

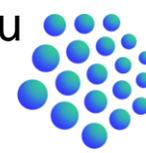
Thermodynamik I Übungsstunde 11

Juncheng Fu (Elias)
22. Dezember 2023

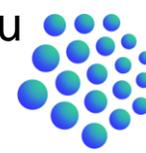


Übungsmaterial





- 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...)

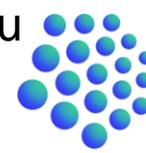


Organisatorisches

Study Center in der Lernphase:

KW2: 11.01.2024	10:00-12:00	HG D1.2
KW3: 18.01.2024	14:00-16:00	HG D1.2

Ich und andere 2 TAs werden die SC betreuen.

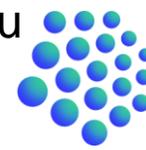


Ablauf für Heute

- Theorie
- Vorlösen der Vorrechenübungen
- ZF basierte Lernphase Vorbereitung & Prüfungsstrategie entwickeln (meine Erfahrung)

Exergie





Exergie auf ZF

Exergiebilanz

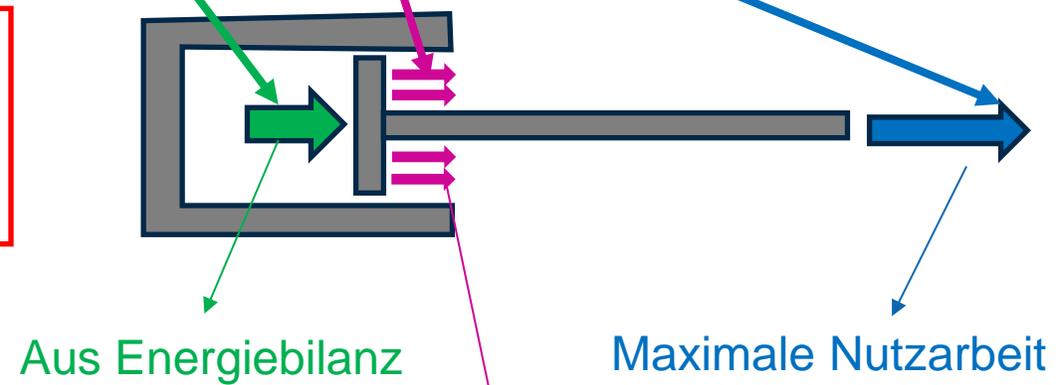
$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_i \dot{E}_{x, \text{str}, i}(t) + \sum_j \dot{E}_{x, Q, j}(t) - \sum_n \left[\dot{W}_n(t) - p_0 \frac{dV(t)}{dt} \right] - \dot{E}_{x, \text{verl}}(t)$$

Exergieverlust:
 $\dot{E}_{x, \text{verl}} = T_0 \dot{S}_{\text{erz}}$

Exergie eines Wärmestroms:
 $\dot{E}_{x, Q} = \int_G \left(1 - \frac{T_0}{T_G} \right) \delta \dot{Q} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}} \right) \dot{Q}$

Hängt von Sys. Grenze ab!

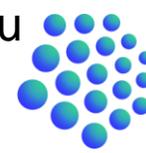
Exergie einer Strömung:
 $\dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{m} e_{x, \text{str}} = \dot{m} \left[h - h_0 - T_0 (s - s_0) + ke + pe \right]$



Wenn die Umgebungsdruck so gross wird, irgendwann kann man keine Nutzarbeit mehr rausholen

Exergie Bilanz ist **keine** Energiebilanz!

Hängt immer von der Umgebung ab



Exergie Verlust über Entropie Erzeugung

- Exergieverlust:

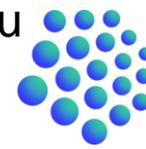
$$\dot{E}_{x,\text{verl}} = T_0 \dot{S}_{\text{erz}}$$

Falls in Aufgabe gefragt wird, kann man direkt über Entropie Erzeugung die Exergie Verlust ermitteln.

**Falls man diese Abkürzung nehmen möchte,
achten auf Bilanzgrenze!**

Welche System ist gefragt? Welche Bilanzgrenze?

Falls vorher Entropie Erzeugung schon berechnet, bezieht sich diese Aufgabe der Exergie Verlust auf der gleichen System?



Exergie auf ZF

- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:



Konvention in Thermo I
 $\Delta = \text{Ende} - \text{Anfang}$

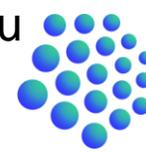
$$0 = \overbrace{\dot{m} [h_e - h_a - T_0 (s_e - s_a) + \Delta ke + \Delta pe]}^{-\Delta \dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{E}_{x, \text{str}, e} - \dot{E}_{x, \text{str}, a}} + \sum_j \overbrace{\left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j}^{\dot{E}_{x, Q, j}} - \sum_n \dot{W}_{t, n} - \dot{E}_{x, \text{verl}}$$

Anfang – Ende : deswegen ein Minus davor



- Exergie einer Strömung:

$$\dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{m} e_{x, \text{str}} = \dot{m} [h - h_0 - T_0 (s - s_0) + ke + pe]$$



Exergie der Innere Energie

Ganz Analog wie Energiebilanz:

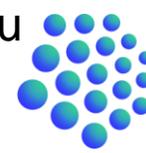
- Geschlossenes Sys. nutzen wir Innere Energie
- Offenes Sys. nutzen wir Enthalpie

- Exergie der inneren Energie:

$$E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + \overbrace{p_0 (v - v_0)} \right]$$

Verschiebe Arbeit an der Umgebung, nicht nutzbar

Die spezifische Zustandsgröße unter Umgebungsbedingung



Exergie der Innere Energie und Strömung

Linken Seite der Bilanzgleichung

- Exergie der inneren Energie:

$$E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + p_0 (v - v_0) \right]$$

Rechten Seite der Bilanzgleichung

- Exergie einer Strömung:

$$\dot{E}_{x,\text{str}} = \dot{m} e_{x,\text{str}} = \dot{m} \left[h - h_0 - T_0 (s - s_0) + ke + pe \right]$$



Ich habe zwar die Fluid Element als „geschlossenes Sys. gezeichnet“, aber die ist nicht mit dem Innere Exergie Formel zu rechnen.

Grund dafür ist die Ein und Ausschleubarbeit, diese sind nicht in Innere Exergie beinhaltet.

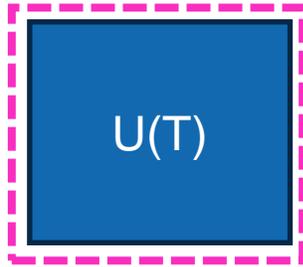
Keywords:

(Masse geht über Sys. Grenze, offenes Sys., Enthalpie, Exergie einer Strömung)

(Stationäre Masse, geschlossenes Sys. innere Exergie)

Exergie der Innere Energie Bsp.

Fest Stoff mit konstanter Volume als Bsp.



Block besitzt eine Innere Energie, nun kühlt sich bis auf Umgebungstemperatur. Dabei gibt sich die Wärme aus.

$$\Delta U = m(u_0 - u) = Q$$

Ist diese Wärme Q, die maximale umwandelbare Energie?

Nein, Wärme tragen Entropie mit.

- Exergie der inneren Energie:

$$E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[\underbrace{u - u_0}_{\text{Positive}} - \underbrace{T_0 (s - s_0)}_{\text{Positive}} + p_0 \left(\cancel{v} / v_0 \right) \right]$$

0

Exergie dieses Blocks (max. umwandelbare Energie) entspricht deswegen nicht die Wärme Q.

Wir sehen Anhang der Exergiebilanz und Carnot Wirkungsgrad für Wärmekraft Maschine, die Wärme lässt sich nur teilweiser zur mechanischen Energie (reine Ex) umwandeln.

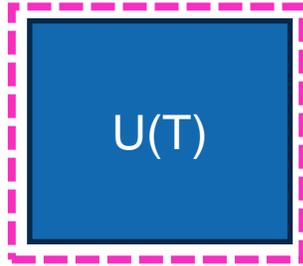
Positive - Positive

Wärme Q - Term

Wärme kann man nicht vollständig nutzen!

Exergie der Innere Energie Bsp.

Isentrope System als Bsp.



Sys. besitzt eine Innere Energie, **adiabat, rev. verlauf Isentrop** auf Umgebungsbedingung.

$$\Delta U = m(u_0 - u) = -W$$

$$m(u - u_0) = W$$

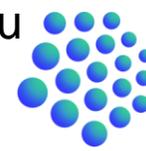
Ist diese Arbeit W , die maximale umwandelbare Energie?

Naja, nur wenn Systemvolum konstant bleibt => keine Volumenarbeit gegen Umgebungsdruck

- Exergie der inneren Energie:

$$E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + p_0 (v - v_0) \right]$$

Bei Verbrennungsmotoren, Expansionsphase ein Teil der Arbeit gegen Umgebungsdruck geleistet. Deswegen die übertragene Leistung (Exergie) dieser Phase ist kleiner.



Exergie Berechnung ist aufwendig

- Exergie der inneren Energie:

$$E_{X,U} = m e_{X,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + p_0 (v - v_0) \right]$$

Für IG

$$u(T)$$

$$s(T, p)$$

$$v(T, p)$$

Für andere Stoffe mit ZF gut ausrechnen können.

3 Stoffmodelle

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):

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

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

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

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

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

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 $h_{fg} = h_g - h_f$

Ideales Gas ($pV = n\bar{R}T \quad pv = RT \quad pV = mRl$)

$$\bar{R} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad R = c_p^{\text{ig}} - c_v^{\text{ig}} = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$c_v^{\text{ig}}(T) = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p^{\text{ig}}(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

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

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

$$h^{\text{ig}}(T_2) - h^{\text{ig}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{\text{ig}}(T) dT$$

$$s^{\text{ig}}(T_2, p_2) - s^{\text{ig}}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\text{ig}}(T)}{T} dT - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

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

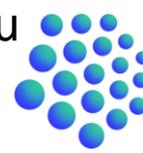
Perfektes Gas

$$c_v^{\text{pg}} = \text{const.} \quad c_p^{\text{pg}} = \text{const.} \quad \kappa = \frac{c_p^{\text{pg}}}{c_v^{\text{pg}}} = \text{const.}$$

$$u^{\text{pg}}(T_2) - u^{\text{pg}}(T_1) = c_v^{\text{pg}}(T_2 - T_1)$$

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

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



Mini Frage

Unter Umgebungsbedingung ein Block hat 1kJ Innere Energie.

2 Wahl:

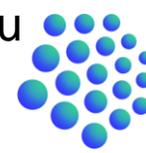
Block 1 mit 100kJ Innere Energie.

Block 2 mit 1kJ Innere Energie und 99kJ KE.

Welche nimmst du?

Block 2, weil wir wissen der Block 99kJ reine Exergie hat.

Im Vergleich mit Block 1, der hat 99kJ Innere Energie Differenz zur Umgebungsbedingung, jedoch nicht alle Wärme kann man nutzen, somit ist die Qualität der Energie von diesem Block schlecht.



Wirkungsgrade Wärmekraftmaschine

Exergetischer Wirkungsgrad

2nd law efficiency

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{x,\text{Nutzen}}}{\dot{E}_{x,\text{Aufwand}}}$$

Thermischer Wirkungsgrad für Wärmekraftmaschine:

1st law efficiency

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{ab}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = \frac{\dot{E}_{x,\text{Nutzen}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = \frac{\dot{E}_{x,\text{Nutzen}}}{\dot{E}_{x,Q_{\text{zu}}}} \cdot \frac{\dot{E}_{x,Q_{\text{zu}}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = \varepsilon \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}}\right)$$

$$= \varepsilon \eta_C$$

$$\varepsilon = \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta_C}$$

Wirkungsgrade Wärmekraftmaschine

Wäre eine Abkürzung, um Exergetische Wirkungsgrad bei der Wärmekraftmaschine auszurechnen.

Falls Prozess Carnot-prozess: (Carnot ist rev.)

$$\eta_{th} = \eta_{Carnot}$$

$$1 - \frac{|Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

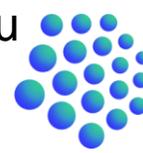
$$\Rightarrow \frac{|Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

Exergetische Wirkungsgrad = 1

$$\epsilon = \frac{\eta_{th}}{\eta_C}$$

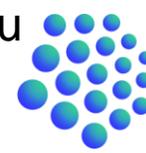
Achtung! Hier gilt es nur für Wärmekraftmaschine.

Z.B beim Verdichter sieht exergetische Wirkungsgrad anders aus.
Wichtig ist man den **Nutzen** und **Aufwand** kennt.



Ablauf für Heute

- Theorie
- Vorlösen der Vorrechenübungen
- ZF basierte Lernphase Vorbereitung & Prüfungsstrategie entwickeln (meine Erfahrung)



Vorrechenübung



Vorrechenübung

Aufgabe 11.1 ●●○ Verdampfung von Wasser

In einem Kolben-Zylinder-System befinden sich $m = 1 \text{ kg}$ gesättigt flüssiges Wasser bei $T_1 = 100^\circ\text{C}$. Das Wasser soll vollständig verdampft werden, sodass der Wasserdampf im Endzustand gesättigt ist. Während dieses Prozesses kann sich der Kolben frei bewegen.

- a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

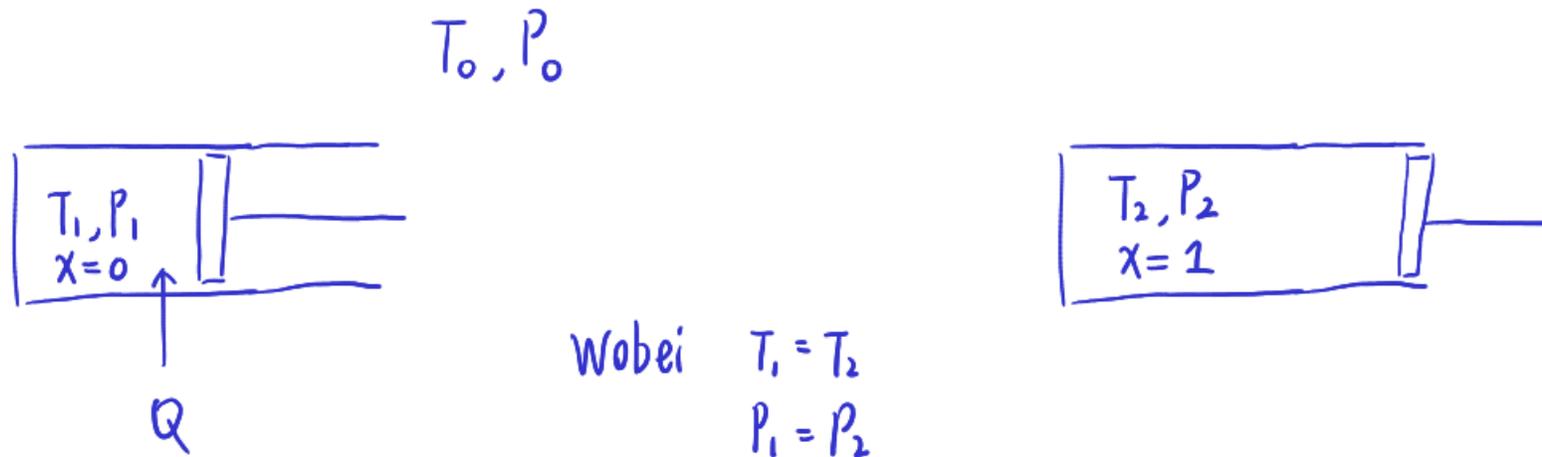
Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,\text{verl}}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

Annahmen:

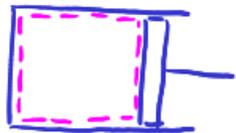
- Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie können vernachlässigt werden.
- Umgebung: $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 1.014 \text{ bar}$

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter **Zugabe von Wärme**. Der Prozess ist **reversibel**. **Temperatur und Druck sind konstant**.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die **einzelnen Terme** der Exergiebilanz.



System klassifizieren?

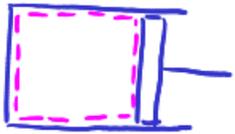


- Geschlossenes System an einem Kolben:

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left[\sum_n \dot{W}_{V,n} - p_0 \frac{dV}{dt} \right] - \dot{E}_{x,verl}$$

- a) Die Zustandsänderung erfolgt unter **Zugabe von Wärme**. Der Prozess ist **reversibel**. **Temperatur und Druck sind konstant**.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die **einzelnen Terme** der Exergiebilanz.



- Geschlossenes System an einem Kolben:

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left[\sum_n \dot{W}_{V,n} - p_0 \frac{dV}{dt} \right] - \dot{E}_{x,verl}$$

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - p_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

$$\Delta E_x = \Delta E_{x,wasser} = ?$$

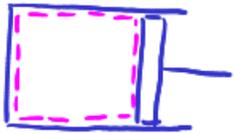


Es ist keine Strömung, sondern ein geschlossenes Sys.

mit U	$\leftarrow \bar{E}_{x,U}$	\leftarrow geschlossenes Sys.	$\rightarrow U = m \cdot u$
mit H	$\leftarrow E_{x,str}$	\leftarrow offenes Sys.	$\rightarrow H = m \cdot h$

- a) Die Zustandsänderung erfolgt unter **Zugabe von Wärme**. Der Prozess ist **reversibel**. **Temperatur und Druck sind konstant**.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die **einzelnen Terme** der Exergiebilanz.



- Geschlossenes System an einem Kolben:

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left[\sum_n \dot{W}_{V,n} - p_0 \frac{dV}{dt} \right] - \dot{E}_{x,verl}$$

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - p_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

Exergie der inneren Energie:

$$E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + p_0 (v - v_0) \right]$$

$$\Delta E_x = m \cdot (e_{x,u_2} - e_{x,u_1}) = m \left[u_2 - u_1 - T_0 (s_2 - s_1) + p_0 (v_2 - v_1) \right]$$

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x, \text{verl}}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - P_0 \Delta V] - E_{x, \text{verl}}$$

$$\Delta E_x = m \cdot (e_{x, u_2} - e_{x, u_1}) = m [u_2 - u_1 - T_0 (s_2 - s_1) + P_0 (v_2 - v_1)]$$

Ansatz mit Stoffmodelle

Sätt. Wasser \rightarrow Sätt. Dampf

auf eine Isotherm

\uparrow
Temp. ist const. geg.

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse	$\phi = v, u, h, s$
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	$h_{fg} = h_g - h_f$

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - P_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

$$\Delta E_x = m \cdot (e_{x,u_2} - e_{x,u_1}) = m [u_2 - u_1 - T_0 (s_2 - s_1) + P_0 (v_2 - v_1)]$$

TABLE A-2

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

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	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

↑
P = P₁ = P₂

↑
V₁

↑
V₂

↑
u₁

↑
u₂

↑
s₁

↑
s₂

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - P_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

↑
 Völlig bestimmt

↑
 Energie Bilanz

↔
 Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta v = \Delta V$ bestimmbar

↑
 Sys. Grenze
 genau um
 Wasser $\Rightarrow \bar{T} = 100^\circ\text{C}$

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 × 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
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

↑
 $P = P_1 = P_2$

↑
 V_1

↑
 V_2

↑
 u_1

↑
 u_2

↑
 s_1

↑
 s_2

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W_v - P_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

ΔE_x Völlig bestimmt
 $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$ Energie Bilanz
 $[W_v - P_0 \Delta V]$ Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta v = \Delta V$ bestimmbar
 Sys. Grenze genau um Wasser $\Rightarrow T = 100^\circ\text{C}$

 ΔE_x

Alle TAB-Werte aus TAB-A2 einsetzen

$$\Delta E_x = 484,1251891 \text{ KJ}$$

$$M.L. = 484 \text{ KJ}$$

TABLE A-2
Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10^5 Pa

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
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

$P = P_1 = P_2$ V_1 V_2 U_1 U_2 S_1 S_2

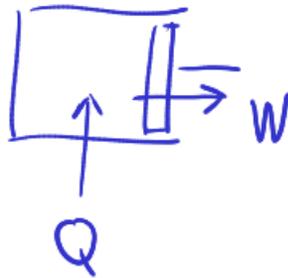
a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) [Q - W_V - P_0 \Delta V] - E_{x,verl}$$

Völlig bestimmt
 Energie Bilanz
 Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta V = \Delta V$ bestimmbar
 Sys. Grenze genau um Wasser $\Rightarrow \bar{T} = 100^\circ\text{C}$

$Q, W_V, \Delta V$



- Geschlossenes System an einem Kolben:

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

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

KE & PE = 0

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = Q - W_V$$

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 × 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
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

$P = P_1 = P_2$ V_1 V_2 U_1 U_2 S_1 S_2

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) [Q - [W_v - P_0 \Delta V]] - E_{x,verl}$$

Völlig bestimmt

Energie Bilanz

Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta V = \Delta V$ bestimmbar

Sys. Grenze genau um Wasser $\Rightarrow \bar{T} = 100^\circ\text{C}$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = Q - W_v$$

$$= Q - P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = 2087,56 \text{ kJ}$$

$$\Delta V = m \cdot (v_2 - v_1)$$

$$= 1,6719565 \text{ m}^3$$

$$Q = 2257,096389 \text{ kJ}$$

$$W_v = 169,5363891 \text{ kJ}$$

TABLE A-2
Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ kPa

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 × 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	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

$P = P_1 = P_2$ V_1 V_2 u_1 u_2 s_1 s_2

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) [Q - [W_v - P_0 \Delta V]] - E_{x,verl}$$

Völlig bestimmt
 Energie Bilanz
 Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta V = \Delta V$ bestimmbar
 Sys. Grenze genau um Wasser $\Rightarrow \bar{T} = 100^\circ\text{C}$

TABLE A-2

Pressure Conversions:
 1 bar = 0.1 MPa = 10^5 kPa

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 $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		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	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

$P = P_1 = P_2$ V_1 V_2 u_1 u_2 s_1 s_2

Bemerkung: Da die Prozess rev. ist, \Rightarrow Kolben reibungsfrei

\Rightarrow

$P_{in} = P_0$

$P_1 = P_2 = P = P_0 = 1,014 \text{ bar}$
 Stimmen auch in Aufgabestellung

$[W_v - P_0 \Delta V]$ Dieser Term ergibt 0 weil innerer Druck = äusserer Druck

a) Die Zustandsänderung erfolgt unter Zugabe von Wärme. Der Prozess ist reversibel. Temperatur und Druck sind konstant.

Bestimmen Sie den Exergieverlust $E_{x,verl}$. Berechnen Sie dazu die einzelnen Terme der Exergiebilanz.

$$\Delta E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) [Q - [W_v - P_0 \Delta V]] - E_{x,verl}$$

Völlig bestimmt

Energie Bilanz

Volumenänderung von Wasser mit $m \cdot \Delta V = \Delta V$ bestimmbar

Sys. Grenze genau um Wasser $\Rightarrow \bar{T} = 100^\circ\text{C}$

TABLE A-2
Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa = 10^5 kPa

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m^3/kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		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	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100

$P = P_1 = P_2$ V_1 V_2 u_1 u_2 s_1 s_2

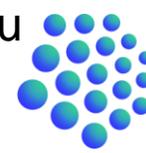
Alle Einsetzen

$E_{x,verl} = -0,224 \text{ KJ}$ Kleine Abweichung irgendwo, M.L. Rundung sus.

nicht möglich, $E_{x,verl} = T_0 \cdot S_{erz} \geq 0$

Deswegen nehmen wir $E_{x,verl} = 0 \text{ KJ}$

Bemerkung: Prozess rev. $\Rightarrow S_{erz} = 0 \Rightarrow E_{x,verl} = 0$



Ablauf für Heute

- Theorie
- Vorlösen der Vorrechenübungen
- ZF basierte Lernphase Vorbereitung & Prüfungsstrategie entwickeln (meine Erfahrung)

1 Allgemeine Beziehungen

Allgemeine Beziehungen zwischen Zustandsgrößen

$$H = U + pV$$

$$\Psi = U - TS$$

$$G = H - TS \quad (\text{gelten auch spezifisch})$$

Totale Differentiale

$$dU = TdS - p dV$$

$$dH = T dS + V dp$$

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

(gelten auch spezifisch)

Masse

$$\text{Massenstrom: } \dot{m} = \rho \dot{V} = \rho A w$$

Energie

$$\text{Gesamte Energie: } E = U + KE + PE$$

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

mit kinetischer Energie: $ke = \frac{KE}{m} = \frac{w^2}{2}$ und potentieller Energie: $pe = \frac{PE}{m} = g z$

Arbeit

$$\text{Gesamte Arbeit: } W = W_V + W_t + W_{el} + W_\sigma + \dots$$

mit Volumenarbeit W_V , technischer Arbeit W_t , elektrischer Arbeit W_{el} , Oberflächenarbeit W_σ , und weiteren Arbeiten

Thermodynamische Mitteltemperatur

Thermodynamische Mitteltemperatur (Allgemein)

Auf ZF: $\bar{T} = \frac{\int_1^2 T ds}{s_2 - s_1}$

Thermodynamische Mitteltemperatur (Reversibler Fall)

$\bar{T} = \frac{q_{rev}}{(s_2 - s_1)}$

$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$ (gelten auch spezifisch)

spezifische Entropie $ds = \frac{dq}{T}$

$T ds = dq \Rightarrow \int_1^2 T ds = \int_1^2 dq = [q]_1^2 = q_2 - q_1 = q_{ea}$

mathematisch sinnvoll, aber thermodynamisch schreibt man eigentlich nicht so

Diese und analog andere Beziehung wie $V = m \cdot v$ $U = m \cdot u$ $W = m \cdot w$ müsst ihr können !

Ü.05

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 $\left[\frac{m}{kg} \right]$ v, u, h, s sind durch $\phi = \phi_r + x(\phi_x - \phi_r)$ mit TAB ganz genau zu bestimmen.

Recall "Dimension Anal." aus Übungsstunde 1.

$\left[\frac{m}{kg} \right]$	$\left[\frac{J}{kg} \right]$	$\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$	$\left[\frac{N}{kg} \right]$	$\left[\frac{m}{s^2} \right]$
$\left[\frac{m^3}{kg} \right]$	$\left[\frac{J}{kg} \right]$	$\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$	$\left[\frac{N}{kg} \right]$	$\left[\frac{m}{s^2} \right]$

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

2 Bilanzgleichungen

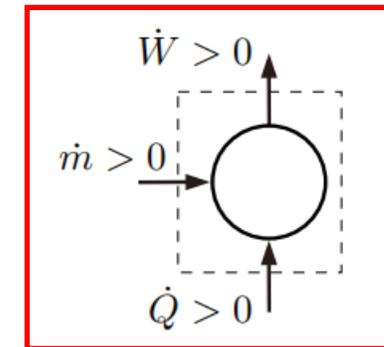
Allgemeine Bilanzgleichung einer Bilanzgrösse X

$$\frac{dX(t)}{dt} = \dot{F}_{x,zu} - \dot{F}_{x,ab} + \dot{\sigma}_x \quad \text{mit } \dot{F}_{x,zu}: \text{Fluss von } X \text{ in System, } \dot{F}_{x,ab}: \text{Fluss von } X \text{ aus System, } \dot{\sigma}_x: \text{Quellterm}$$

Vorzeichenkonvention

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

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



1. Übungsstunde

Ich bin ein Mensch, bin ein System, ich arbeite.
Während ich (Aktiv) **Positive Arbeit** leiste,
meine gesamte Energie wird immer weniger,
zB. Ich gebe Energie aus, um Tisch zu schieben...

Änderung meine Energie ist **negative**.

$$W = +10J > 0$$

$$\Delta E = -W$$

$$\Delta E = -(+10J)$$

$$\Delta E = -10J$$

Ich nehme Arbeit auf,
Ich (Passiv) leiste **Negative Arbeit**,
Meine gesamte Energie wird grösser,
zB. Tisch hat mir geschlagen, ich flieg durch dem Raum,
Ich habe nun KE.

Änderung meine Energie ist **positiv**.

$$W = -100J < 0$$

$$\Delta E = -W$$

$$\Delta E = -(-100J)$$

$$\Delta E = 100J$$

Prozesse in offenen Systemen

n.ethz.ch/~juncfu

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).

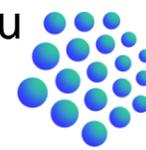
$$\frac{dE}{dt} = +\dot{m}(h) + \dot{Q} - \dot{W}$$

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

\dot{m} numerisch positiv

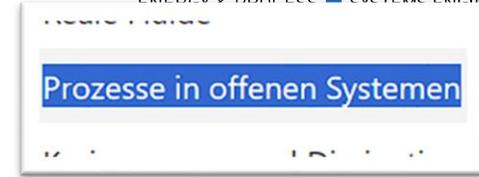
Vorzeichen Erklärung für Q und W sehe 1. Übungsstunde

Super wichtig!



Energiebilanz

In Übungsthema



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

Spezialfälle mit Annahme $W = W_t + W_V$:

▪ Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

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

▪ Geschlossenes System an einem Kolben:

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

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

Immer wieder genutzt für geschlossenes Sys. Sehr Wichtig für die Prüfung!

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

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

Falls [kJ] als Einheit, KE PE Terme müssen auch mit zu [kJ] umgerechnet werden!

Entropiebilanz

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \int_G \frac{\delta \dot{Q}(t)}{T_G(t)} + \dot{S}_{\text{erz}}(t) = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \sum_j \frac{\dot{Q}_j(t)}{\bar{T}_j(t)} + \dot{S}_{\text{erz}}(t)$$

In Übungsthema

Entropiebilanz und Stoffmodelle

Spezialfälle: mit der thermodynamischen Mitteltemperatur $\bar{T} = \frac{\int_e^a T ds}{s_a - s_e}$

▪ Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{\bar{T}_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

Normalerweise braucht man diesen Ansatz bei der Prüfung nicht, falls ja, ich würde die Aufgabe überspringen

▪ Geschlossenes System:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{\bar{T}_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

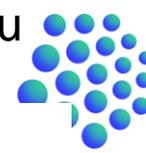
$$\Delta S = S_2 - S_1 = m (s_2 - s_1) = \sum_j \frac{Q_j}{\bar{T}_j} + S_{\text{erz}}$$

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

$$\Delta S = m_2 s_2 - m_1 s_1 = \sum_i \Delta m_i s_i + \sum_j \frac{Q_j}{\bar{T}_j} + S_{\text{erz}}$$

Thermodynamische Mitteltemperatur (wichtig in Entropie Berechnung) kann man meistens nur mit bisschen Überlegung einen Wert nehmen. zB. Temp. von einem isothermen Verlauf (Verdampfung von Wasser) Aber Achtung! Sys. Grenze abhängig

Entropie Erzeugung (kann nur ≥ 0), falls positiv, bedeutet Verlauf irrev. -> Qualität Verlust, Exergie Verlust



Exergiebilanz

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_i \dot{E}_{x, \text{str}, i}(t) + \sum_j \dot{E}_{x, Q, j}(t) - \sum_n \left[\dot{W}_n(t) - p_0 \frac{dV(t)}{dt} \right] - \dot{E}_{x, \text{verl}}(t)$$

- Exergie $E_x = E_{x,U} + KE + PE$
- Exergie der inneren Energie: $E_{x,U} = m e_{x,U} = m \left[u - u_0 - T_0 (s - s_0) + p_0 (v - v_0) \right]$
- Exergie einer Strömung: $\dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{m} e_{x, \text{str}} = \dot{m} \left[h - h_0 - T_0 (s - s_0) + ke + pe \right]$
- Exergie eines Wärmestroms: $\dot{E}_{x, Q} = \int_G \left(1 - \frac{T_0}{T_G} \right) \delta \dot{Q} = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \dot{Q}$
- Exergie der Wärme: $E_{x, Q} = \int_G \left(1 - \frac{T_0}{T_G} \right) \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q$
- Exergieverlust: $\dot{E}_{x, \text{verl}} = T_0 \dot{S}_{\text{erz}}$

Spezialfälle mit Annahme $W = W_t + W_V$:

- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:
$$0 = \overbrace{\dot{m} [h_e - h_a - T_0 (s_e - s_a) + \Delta ke + \Delta pe]}^{-\Delta \dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{E}_{x, \text{str}, e} - \dot{E}_{x, \text{str}, a}} + \sum_j \overbrace{\left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j}^{\dot{E}_{x, Q, j}} - \sum_n \dot{W}_{t, n} - \dot{E}_{x, \text{verl}}$$
- Geschlossenes System an einem Kolben:
$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left[\sum_n \dot{W}_{V, n} - p_0 \frac{dV}{dt} \right] - \dot{E}_{x, \text{verl}}$$

$$\Delta E_x = E_{x, 2} - E_{x, 1} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) Q_j - \left[\sum_n \dot{W}_{V, n} - p_0 (V_2 - V_1) \right] - E_{x, \text{verl}}$$
- Halboffenes System: (Systemmasse nicht konstant, Ein-/Aus Schubbedingungen konstant)
$$\Delta E_x = \sum_i \Delta m_i e_{x, \text{str}, i} + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) Q_j - \left[\sum_n \dot{W}_n - p_0 \Delta V \right] - E_{x, \text{verl}}$$

Exergie am offenen System

Exergie auf ZF

- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:



Konvention in Thermo I
 $\Delta = \text{Ende} - \text{Anfang}$

$$0 = \overbrace{\dot{m} [h_e - h_a - T_0 (s_e - s_a) + \Delta ke + \Delta pe]}^{-\Delta \dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{E}_{x, \text{str}, e} - \dot{E}_{x, \text{str}, a}} + \sum_j \overbrace{\left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j}^{\dot{E}_{x, Q, j}} - \sum_n \dot{W}_{t, n} - \dot{E}_{x, \text{verl}}$$

Anfang - Ende : deswegen ein Minus davor



- Exergie einer Strömung: $\dot{E}_{x, \text{str}} = \dot{m} e_{x, \text{str}} = \dot{m} \left[h - h_0 - T_0 (s - s_0) + ke + pe \right]$

Super wichtig!

3 Stoffmodelle

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):

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

$$h^{if}(T, p) = h_f(T)$$

Wenn $h_f(T) \gg$

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

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

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 $h_{fg} = h_g - h_f$

Ideales Gas ($pV = n\bar{R}T \quad pv = RT \quad pV = mRT$)

$$\bar{R} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad R = c_p^{ig} - c_v^{ig} = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$c_v^{ig}(T) = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p^{ig}(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

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

$$u^{ig}(T_2) - u^{ig}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v^{ig}(T) dT$$

$$h^{ig}(T_2) - h^{ig}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{ig}(T) dT$$

MindMap

Lerp.

Zustandsänderungen idealer & perfekter Gase 02

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

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

Perfektes Gas

$$c_v^{pg} = \text{const.} \quad c_p^{pg} = \text{const.} \quad \kappa = \frac{c_p^{pg}}{c_v^{pg}} = \text{const.}$$

$$u^{pg}(T_2) - u^{pg}(T_1) = c_v^{pg}(T_2 - T_1)$$

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

$$s^{pg}(T_2, p_2) - s^{pg}(T_1, p_1) = c_p^{pg} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$



Aus Übungsstunde 08

wie macht man ideales fluid approximation Kochrezept

3. Gehen auf ND TAB & ZF

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

(angenommen wir haben „Compressed Water“ 1bar, 10°C, ges. v, u, h, s)

Temp. (°C)	Pressure (kPa)	Sat. Vapor (v _g)	Sat. Liquid (v _f)	Sat. Vapor (u _g)	Sat. Liquid (u _f)	Sat. Vapor (h _g)	Sat. Liquid (h _f)	Sat. Vapor (s _g)	Sat. Liquid (s _f)
10	0.0101325	1.04414	0.00100014	2381.7	161.23	2584.7	161.23	8.4488	0.6750

$u^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = v_f(10^\circ\text{C}) = 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

$u^{if}(10^\circ\text{C}, v) = v_f(10^\circ\text{C}) = 42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$h^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = h_f(10^\circ\text{C}) + v_f(10^\circ\text{C}) \cdot (1\text{bar} - p_{\text{sat}}(10^\circ\text{C}))$

$= 42.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (100\text{kPa} - 1.2281\text{kPa}) = 42.1088 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$s^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = s_f(10^\circ\text{C}) = 0.151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Ü.05

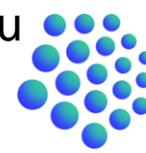
1 P P für Lösungsweg über ND

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 [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$] 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.

$\left[\frac{\text{V}}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{K}}{\text{kg}} \right] \leftrightarrow \left[\frac{\text{V}}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{K}}{\text{kg}} \right]$ Falls 2 □ geg. dann 1 □



4 Zustandsänderungen

Für ideales Gas gut, für anderes Stoffe wie Wasser, sollte man verzichten.

Zustandsänderungen

Polytrope	$pV^n = \text{const.}$ (n : Polytropenexponent)
Isobare	$p = \text{const.}$ ($n \equiv 0$)
Isotherme	$T = \text{const.}$
Isochore	$v = \text{const.}$ ($n \rightarrow \infty$)
Isenthalpe	$h = \text{const.}$
Isentrope	$s = \text{const.}$

Gilt immer für alle Stoffe

Zustandsänderungen idealer Gase

Isotherme	$n = 1$
Isentrope	$n = \kappa = \frac{c_p^{\text{ig}}}{c_v^{\text{ig}}}$
Polytropes Temperaturverhältnis	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$

Nur für Ideales Gas (und PG)

Arbeit

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

Geschlossenes Sys.

Spezifische Volumenarbeit
(reversible Änderung des Systemvolumens)

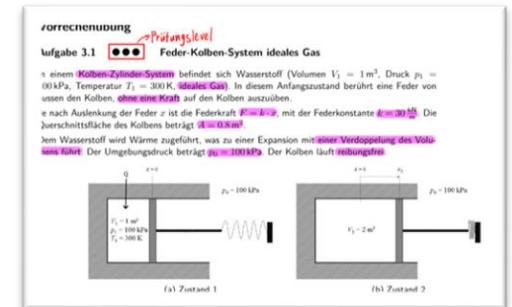
$$w_{V,12}^{rev} = \frac{W_{V,12}^{rev}}{m} = \int_1^2 p \, dv$$

Für IG gut anwendbar. Für Realstoff n nicht konst. TAB nutzen!

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

Unter **bestimmte** Bedingung kann man Sys.Grenze um Kolben ziehen, dann p wird einfach konst. wie außen Druck. Aber aufpassen mit **Federung** oder **Gewicht!**

Aus Ü. 03



Offenes Sys.

Spezifische technische Arbeit
(reversibler stationärer Fließprozess)

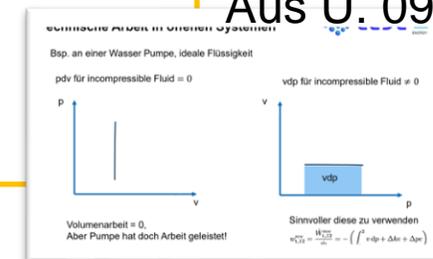
$$w_{t,12}^{rev} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{rev}}{\dot{m}} = - \left(\int_1^2 v \, dp + \Delta ke + \Delta pe \right)$$

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

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

Persönlich würde ich die nicht verwenden.

Aus Ü. 09



5 Wirkungsgrade (Nutzen/Aufwand)

Thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{ W_{nutz} }{ Q_{zu} }$
für Kreisprozesse:	$\eta_{th,KP} = \frac{ W_{KP} }{ Q_{zu} } = 1 - \frac{ Q_{ab} }{ Q_{zu} }$
Carnotscher Wirkungsgrad	$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$
Leistungszahl (Wärmepumpe)	$\varepsilon_W = \frac{ \dot{Q}_{ab} }{ \dot{W}_t } = \frac{ \dot{Q}_{ab} }{ \dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{zu} }$
Leistungszahl (Kältemaschine)	$\varepsilon_K = \frac{ \dot{Q}_{zu} }{ \dot{W}_t } = \frac{ \dot{Q}_{zu} }{ \dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{zu} }$
Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)	$\eta_{V,s} = \frac{w_{t,12}^{rev}}{w_{t,12}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{V,s} = \frac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}$
Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)	$\eta_{T,s} = \frac{w_{t,12}}{w_{t,12}^{rev}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{T,s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$
Exergetischer Wirkungsgrad	$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{x,nutz}}{\dot{E}_{x,zu}}$

PROZESSE IN EINEM SYSTEM

Kreisprozesse und Dissipation

ENTROPIEBILANZ UND STEUERELEMENTE

Zweiter Hauptsatz für Kreisprozesse

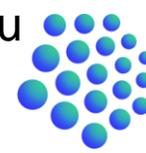
Isentroper Wirkungsgrad

Carnot-Prozess Für Wärme-Kraft Maschine

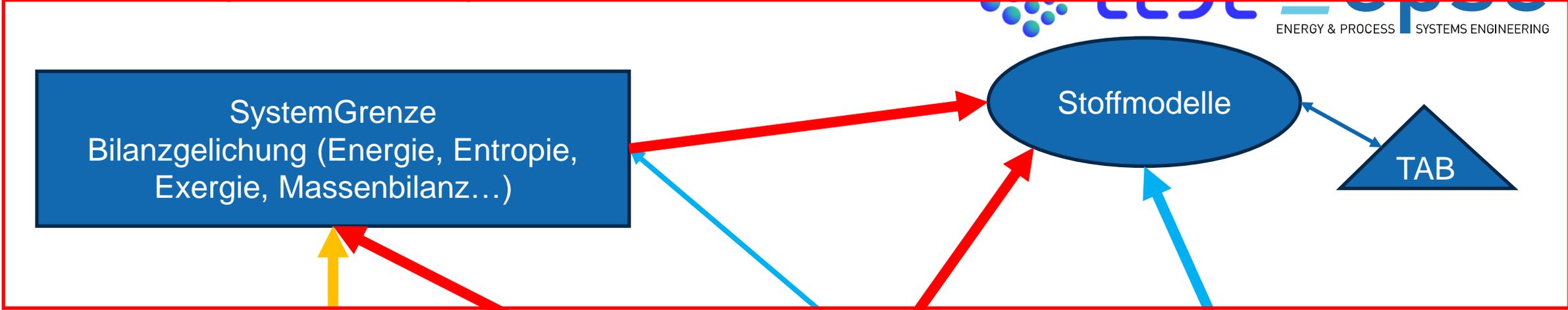
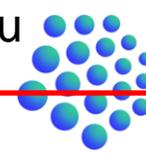
1. isotherme Expansion
2. isentrope Expansion
3. isotherme Kompression
4. isentrope Kompression

2X Expansion 2X Kompression
isotherm, isentrope Wechselhaft.

Skizzen für isotherm, isentrop
siehe Notizen 2. Übung



Kannst du das Wissen vernetzen?



Häufig in geschlossenes Sys. Aber auch bei alle andere Themen Gebiet



Carnot, Thermische Wirkungsgrad, Isentrope Wirkungsgrad...



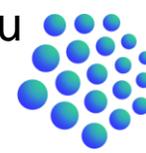
- Ich kann **System Grenze** je nach Aufgabe klar setzen / identifizieren, um eine einfache und schnelle Rechnung zu ermöglichen.
- Ich kann **System klassifizieren** und dazu die **Bilanzgleichung** problemlos aufstellen und die Terme vereinfachen.
- Ich kann **mechanische Ansatz** (z.B mit Feder) auf **Kolben-System** gut anwenden.
- Ich weiß was **isotherm, isobar, isentrop** usw. in **ZÄ** bedeutet und kann sie in Rechnung anwenden
- Ich verstehe die Zusammenhänge zw. **Mechanische Ansatz, ZÄ, Energie Bilanz** mit **Stoffmodel**.
- Ich weiß, wann welche **Stoffmodelle Formel** anwenden, um bestimmte unbekannte zu lösen.
- Schlüssel Wörter wie **gerade gesättigt, gerade vollständig kondensiert...** kenn ich gut!
- Ich kann **Innere Energie, Enthalpie, Entropie, Exergie** berechnen.
- **p-v, T-s, h-s Diagramme** für verschiedene Stoffe kann ich gut.
- **TAB** kenne ich gut aus, **Lerp.** Formel habe ich im Herzen eingepägt. **Doppelte Lerp.** kann ich auch.

Wenn mein TA mit einem Kartoffeln Kanonen mich das um 3 Uhr nachts fragt, kann die **Lerp. Formel** wie aus der Pistole geschossen kommen.

- Ich weiß was **rev.** bedeutet und weiß wann **Carnot-Wirkungsgrad = thermische Wirkungsgrad** ist
- Ich kann **Nutzen** und **Aufwand** eines Systems identifizieren.
- Ansatz für **Isentroper Wirkungsgrad** kann ich gut.
- **Ich kenne meine ZF gut aus** und weiß **wo verschiedene Formel sind und wann welche zu nutzen.**

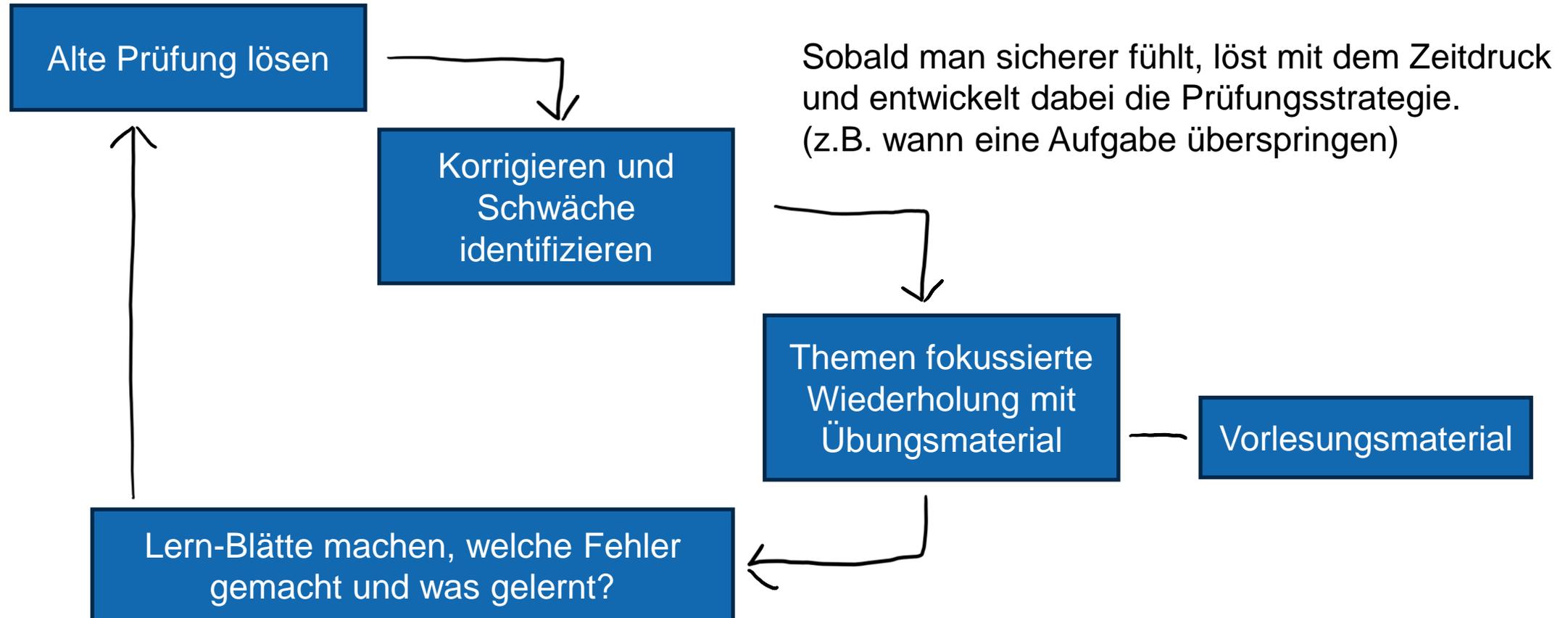
Falls ich sie nicht kann, weiß ich **wo alle Information zu finden sind**, somit kann ich die Wissenslücke gut füllen.

- Thermo TA Website (Wissen sind dort kondensiert und prüfungsorientiert)
- Moodle (Vorlesungsstoffe als Vertiefung)
- ChatGPT
- YouTube
- ...



Vorgehen

Erste ein paar Prüfungen ohne Zeitdruck lösen, um "Wissenslücke" zu identifizieren.



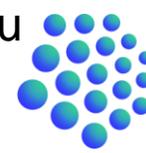
Meine Erfahrung

- Gewisse Aufgabe Typen kommen immer wieder vor, mit Übung hat man gutes Gefühl und somit werden sie zu unsere „First To Solve“ Aufgaben, wie Diagramm zeichnen. Das bringt viele Punkte in weniger Zeit, lohnt es sich sehr!!!
- Die Unbekannte, die „EZ to solve“ sind, sind häufig auch der „Attack-Point“ beim Problemlösen, dort kannst du probieren, anfangen das Problem zu lösen.
- In einer großen Aufgabe, a) b) c) d) e)... je weiter nach hinten, desto mehr sind der Zeitaufwand. (z.B. Exergie Verlust berechnen...) Ich habe alle große Aufgabe angefangen, aber nur eine davon komplett durch gelöst, ich habe nicht alles gelöst, trotzdem eine gute Note. Setzen Priorität! Dafür ist die 15min Einlesezeit da.
- Klare Kopf bewahren, Du bist gut vorbereitet mit allen Übungen und alte Prüfung, Zeitstress ist da, aber es ist sicherlich genug, um eine 4 zu schreiben. Genauigkeit zuerst, Geschwindigkeit später, alle Werte korrekt in TR eingeben. Sichern die Note 4. Wenn in Gang kommen, dann erhöht die Geschwindigkeit.

Dezember														Januar																																						
32,3		5,4						44,6		7,4						35,6		5,93						43,5		7,25		Puffer / Repetition		23,5								25				Prüfungszeit										
23/12/	26/12/	27/12/	28/12/	29/12/	30/12/	31/12/	01/01/	02/01/	03/01/	04/01/	05/01/	06/01/	07/01/	08/01/	09/01/	10/01/	11/01/	12/01/	13/01/	14/01/	15/01/	16/01/	17/01/	18/01/	19/01/	20/01/	21/01/	22/01/	23/01/	24/01/	25/01/	26/01/	27/01/	28/01/	29/01/	30/01/	31/01/	01/02/	02/02/	03/02/	04/02/	05/02/	06/02/									
S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M	D	M	D	F	S	S	M		
	DY	TH	CS		TH	CS		DY	DY	TH	DY	TH	CS	CS	DY	TH	CS	DY	TH	CS		AN	CS	CS	CS	TH	CS	TH		TH	CS	CS	DY	DY		AN	DY		DIM	DIM												
	DY	TH	CS		TH	CS	CS	DY	TH	CS		TH	CS	DIM	DY	TH	CS	DY	TH	CS		DIM	CS	CS	CS	TH	CS	TH	TH		CS		DY	AN	AN	AN	AN		DY	DY	DIM	DIM	DIM	DIM	DIM							
	DY	AN	AN	CS	DIM		CS	DIM	AN	CS	AN	AN			AN	AN	AN	CS	DIM														DY	AN																		

Grinding Time





Schluss:

Endlich haben wir gemeinsam geschafft!

Es war meine Freude und Ehre Thermo I TA zu sein. Es war nicht einfach, man muss viel Herzen hineinstecken, um Übungsstunden gut zu gestalten.

Es geht vielen TA genauso.

Ich habe sehr viel Spass gehabt und auch viel mehr Thermo I gelernt.

Ich hoffe, ich habe eine gute Arbeit geleistet, Euch Motivation gebracht habe, Thermo zu lernen.

Falls Ihr auch eine gute Note schreibt und Thermo I liebt, bewirbt Dich doch als TA. Du lernst noch mehr.

Falls Ihr eine 6 in Thermo I schreibt, teile mir bitte mit, ich habe Preise für Euch!

Thermo ist viel mehr als nur diese Prüfung! Das steckt in deine schnell kühlenden Kaffee, isotherme kochende Spagetti, Entropie erzeugende Heizung... Lass Thermowissen Euch das ganze Leben begleiten und Ihr probiert mit dem Wissen diese Welt ein Schritt näher rev. zu bringen.

Ich wünsche Euch ein Frohes Weihnachten, einen guten Rutsch und viel viel Spass und Freude an dem Thermo Probleme lösen. Ihr schafft das!

Thank You for being a part of our Thermo I Übungsstunden

