

Thermodynamik I Übungsstunde 05

Juncheng Fu (Elias)
01. November 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...)



SUCK

SQUEEZE

BANG

BLOW

Thermodynamics is hot. 🥰

Prozesse in offenen Systemen



Bilanzgleichung geschlossenes Sys.

Energie

Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$ $\frac{E}{m} = e = u + ke + pe$
 mit kinetischer Energie: $ke = \frac{KE}{m} = \frac{w^2}{2}$ und potentieller Energie: $pe = \frac{PE}{m} = g z$

1. Hauptsatz für geschlossenes Sys.

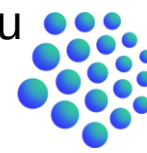
$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

▪ Geschlossenes System an einem Kolben:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{V,n}$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \sum_j Q_j - \sum_n W_{V,n}$$

Hauptmerkmal für geschlossenes Sys.: $\dot{m} = 0$



Bilanzgleichung **geschlossenes** Sys.

Aus ZF

Energiebilanz

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

Hauptmerkmal für geschlossenes Sys.: $\dot{m} = 0$

Aus ZF

- Geschlossenes System an einem Kolben:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{V,n}$$

Bilanzgleichung **offenes** Sys.

Aus ZF

Energiebilanz

Wieso Enthalpie h statt innere Energie u ?

$$\boxed{\frac{dE}{dt}} = \sum_i \dot{m}_i(t) \boxed{h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t)} + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$\left[\frac{J}{s}\right] \sim [W]$
 $\sim [kW]$

Zeitlich abgeleitet

$\left[\frac{kg}{s}\right]$

$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$\sim [kW]$

$\sim [kW]$

vgl.

$$\boxed{E = U + KE + PE}$$

massenspezifischer
Schreibweise

$$\frac{E}{m} = e = \boxed{u + ke + pe}$$

$$[J] \sim [kJ] \longrightarrow \left[\frac{J}{kg}\right] \sim \left[\frac{kJ}{kg}\right] \text{ (Auf TAB meistens kJ/kg)}$$



Bilanzgleichung **offenes** Sys.

Energiebilanz

Wieso Enthalpie h statt innere Energie u ?

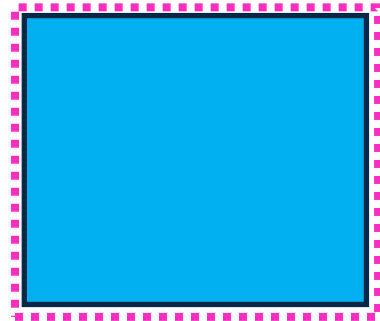
$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$$H = U + \boxed{pV}$$

Enthalpie inkl.
Ein und Ausschleubarbeit vgl. pdv
Herleitung in Vorlesung

$$\frac{E}{m} = e = u + ke + pe$$

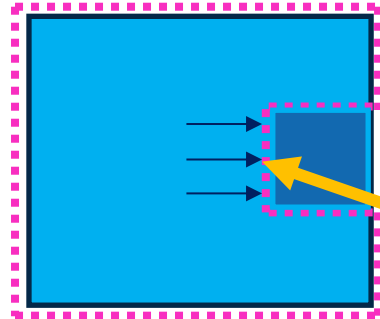
Herleitung der Enthalpie



$$E_1 = U_1 = m_1 \cdot u_1$$

KE PE vernachlässigen

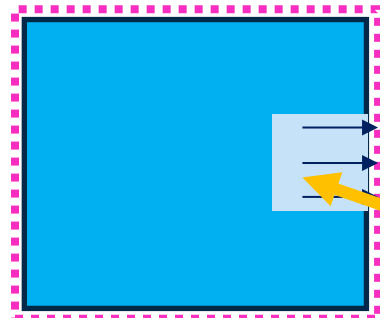
$$\Delta E_{1z} = U_z - U_1 = \cancel{m_1 \cdot u_1} - \Delta m \cdot u_m - \cancel{m_1 \cdot u_1} = -\Delta m \cdot u_m$$



$$E_z = U_z = m_1 \cdot u_1 - \Delta m \cdot u_m$$

$$\Delta E_{z2} = U_2 - U_z = \cancel{m_1 \cdot u_1} - \cancel{\Delta m \cdot u_m} - p\Delta V - \cancel{m_1 \cdot u_1} + \cancel{\Delta m \cdot u_m} = -p\Delta V$$

$$= -pv \cdot \Delta m$$

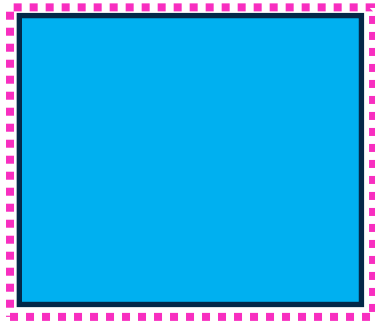


$$E_2 = U_2 = m_1 \cdot u_1 - \Delta m \cdot u_m - p\Delta V = m_2 \cdot u_2$$

$$\Delta E_{12} = \Delta E_{1z} + \Delta E_{z2} = -\Delta m \cdot u_m - pv \cdot \Delta m = -\Delta m(u_m + pv)$$

$$U_2 - U_1 = m_2 \cdot u_2 - m_1 \cdot u_1 = -\Delta m \cdot h$$

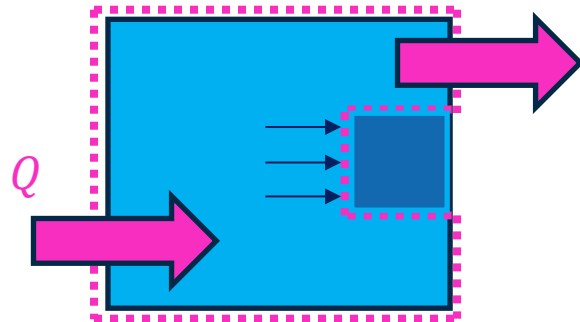
Herleitung der Enthalpie



KE PE vernachlässigen

$$\Delta E_{12} = \Delta E_{1z} + \Delta E_{z2} = -\Delta m \cdot u_m - pv \cdot \Delta m = -\Delta m(u_m + pv) + Q - W$$

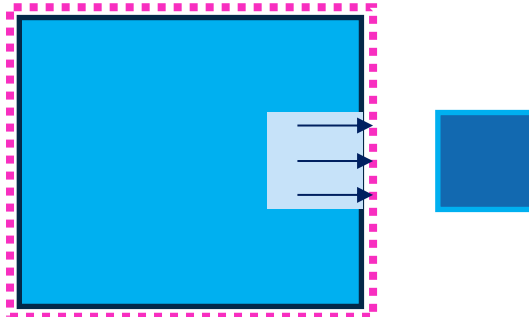
$$U_2 - U_1 = m_2 \cdot u_2 - m_1 \cdot u_1 = -\Delta m \cdot h + Q - W$$



Weil in unseres Bsp. Masse ausgeht, deswegen ein Minus,
Falls Masse eingeht, dann Plus

Vgl. Formel für halboffenes System

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \frac{w_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j Q_j - \sum_n W_n$$





Bilanzgleichung **offenes** Sys.

Energiebilanz

Wieso Enthalpie h statt innere Energie u ?

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$$H = U + \boxed{pV}$$

Enthalpie inkl.
Ein und Ausschiebarbeit vgl. pdv
Herleitung in Vorlesung

$$\frac{E}{m} = e = u + ke + pe$$

Deswegen hat man Enthalpie so definiert, sodass W technische Arbeitsterme saubere aussehen.

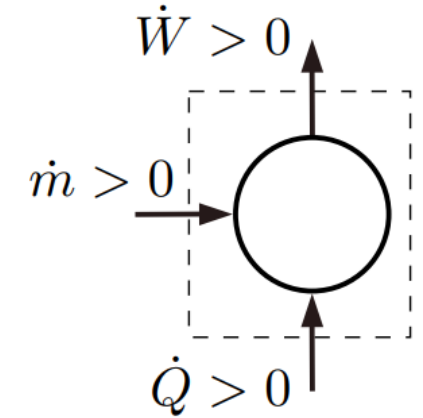
Bilanzgleichung **offenes** Sys.

Aus ZF

Vorzeichenkonvention

Zugeführte Massen- und Wärmeströme sind positiv, abgeführte negativ einzusetzen.

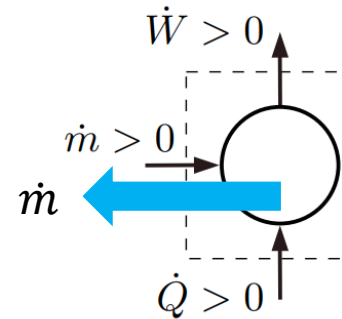
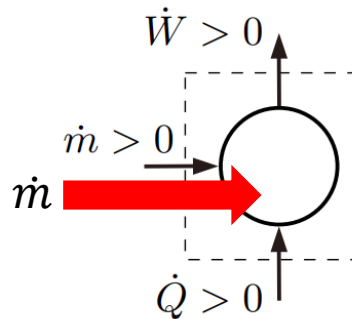
Zugeführte Arbeitsströme sind negativ, abgeführte positiv einzusetzen (vgl. Abbildung rechts).



$\dot{m}$ numerisch positiv

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

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



Vorzeichen Erklärung für
Q und W sehe 1.
Übungsstunde

Bilanzgleichung **offenes** Sys.

Aus ZF

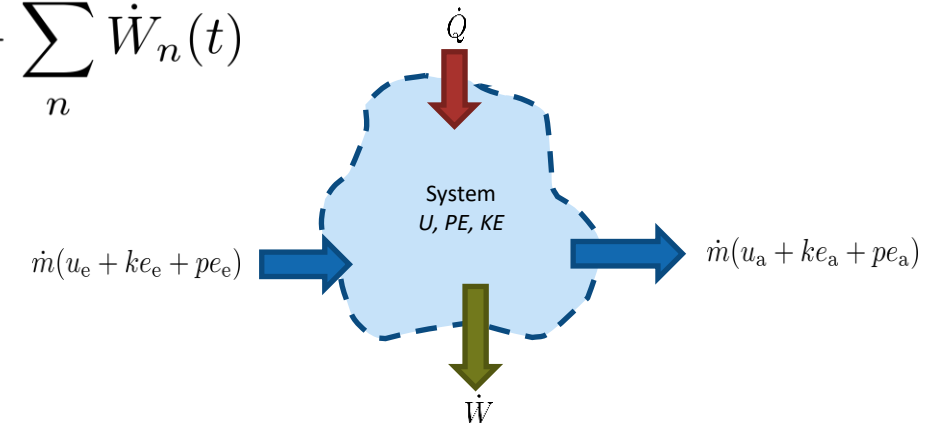
- Stationärer Fließprozess mit **einem** Massenstrom:

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

ausgehende (points to h_e , w_e^2 , z_e)
eingehende (points to h_a , w_a^2 , z_a)

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) [h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t)] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$\frac{dE}{dt} \rightarrow 0$, Stationär
 $\dot{m}_e = \dot{m}_a = \dot{m}$



Bilanzgleichung **halboffenes** Sys.

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

Zustandsgrößen-Änderung

$$\Delta E = \underline{m_2 u_2 - m_1 u_1} + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \frac{w_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j Q_j - \sum_n W_n$$

Massenflussprozess mit Prozessgrößen

Vgl. mit 1. HS **geschlossenes** Sys.

$$\Delta E = \underline{\Delta U} + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

Vgl. mit 1. HS **offenes** Sys.

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$



Bilanzgleichung **halboffenes** Sys.

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

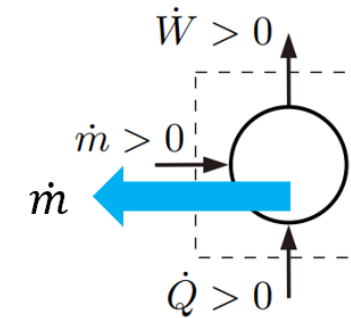
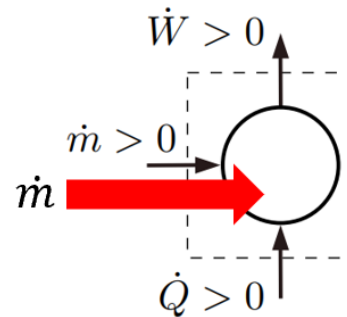
$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \frac{w_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j Q_j - \sum_n W_n$$

Δm **numerisch positiv**, egal ein oder aus.

Dann nach Vorzeichenkonvention ein **+** oder **-** davor setzen

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

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



Zusammenfassung

Stationäre Masse, die **nicht über** Sys. Grenze geht, benutzen $U; u$

Geschlossenes Sys.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$m \cdot u$$

Halboffenes Sys.
linke Seite der Bilanzgleichung
(Zustandsgröße-Änderung)

$$\Delta E = \underline{m_2 u_2} - \underline{m_1 u_1} + \Delta KE + \Delta PE =$$

Fließende Masse, die **über** Sys. Grenze geht, die Ein/Ausschiebarbeit benötigt, benutzen $H; h$

Offenes
Sys.

Energiebilanz

Massenflussprozess

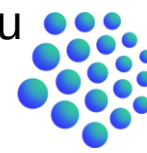
&

Prozessgrößen

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$$m \cdot h$$

Für halboffenes Sys. rechte Seite der Bilanzgleichung Analog



Formel für technische Arbeit

Spezifische technische Arbeit

(reversibler stationärer
Fließprozess)

Entropie Erzeugung = 0

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

- für Polytrope, $n = 1$:

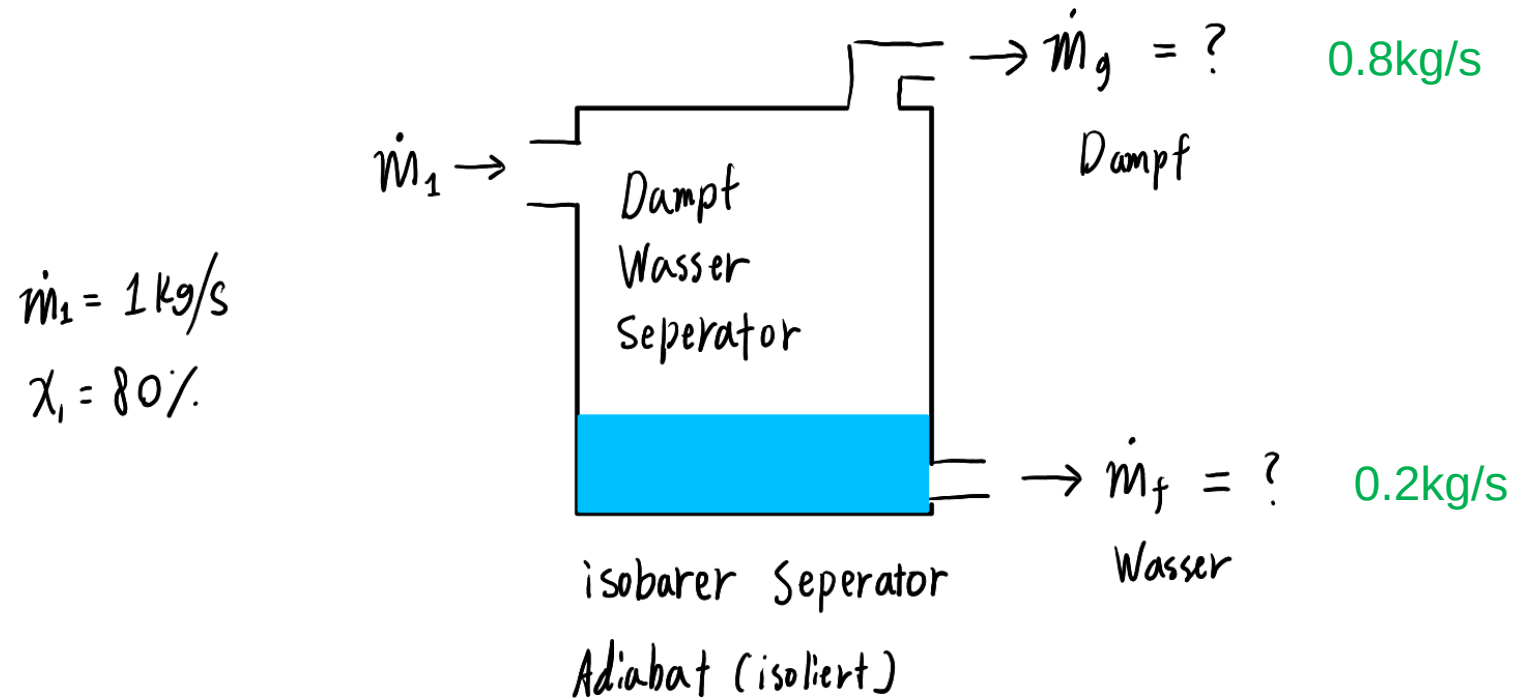
$$\left(\int_1^2 v \, dp \right)_{n=1} = - \left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n=1}$$

- für Polytrope, $n \neq 1$:

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

Persönlich Erfahrung: Ich habe diese Formeln kaum genutzt, weil entweder n für Realstoff unbekannt ist, oder vdp zu kompliziert zu lösen ist. Meistens gibt es auch andere einfache Wege technische Arbeit zu lösen.

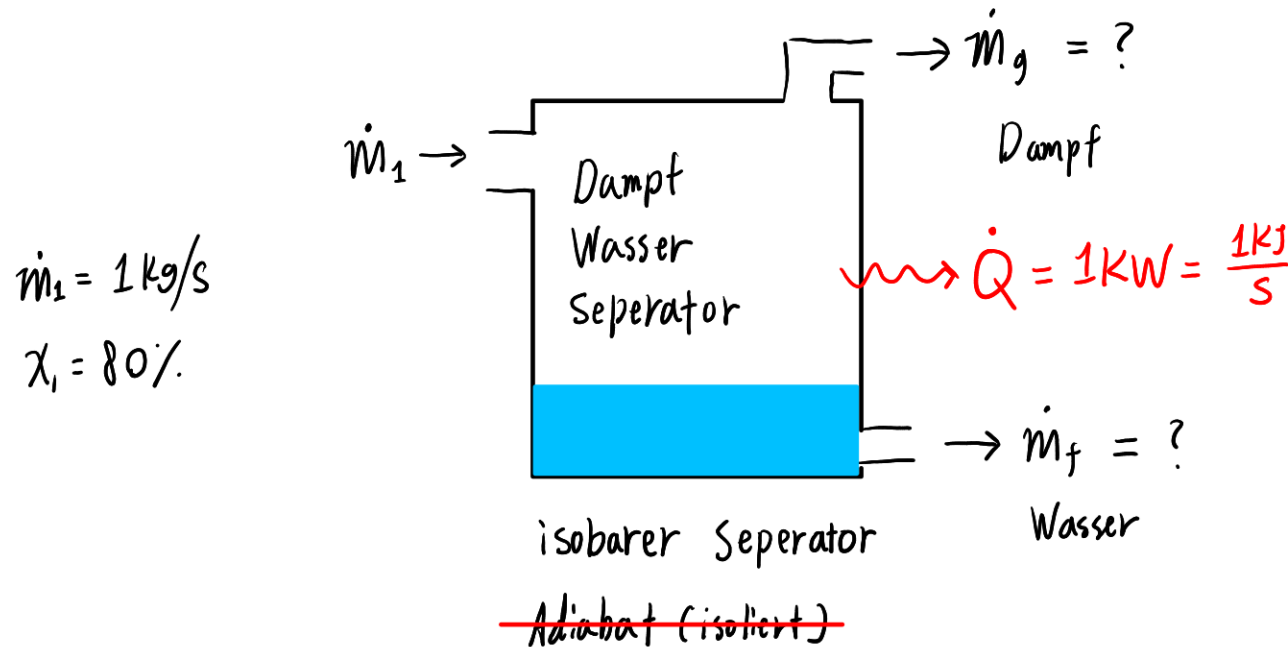
Bsp. offenes Sys. Dampf-Wasser-Seperator



bei Energie. (wegen Adiabat, keine W) ist h ix geändert,
 wir haben quasi Gas und Fluid nur getrennt.

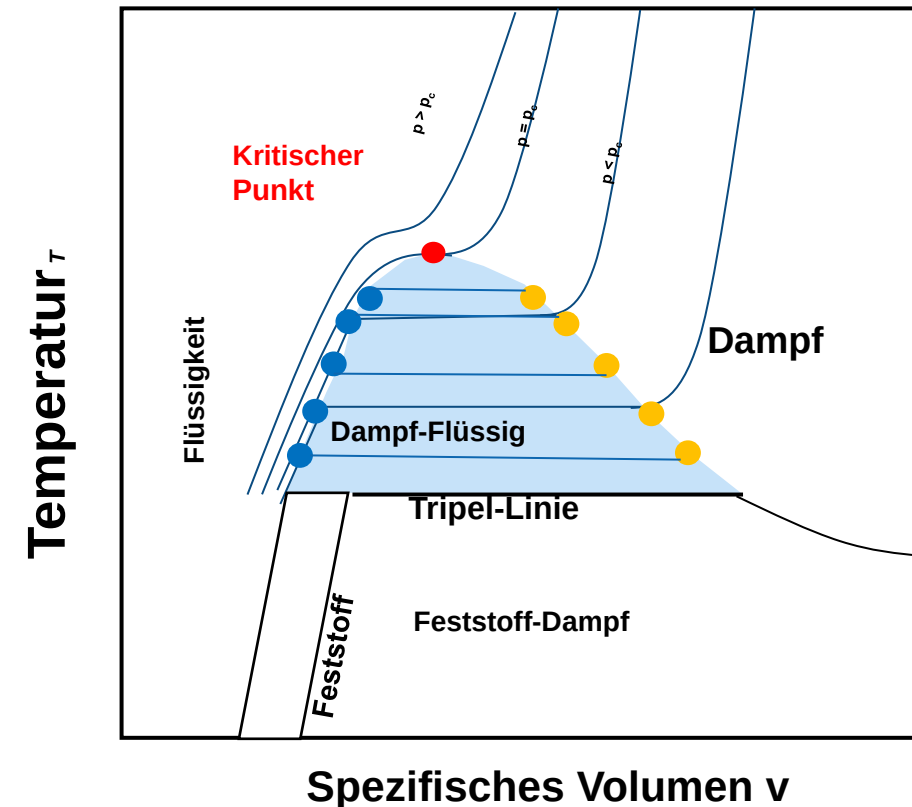
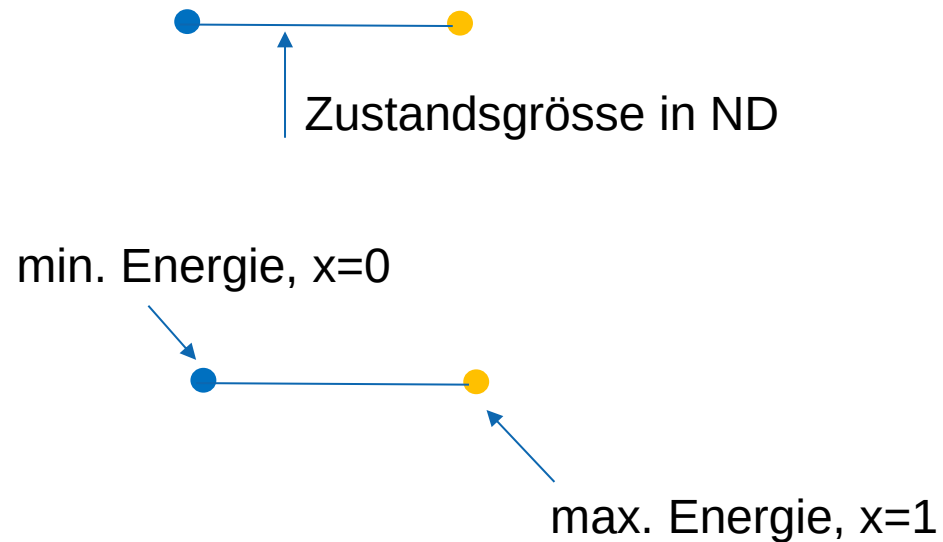
Bsp. offenes Sys. Dampf-Wasser-Seperator

⚠ Wichtig für Prüfungsvorbereitung



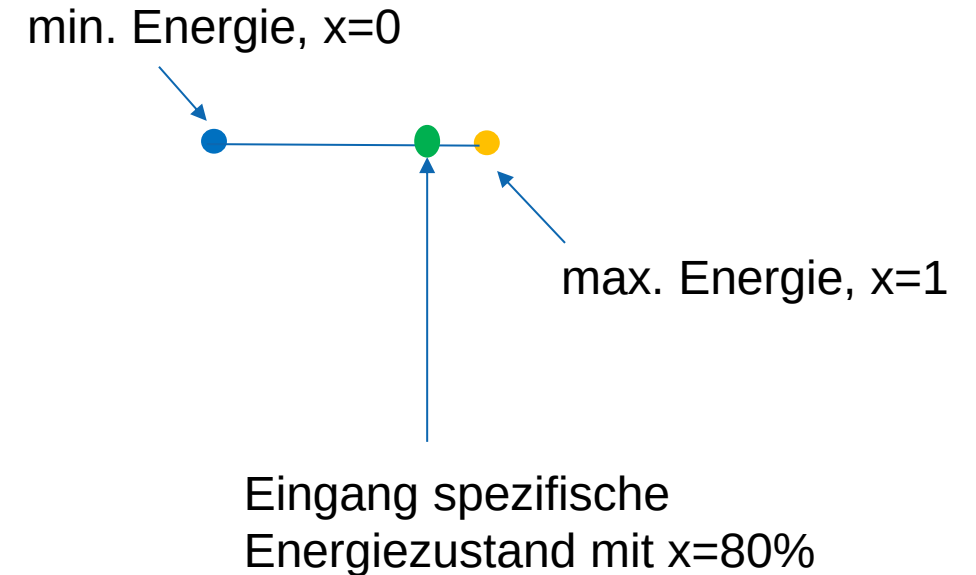
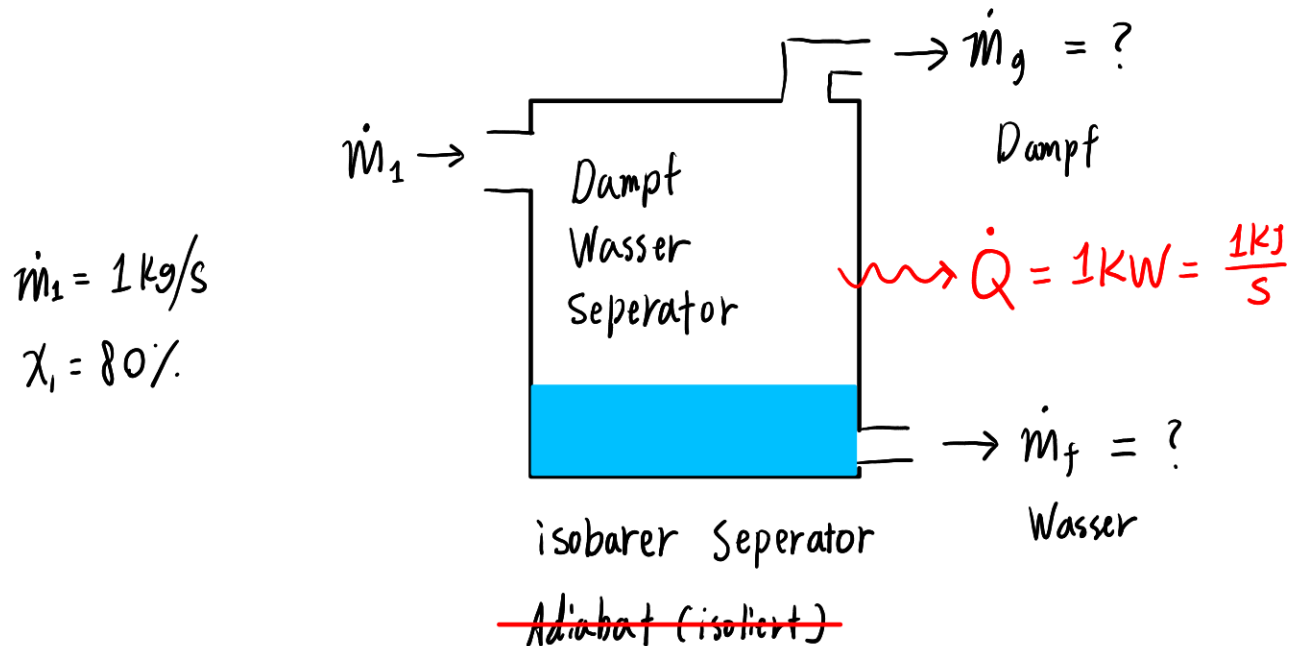
Überlegen bitte, Falls nicht adiabat,
wie ändert sich $\dot{m}_g$, $\dot{m}_f$ bei Ausgang?

In ND, auf einer Isobare/Isotherme,
je **grösser** der x ,
desto **mehr Dampf** hat die Mischung,
desto **höher** ist die **Energie** und **spezifische Volumen** von Mischung.



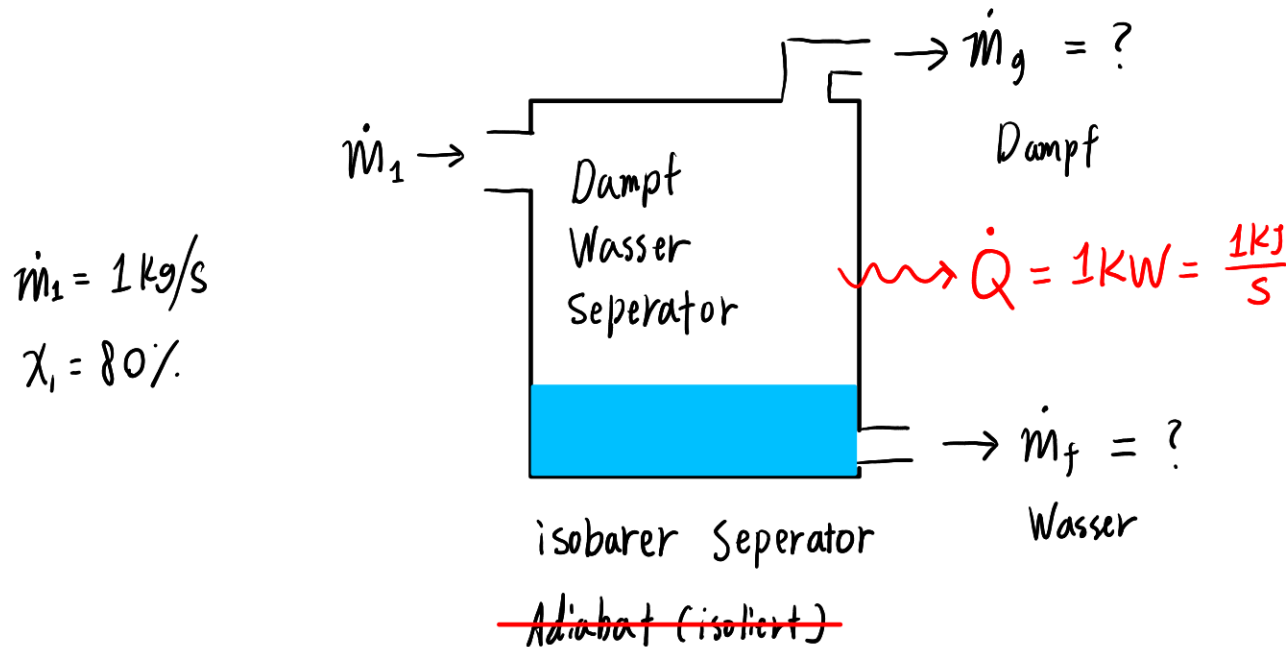
Bsp. offenes Sys. Dampf-Wasser-Seperator

⚠ Wichtig für Prüfungsvorbereitung

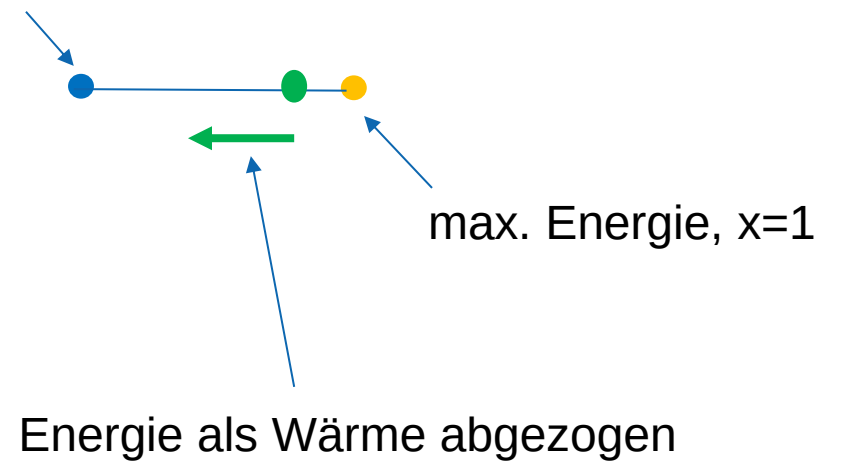


Bsp. offenes Sys. Dampf-Wasser-Seperator

⚠ Wichtig für Prüfungsvorbereitung

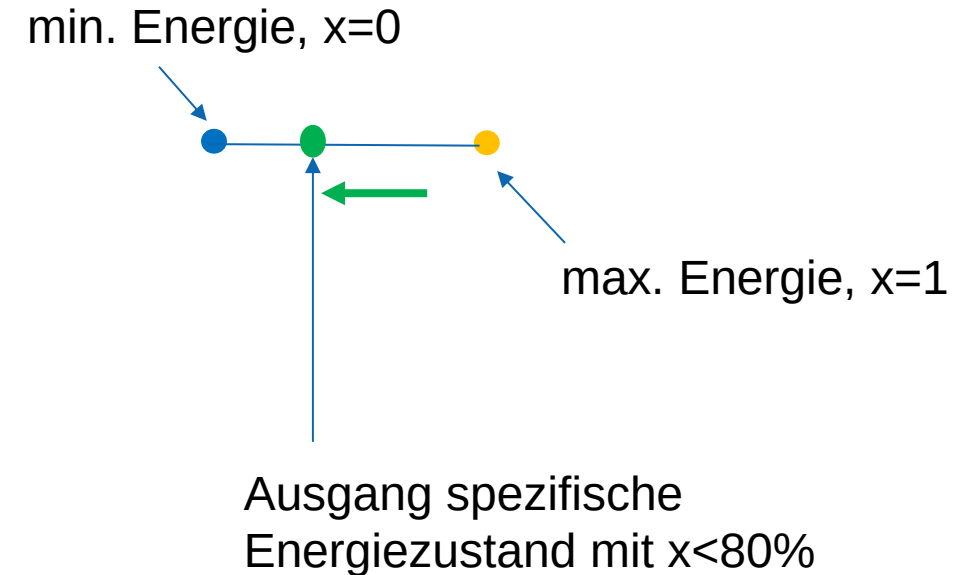
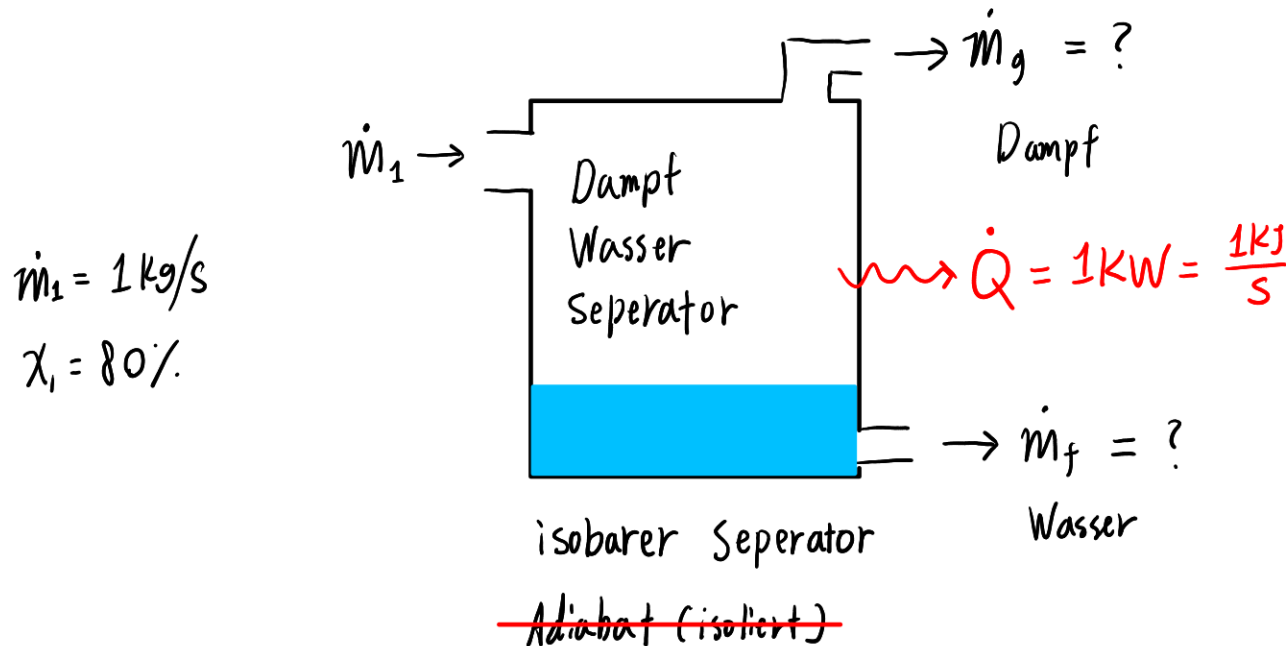


min. Energie, $x=0$



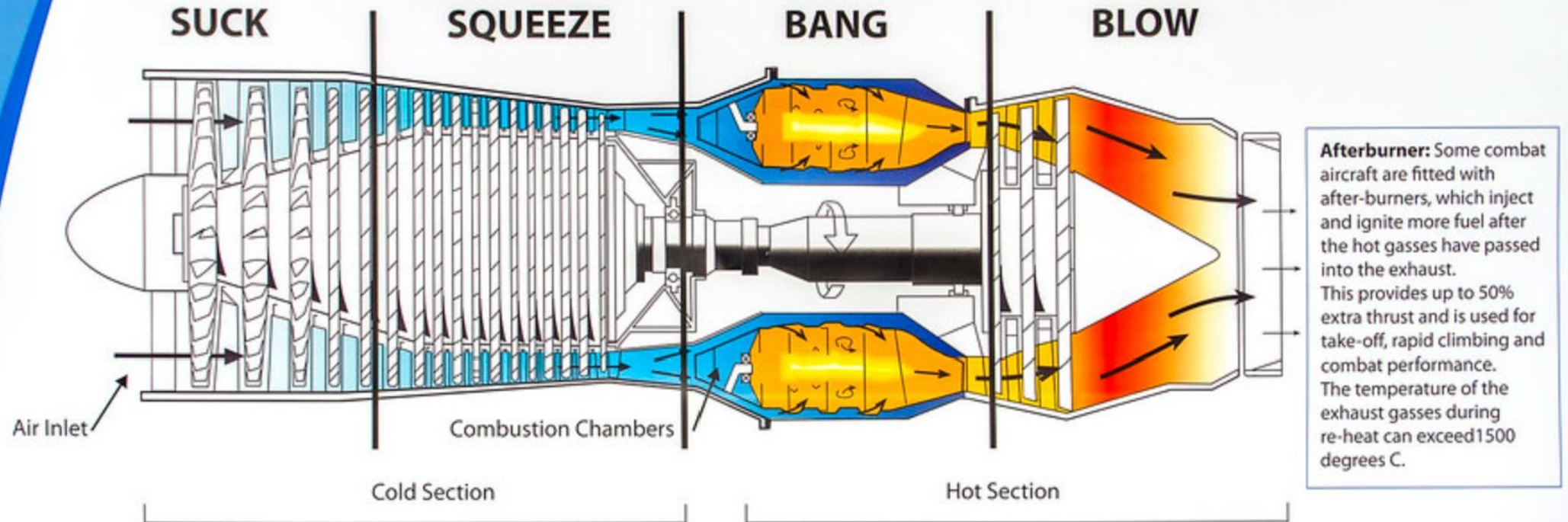
Bsp. offenes Sys. Dampf-Wasser-Seperator

⚠ Wichtig für Prüfungsvorbereitung



Wird weniger Dampf
rauskommen im Vgl. mit
adiabatem Fall

Lösungsansatz sehe Appendix in Notizen dieser Woche



Suck: A fan at the front sucks cold air into the engine.

Squeeze: The air is squeezed through the compressor raising the pressure and temperature.

Bang: The hot, high pressure air travels into the combustion chamber where a fuel mist is sprayed in. This fuel and air mix is then ignited with a high power spark (2000 volts), with the resultant gasses reaching a temperature of around 1200 degrees C.

Blow: The ignited fuel air mix expands rapidly forcing its way out of the combustion chamber, through a narrowed exhaust section which increases the speed of the gasses, creating thrust which pushes the aircraft forward.



LESE

epse
ENERGY & PROCESS SYSTEMS ENGINEERING

Vorrechenübung



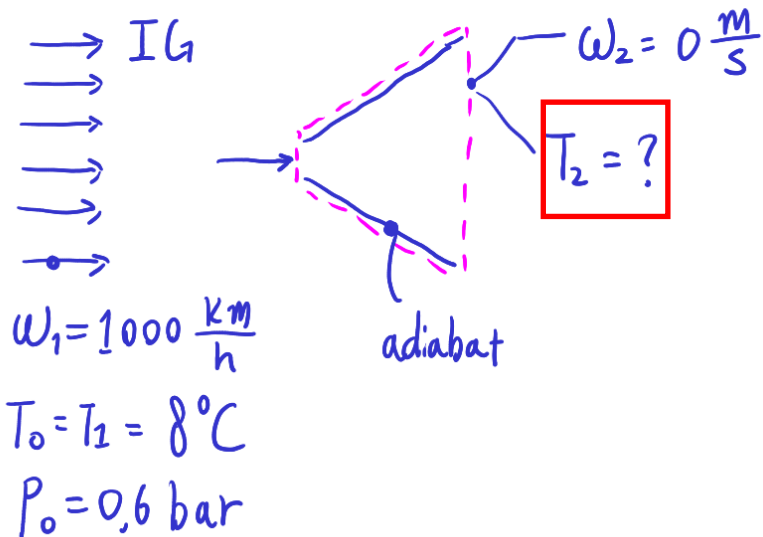
Vorrechenübung

Aufgabe 5.1 ●○○ Düsenmotor (stationärer Fließprozess)

Das Einlassrohr zu einem Düsenmotor formt einen Diffusor, der die Geschwindigkeit der Eintrittsluft relativ zur Maschine zu null verringert, bevor die Luft in den Kompressor eintritt. Betrachten Sie ein Düsenflugzeug, das mit einer Geschwindigkeit von $w_1 = 1000 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fliegt, wobei der örtliche Atmosphärendruck $p_0 = 0.6 \text{ bar}$ und die Temperatur $T_0 = 8^\circ\text{C}$ beträgt. Bestimmen Sie die Temperatur T_2 der Luft beim Eintritt in den Kompressor unter Annahme von idealem Gasverhalten und der Vernachlässigung von potentiellen Energieeffekten. Das System ist als adiabatisch zu betrachten.

Ausgang des Diffusors

Skizze mit Info:



$\approx 0,000 \dots 1 \text{ m/s} \approx 0 \text{ m/s}$

Sonst Massenbilanz
wird nicht erhalten.
aber w_2 ist klein
genug, $w_2 \approx 0 \text{ m/s}$

$$T_2 = ?$$

Blind Approach

Ansatzfindung : Abhängigkeit zur Temperatur?

System, Klassifizierung, Sys. Grenze

Energiebilanz.

Ganz Sys. ?

Sub Sys. ?

(manchmal nötig, aber auch aufwendig, man braucht gutes Verständnis)

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

Einheiten !

TAB
Einheit $u_2 - u_1$

Feder, Gravitation

Mechanischer Lösungsansatz
Kraft, GGW

Stoffmodelle Werkzeugkoffer

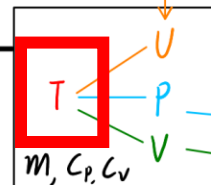
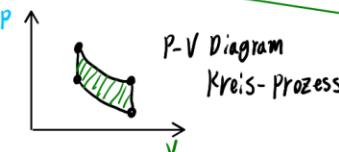
IG: $PV = mRT$ $u(T)$
 $h(T)$
 $U = m u$

PG

 $C_v, C_p = \text{const. geg. ?}$

$$\checkmark \Rightarrow P_G \Rightarrow \Delta u = C_v \cdot \Delta T$$

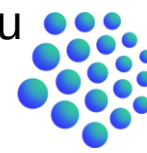
$$\Delta h = C_p \cdot \Delta T$$

 $X \rightarrow \text{TAB } u^g(T) ?$ $\checkmark \Rightarrow \text{TAB ablesen}$ $X \Rightarrow \text{IG} \rightarrow \text{PG approx. TAB A-20 ideal Gas Specific Heats ...}$ ① get T , ② read C_v, C_p ③ plug in PG get u, h Zustandsänderungs Prozess
isotherm, isobar, iso...

$$\int P dV$$

Arbeit, Federarbeit





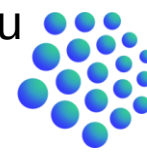
$$T_2 = ?$$

Blind Approach

Ansatzfindung : Abhängigkeit zur Temperatur?

Stoffmodell : I G $\Rightarrow$

- $pV = RT$
- $u(T)$
- $h(T)$



$$T_2 = ?$$

Blind Approach

Stottmodell : IG $\Rightarrow$

- $PV = RT$
- $u(T)$
- $h(T)$

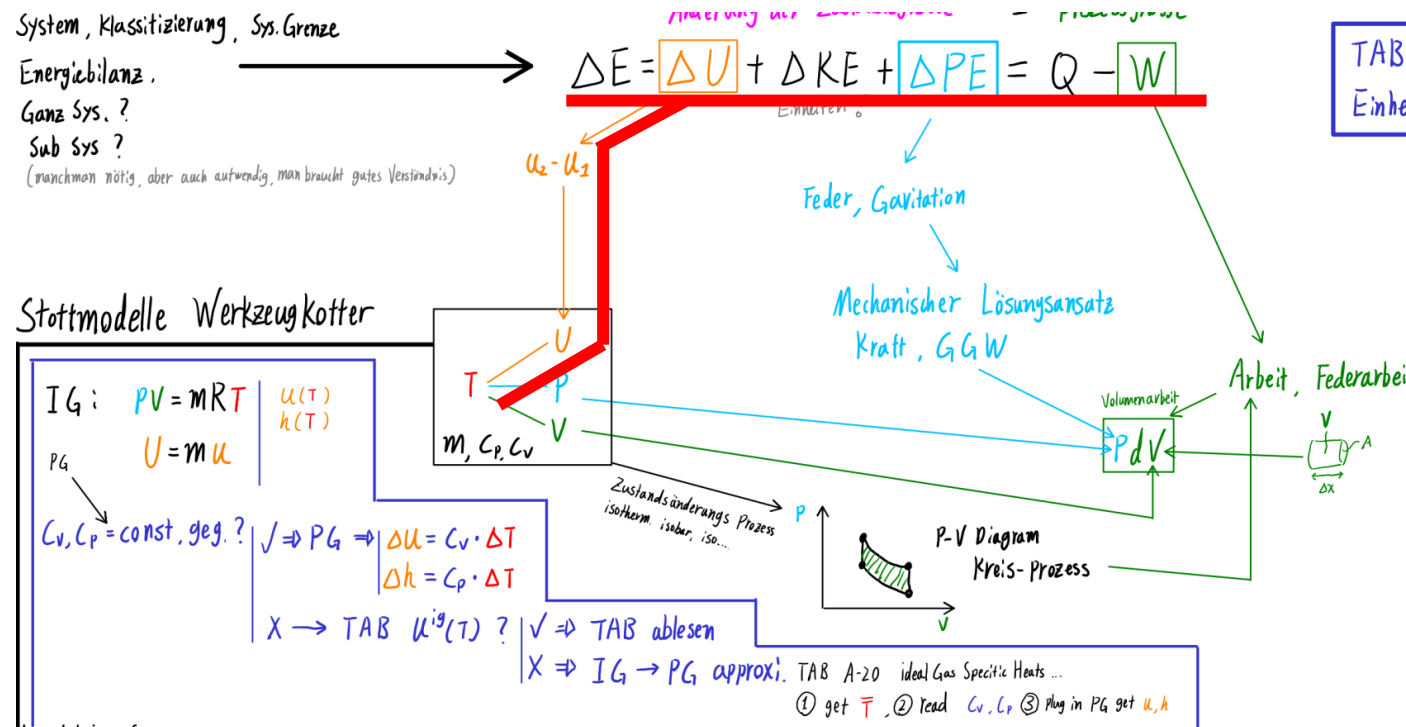
Evaluation für Ansätze

- $P_2 V_2 = R T$ Zustand 2, viele Unbekannte, Direkt Approach might be hard
- $u(T), h(T)$ $\leftarrow$ Diese Ansatz meistens über Bilanzgleichung

$$T_2 = ?$$

Blind Approach

- $P_2 V_2 = R T$ Zustand 2, viele Unbekannte, Direkt Approach might be hard
- $u(T), h(T)$ ← Diese Ansatz meistens über Bilanzgleichung

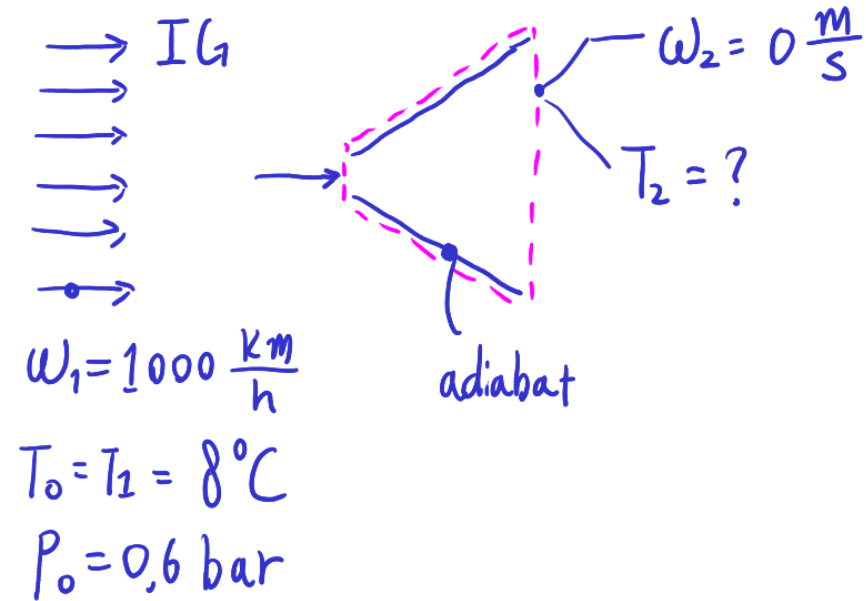


$T_2 = ?$ Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

Sys. Klassifizierung:

- $\dot{m} \neq 0 \Rightarrow$ offenes Sys.
- Adiabatisch $\Rightarrow Q = 0$
- Diffusor $\Rightarrow W = 0$

Skizze mit Info:



Energiebilanz

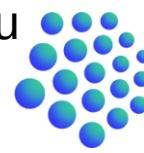
$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) [h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t)] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

0, stationär

0

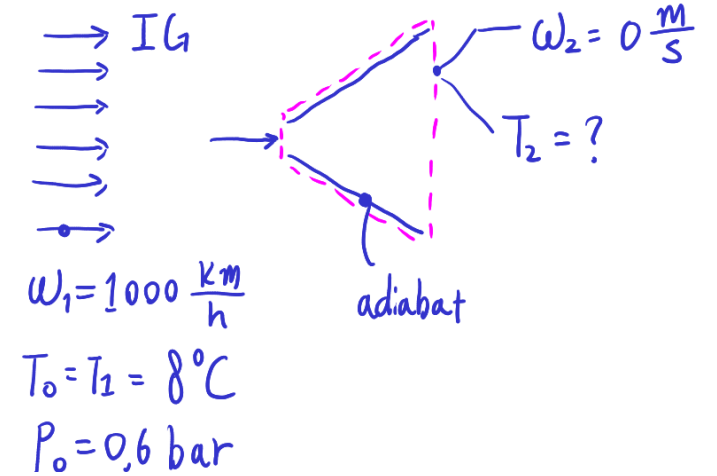
0

0



Skizze mit Info:

$T_2 = ?$ Try $u(T), h(T)$ Ansatz:



$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + PE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + PE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung

geg 0

Adiabat

- Leistet keine Arbeit
- Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
 - Keine tech. Arbeit,

$T_2 = ?$ Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2} + PE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2} + PE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung

geg $\dot{Q} = 0$

Adiabat

Leistet keine Arbeit

- Keine Volumenarbeit an Sys. Grenze.
- Keine tech. Arbeit,

Massenfluss rausklammert

Weil $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$$0 = \dot{m} \left(h_1 - h_2 + \frac{\omega_1^2}{2} \right) \quad | \cdot \dot{m}^{-1}$$

$$h_2 = h_1 + \frac{\omega_1^2}{2}$$

$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

$\frac{dE}{dt}$: stationär
 $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$: Massenfluss Erhaltung
 w_1, w_2 : geg.
 pE_1, pE_2 : Adiab.
 $\dot{Q} = 0$: Leistet keine Arbeit
 $\dot{W} = 0$: keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
 $\dot{W} = 0$: keine tech. Arbeit.

$$h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2}$$

Note:

$$h_2(\overset{\uparrow}{\text{ges.}} T_2) = h_1(\overset{\uparrow}{\text{geg.}} T_1) + \frac{\overset{\uparrow}{\text{geg.}} w_1^2}{2}$$

$\Rightarrow T_2$ mit TAB lösbar

$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

$\frac{dE}{dt}$: stationär
 $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$: Massenfluss Erhaltung
 $\frac{\omega^2}{2}$: geg.
 pE : Adiab.
 $\dot{Q} = 0$: Leistet keine Arbeit
 $\dot{W} = 0$: • Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
 • Keine tech. Arbeit.

Lösen: $h_2 = h_1 + \frac{\omega_1^2}{2}$

Einheiten ⚠

$$\omega_1 = 1000 \text{ km/h} = 277,778 \text{ m/s}$$

h : massenspezifische Enthalpie auf TAB,
haben $[\text{kJ/kg}]$ als Einheit.

Trick aus 2. Übungsstunde

⚠ $\frac{\omega^2}{2}$ KE mit $[\text{m/s}]^2$ ergibt $[\text{J}]$, diese muss zu $[\text{kJ}]$
damit die korrekter Faktor überall stimmen.

$$\frac{1}{2} \cdot (277,778)^2 \cdot \frac{1}{1000} = 38,58$$

$\uparrow$
 in m/s

$\uparrow$
 in kJ



$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung

geg. w_1 Adiabatisch

Leistet keine Arbeit

- Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
- Keine tech. Arbeit,

→ Lösen: $h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2}$

$$\frac{1}{2} \cdot (277,778)^2 \cdot \frac{1}{1000} = 38,58$$

in m/s in kJ

$$h_2(T) = h_1(\underbrace{T_1}_{8^\circ\text{C geg.} \rightarrow 281,15\text{ K}}) + 38,58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

TAB A-22



$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung
geg. $\circ$ Adiab. $\circ$ Leistet keine Arbeit
 $\circ$ Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
 $\circ$ Keine tech. Arbeit.

→ Lösen: $h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2}$

$$h_2(T) = h_1(\underline{T_2}) + 38,58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

↑
8°C geg. → 281,15 K

TABLE A-22

Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)											
				when $\Delta s = 0^1$						when $\Delta s = 0$	
T	h	u	s°	p _r	v _r	T	h	u	s°	p _r	v _r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7

lerp. $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1$

lerp. @ 281,15 K ⇒ $h_2 = 281,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung
 geg. w_1, w_2
 Adiab. $\dot{Q} = 0$
 • Leistet keine Arbeit
 • Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
 • Keine tech. Arbeit, $\dot{W} = 0$

→ Lösen: $h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2}$

lerp. @ 281,15 K $\Rightarrow h_1 = 281,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$$h_2(T) = h_1(T_1) + 38,58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$\uparrow$
 8°C geg. $\rightarrow 281,15 \text{ K}$

$$\underline{h_2(T)} = 281,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 38,58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{319,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

lerp. zurück nach Temp.

$$T_2 = ?$$

Try $u(T), h(T)$ Ansatz:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + pE_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + pE_2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Stationär $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ Massenfluss Erhaltung

geg. $\frac{w_1^2}{2}$ Adiab. $\dot{Q} = 0$

Leistet keine Arbeit
• Keine Volumenarbeit an sys. Grenze.
• Keine tech. Arbeit

→ Lösen: $h_2 = h_1 + \frac{w_1^2}{2}$

$$h_2(T) = 281,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 38,58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 319,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

lerp. zurück nach Temp.

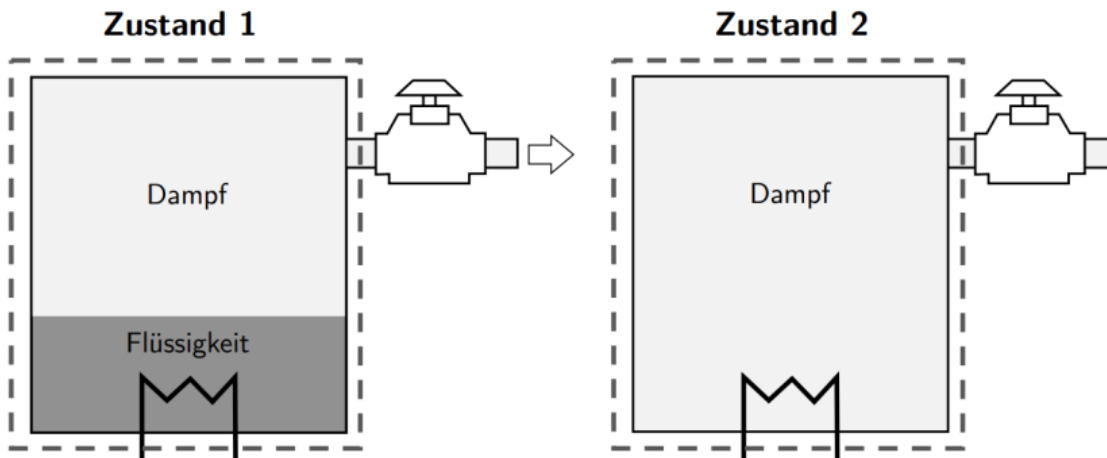
	$h [\text{kJ/kg}]$	$T [\text{K}]$	TAB A-22
x_1	315,27	y_1	315
x	319,9	y	319,6 ← lerp.
x_2	320,29	y_2	320

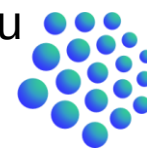
$$T_2 = \underline{\underline{319,6 \text{ K}}} \quad \text{Das ist ML :)$$

Aufgabe 5.2 ●●○ Wärmeübertrag an einem entleerenden Tank

Ein Tank mit einem Volumen von $V = 0.85 \text{ m}^3$ beinhaltet Wasser als Zweiphasengemisch aus Dampf und Flüssigkeit mit einer Temperatur von $T = 260^\circ\text{C}$. Der Dampfanteil im Tank beträgt anfangs (Zustand 1) $x = 0.7$. Gesättigter Dampf verlässt den Tank durch ein Druckregelventil am Kopf des Tanks. Um den Tank bei konstantem Druck zu halten, wird er von einem Wärmestrom $\dot{Q}$ erhitzt. Dampf verlässt den Tank solange, bis der Tank vollständig mit gesättigtem Dampf bei $T = 260^\circ\text{C}$ gefüllt ist (Zustand 2). Kinetische und potentielle Energien sind vernachlässigbar.

Bestimmen Sie die insgesamt übertragene Wärmemenge Q_{12} .





Ansatzfindung: Q_{12} , Prozessgröße ist gefragt.

Wie viele Info kennen wir ?

Zustand 1 V, ND, x, T_1 wegen ND gekoppelte Druck $\rightarrow P_1$

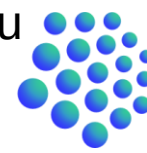
Prozess: Isobar, in ND $\Rightarrow$ Isotherm

$V = \text{const.}$, m geht raus. $\Rightarrow m \searrow$

sät. Dampf geht raus, m verlassen sys. mit $h_g(T)$

isotherm
↓

Q geht rein. ges.



Ansatzfindung: Q_{12} , Prozessgröße ist gefragt.

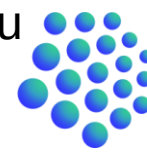
Wie viele Info kennen wir ?

Zustand 2 V , Sät. Dampf $x=1$ mit $h_g(T)$ oder $u_g(T)$

$$T_2 = T_1$$

Zusätzlich: $KE, PE = 0$, Annahme $W_V = 0$

halboffenes Sys.



Ansatzfindung: Q_{12} , Prozessgröße ist gefragt.

Viele Into über Zustände, Teilweiser auch über Prozessvorgang.
gefragt ist Prozessgröße Q , $\Rightarrow$ Bilanzgleichung nützlich



$KE, PE = 0$, Annahme $W_V = 0$

halboffenes Sys.

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \cancel{\frac{w_i^2}{2}} + \cancel{g z_i} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k \cancel{W_k}$$

$\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$
 Aufgabe geg. KE PE vernachlässigen , unsere Annahme

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

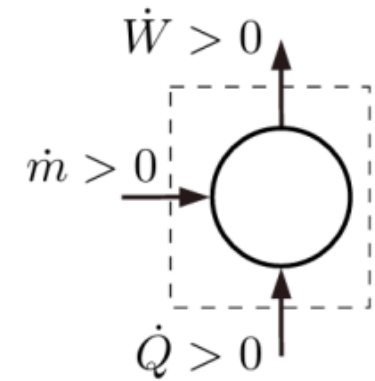
$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \cancel{\frac{w_i^2}{2}} + \cancel{g z_i} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k \cancel{W_k}$$

$\downarrow$ Aufgabe geg. $\downarrow$ KE $\downarrow$ PE $\downarrow$, unsere Annahme
 vernachläss'gt

$\Delta m = m_1 - m_2$: Masse, die raus geht, Δm numerisch positive

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

$\uparrow$ Weil es raus Sys. geht



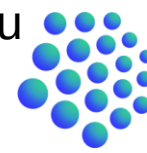
Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \underbrace{\cancel{\Delta KE}}_0 + \underbrace{\cancel{\Delta PE}}_0 = \sum_i \Delta m_i \left[\underbrace{\cancel{h_i}}_0 + \underbrace{\cancel{\frac{u_i^2}{2}}}_0 + \underbrace{\cancel{g z_i}}_0 \right] + \sum_j Q_j - \sum_k \cancel{W_k}$$

Aufgabe geg. KE PE vernachlässig 0, unsere Annahme



$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

Lösen m_1

geg.: V, X, ND, T

geg.: V, x, ND, T

Tipp für Lösungsansatz über ND

Falls x geg. d.h. Stoff in ND. Falls dann noch T oder P (in ND. T, P gibt gleiche Info) geg. $\Rightarrow$ massenspezifische Zustandsgröße $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$ v, u, h, s sind durch $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$ mit TAB ganz genau zu bestimmen.

Recall "Dimension Anal." aus Übungsstunde 1,

$$\begin{array}{c}
 \boxed{v, u, h, s} \\
 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right] \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \dots \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]
 \end{array}
 \longleftrightarrow
 \boxed{m}
 \left[\text{kg}\right]
 \longleftrightarrow
 \begin{array}{c}
 \boxed{V, U, H, S} \\
 \left[\text{m}^3\right] \left[\text{kJ}\right] \dots \left[\frac{\text{kJ}}{\text{K}}\right]
 \end{array}$$

Falls 2 $\square$ geg. dann 3. $\square$ lösbar. z.B. V, m geg. $\Rightarrow v$ lösbar; u, U geg $\Rightarrow m$ lösbar

x, ND, T geg. $\Rightarrow v$ lösbar, combi mit geg. $V \Rightarrow m$ lösbar

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \underbrace{\Delta KE}_0 + \underbrace{\Delta PE}_0 = \sum_i \Delta m_i \left[\underbrace{h_i}_{\text{Aufgabe geg.}} + \underbrace{\frac{u_i^2}{2}}_{\text{KE Vernachlässig.}} + \underbrace{g z_i}_{\text{PE}} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

0, unsere Annahme

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

Lösen m_1

geg.: V, X, ND, T

X, ND, T geg. $\Rightarrow V$ lösbar, combi mit geg. $V \Rightarrow m$ lösbar

$$v_1 = \frac{V}{m_1} \Rightarrow m_1 = \frac{V}{v_1}$$

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} = \sum_i \Delta m_i \left[\cancel{h_i} + \cancel{\frac{u_i^2}{2}} + \cancel{g z_i} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

Aufgabe geg. KE PE Vernachlässigung 0, unsere Annahme

n.ethz.ch/~juncfu



$$m_2 u_2 + \boxed{m_1 u_1} = -\Delta m h_{\text{dampf}} + Q_{12}$$

$$\Rightarrow m_1 = \frac{V}{v_1}$$

Aus ZF Nassdampf

$$\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f) \Rightarrow v_1 = v_f + x(v_g - v_f)$$

ND: $x = 0.7$ $T = 260^\circ\text{C}$

TAB-A2

Pressure Conversions:
bar = 0.1 MPa
= 10^2 kPa

(continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		
		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
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausströmbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \underbrace{\Delta KE}_0 + \underbrace{\Delta PE}_0 = \sum_i \Delta m_i \left[\underbrace{h_i}_{\text{Aufgabe geg.}} + \underbrace{\frac{u_i^2}{2}}_{\text{KE Vernachlässig.}} + \underbrace{g z_i}_{\text{PE}} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

0, unsere Annahme

n.ethz.ch/~juncfu



$$m_2 u_2 + \boxed{m_1 u_1} = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

$$\Rightarrow m_1 = \frac{V}{V_1}$$

$$V_1 = 1,2755 \times 10^{-3} + 0,7 (0,04221 - 1,2755 \times 10^{-3}) = 29,93 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V = 0,85 \text{ m}^3$$

$$m_1 = \frac{V}{V_1} = \frac{0,85 \text{ m}^3}{29,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}} = 28,4 \text{ kg}$$

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \frac{u_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

Aufgabe geg. KE PE Vernachlässig 0, vorgeb. Annahme

n.ethz.ch/~juncfu



$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{dampf}} + Q_{12}$$

Lösen u_1

Aus ZF Nassdampf

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

ND: $x = 0,7$ $T = 260^\circ\text{C}$

TAB-A2

Pressure Conversions:
bar = 0.1 MPa
= 10^2 kPa

(continued)

		Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		
Temp. °C	Press. bar	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
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6

$$u_1 = 1128,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,7(2599 - 1128,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2157,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \dot{m}_i \left[h_i + \frac{u_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j \dot{Q}_j - \sum_k \dot{W}_k$$

Aufgabe geg. KE PE vernachlässigen 0, vorseite Annahme

n.ethz.ch/~juncfu



$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

Lösen m_2 $m_2 = \frac{V}{V_g}$

Zustand 2 : 100% Dampf @ 260°C

Pressure Conversions:
bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

(continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		
		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
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6

$V_g = 0,04221 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ TAB-A2 $\longrightarrow$ $m_2 = \frac{V}{V_g} = 20,14 \text{ Kg}$

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \Delta KE + \Delta PE = \sum_i \Delta m_i \left[h_i + \frac{u_i^2}{2} + g z_i \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

Aufgabe geg. KE PE vernachlässigen 0, unsere Annahme

n.ethz.ch/~juncfu

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

Zustand 2 : 100% Dampf @ 260°C

Pressure Conversions:
bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

(continued)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6

$$u_2 = u_g = 2599 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{\text{Dampf}} = h_g = 2796.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wärmemenge Q_{12} .

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \underbrace{\Delta KE}_{\substack{\text{Aufgabe geg.} \\ \text{O} \\ \text{O}}} + \underbrace{\Delta PE}_{\substack{\text{KE PE} \\ \text{Vernachlässig} \\ \text{O}}} = \sum_i \Delta m_i \left[\underbrace{h_i}_{\substack{\text{O} \\ \text{O}}} + \underbrace{\frac{u_i^2}{2}}_{\substack{\text{O} \\ \text{O}}} + \underbrace{g z_i}_{\substack{\text{O} \\ \text{O}}} \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

O, vorgegebene Annahme

n.ethz.ch/~juncfu

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$



$$\Delta m = m_1 - m_2$$

Aus ZF

- Halboffenes System:
(Systemmasse nicht konstant,
Ein-/Ausschubbedingungen
konstant)

$$\Delta E = m_2 u_2 - m_1 u_1 + \underbrace{\Delta KE}_{\text{Aufgabe geg.}} + \underbrace{\Delta PE}_{\text{KE PE Vernachlässig}} = \sum_i \Delta m_i \left[\underbrace{h_i}_{\text{unsere Annahme}} + \underbrace{\frac{u_i^2}{2}}_0 + \underbrace{g z_i}_0 \right] + \sum_j Q_j - \sum_k W_k$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q_{12}$$

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -\Delta m h_{\text{Dampf}} + Q$$

Gesättigter Dampf verlässt den Tank

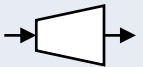
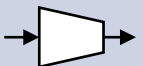
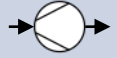
Daher nehmen wir →

Sat. Vapor h_g
2796.6

die Masse hat diese Enthalpie mit sich,
und hat dem Sys. verlassen.

Alle Werte einsetzen $Q = 14162 \text{ KJ}$ ist ML

Übersicht der Bauteile in Stationären Fließprozessen (SFPs)

Bauteil	Annahme	1. HS stationärer Fließprozess (SFP)	Bemerkung	Symbol
Allgemein (SFP)	$\dot{m}_e = \dot{m}_a = \dot{m}, \frac{dE}{dt} = 0$ (gilt für alle unten)	$0 = \dot{Q} - \dot{W}_t + \dot{m} \left(h_e - h_a + \frac{w_e^2}{2} - \frac{w_a^2}{2} + gz_e - gz_a \right)$		
Diffusor	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiab $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\left(h_e + \frac{w_e^2}{2} \right) = \left(h_a + \frac{w_a^2}{2} \right)$	$w_a < w_e$ $p_a > p_e$	
Düse	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiab $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\left(h_e + \frac{w_e^2}{2} \right) = \left(h_a + \frac{w_a^2}{2} \right)$	$w_a > w_e$ $p_a < p_e$	
Drossel	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiab $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$h_e = h_a$	„isenthalper Prozess“	
Turbine	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{Q} = 0$, adiab	$\dot{W}_t = \dot{m}(h_e - h_a)$		 
Verdichter/ Pumpe	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE \approx 0$ kinetische Energiedifferenz	$\dot{W}_t - \dot{Q} = \dot{m}_e(h_e - h_a)$	Oft auch adiab zur Umgebung	 
Wärme- taucher (Wärme- übertrager)	$\Delta PE = 0$ potentielle Energiedifferenz $\Delta KE = 0$ kinetische Energiedifferenz $\dot{W}_t = 0$ keine Arbeitsleistung	$\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_S(h_{e,L} - h_{a,L})$ $\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_W(h_{a,W} - h_{e,W})$	Hier: 2 Ströme Luft (L) und Wasser (W) mit Wärmeübergang von L auf W. Kein Wärmeübergang mit Umgebung	

Geschafft!

SRÜ: 5.3

Mega aufwendig, Vernetzung des Wissens nötig,
Bitte nicht erschrecken!

Recap was wir bis jetzt gelernt haben, probiere Ansatz zu finden,
Falls nicht geht, studiere ML und geh mit der durch.

(ich hatte damals auch so 3 Stunden an dieser Aufgabe verbracht.)

Danke für die Aufmerksamkeit!





Selbstrechenübung

Feedback

