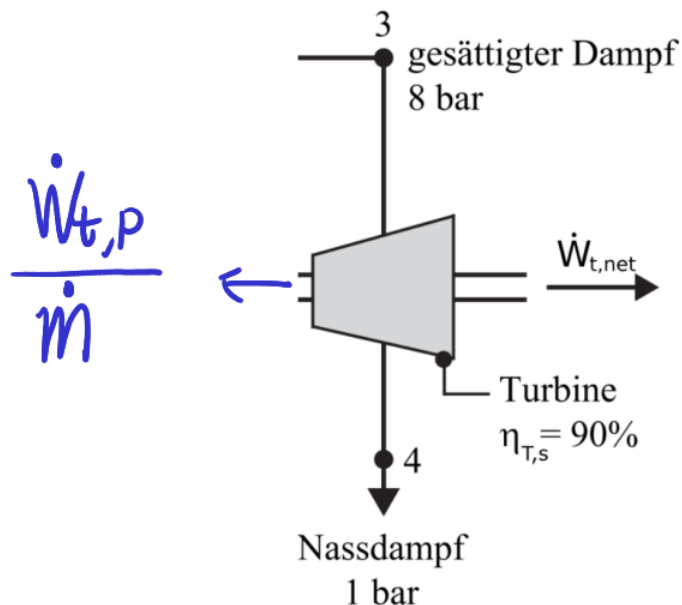
stationär adiabat

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

$$\eta_{T,s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}$$

geg. isentrop lösen

Nun an der Turbine



② Einsetzen lösen nach $h_4 \leftarrow$ real Fall

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

$$h_{4,s} = 2415,764649 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

$$\Rightarrow h_3 - h_4 = 318,0018 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

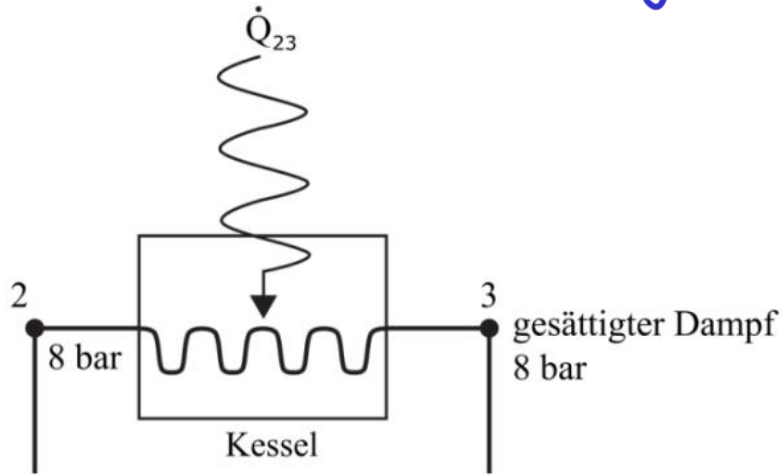
$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T + \dot{W}_V \quad | \cdot m^{-1} \Rightarrow \frac{\dot{W}_{t,net}}{\dot{m}} = [318,0018 - 1,004] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

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

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 $\downarrow$ 0, keine Arbeit.

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

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

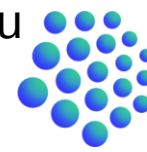
$$h_3 = h_g(8\text{bar}) = 2769,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{aus c)}$$

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

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

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

$$\text{ML. } 2642,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \checkmark$$



SRÜ:

Sehr viele Verluste, ziemlich real.

9.2

Adiabat + rev. => Isentrop

9.3

ACHTUNG: Dieser Verdichter ist nicht adiabat!

$$w_{12} = w_{12}^{\text{rev}} - \varphi_{12} \quad \text{mit } \varphi_{12}: \text{Dissipation}$$

9.4

Druckverlust im Wärmeübertrager, wie sieht h-s Diagramm aus?

Danke für die Aufmerksamkeit!





Selbstrechenübung

Feedback

