

Vorrechenübung

Aufgabe 4.1 ●●○ Verbindung zweier Wassertanks

In Abbildung 1 sind zwei starre Tanks dargestellt, die durch ein Ventil verbunden sind. Tank A enthält anfangs $V_A = 0.2 \text{ m}^3$ Wasser bei $p_{1,A} = 400 \text{ kPa}$ und 80 % Dampfgehalt (Zustand 1A). Tank B enthält $V_B = 0.5 \text{ m}^3$ Wasser bei $p_{1,B} = 200 \text{ kPa}$ und $T_{1,B} = 250^\circ\text{C}$ (Zustand 1B). Das Ventil wird geöffnet und ein Stoffaustausch zwischen beiden Tanks findet statt, bis in beiden Tanks derselbe Zustand (Zustand 2) herrscht. In diesem Endzustand ist das System im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung, die eine Temperatur von $T_0 = 25^\circ\text{C}$ besitzt.

a) Bestimmen Sie für den Gleichgewichtszustand $T_2 = 25^\circ\text{C}$

- das spezifische Volumen v_2 ,
- den Dampfgehalt x_2 ,
- den Druck p_2 ,
- die spezifische innere Energie u_2 .

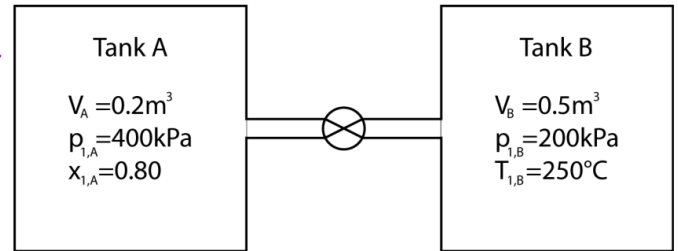


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

① System klassifizieren, Systemgrenze

Geschlossenes System, diatherm (nicht isoliert)



Gesamtmasse bleibt konst.

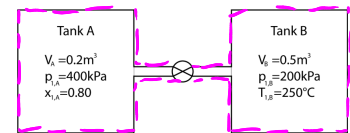


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Endzustand: $T_2 = T_0 = 25^\circ\text{C}$ Tank A, B herrscht gleiche Bedingung (p, T)

② Ansatz für V_2 ? $\Rightarrow V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$V_{\text{tot}} = V_A + V_B = 0.2 \text{ m}^3 + 0.5 \text{ m}^3 = 0.7 \text{ m}^3$$

Zustand 2 zu viel Unbekannte, m_{tot} davon nicht lösbar,

Zustand 1A, V, p, x geg. $\Rightarrow m_{A,1}$ lösbar

Sowie Zustand 1B mit V, p, T $\Rightarrow m_{B,1}$ lösbar $\Rightarrow m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$

Falls x (Dampfgehalt) geg. ist, ist der Stoff in ND. (Nassdampf-Gebiet), hier ist p (Druck) und T (Temp.) gekoppelt $\Rightarrow$ In ND. eine Druck-Wert für eine Temp.-Wert.

$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

③ Lösen für $m_{A,1}$, $m_{B,1}$

$$P_{1,A} = 400 \text{ kPa} = 4 \text{ bar}, \text{ ND. } x = 80\%, V_A = 0,2 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{v_{1,A}}$$

$$V_{1,A} = \frac{V_A}{m_{A,1}} \Rightarrow m_{A,1} = \frac{V_A}{v_{1,A}}$$

$v_{1,A}$ ist mit x (Dampfgehalt) gut lösbar

Aus ZF

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 $h_{fg} = h_g - h_f$

$$\Rightarrow V_{1,A} = v_f + x(v_g - v_f)$$

Vorwarnung: , ist kein , auf Deutsch

230	6,938	5,026	204.464
240	7,280	5,285	205.920
250	7,627	5,548	207.337

5'548 207,337

$\Rightarrow$ TAB A-3 Pressure TAB

$$v_f \times 10^3 = 1,0836 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Achtung: $v_f = (\text{table value})/1000$

$\downarrow$

$$v_f = 1,0836 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_g = 0,4625 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{1,A} = v_f + x(v_g - v_f) = [1,0836 \times 10^{-3} + 0,8(0,4625 - 1,0836 \times 10^{-3})] \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$= 0,37021672 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{v_{1,A}} = \frac{0,2 \text{ m}^3}{0,3702167 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,540224 \text{ kg}$$

Nun für $m_{B,1}$

$$V_B = 0,5 \text{ m}^3 \quad P_{1,B} = 2 \text{ bar} \quad T_{1,B} = 250^\circ \text{C}$$

compressed Water? ND? Superheated Vapor?

check TAB A-3 Pressure TAB for ND

$$2 \text{ bar} \rightarrow 120,2^\circ\text{C}$$

wir haben $T_{1,8} = 250^\circ\text{C}$

Unserer Stoff ist heisser als ND gekoppelte Temp.

$\Rightarrow$ Stoff nicht mehr in ND.

$\Rightarrow$ heissere Temp. nur in "Superheated Vapor"

$\Rightarrow$ TAB A-4 verwenden

2 bar liegt zw. 1,5 bar, 3 bar

250°C liegt zw. 240°C , 280°C

Muss 3 mal lerp.

• lerp. Formel hinschreiben

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



• lerp. TAB machen, mit Bemerkung aus welcher TAB

		$T [\text{K}]$	$V_g [\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}]$	$u [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$		
1,5 bar						Aus TAB A-4
	x_1	240	1,570	2717,2	y_1	
lerp.	$\rightarrow$	250	1,60125	2732,55	$\leftarrow$	
	x_2	280	1,695	2778,6	y_2	
3 bar						
	x_1	240	0,781	2713,1	y_1	
lerp.	$\rightarrow$	250	0,79675	2728,675	$\leftarrow$	
	x_2	280	0,844	2775,4	y_2	

$\downarrow u_2$ ist auch gefragt,

Aus TAB A-4

$\rightarrow$ lerp. 2 bar

$$\text{lerp. } \rightarrow V_g @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 1,333 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow u_{1,8} @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ML checked $\checkmark$

$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{a1} + m_{a2}$$

$$m_{a1} = \frac{V_{a1}}{V_{a2}}$$

$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{g,1}}$$

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_g} = \frac{0,5 m^3}{1,333 \frac{m^3}{kg}} = 0,3751 \text{ kg}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1} = (0,540224 + 0,3751) \text{ kg} = 0,915324 \text{ kg}$$



$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}} = \frac{0,7 m^3}{0,915324 \text{ kg}} = \underline{\underline{0,764756 \frac{m^3}{kg}}}$$

ML. 0,765 $\frac{m^3}{kg}$ ✓

- den Dampfgehalt x_2 ,

Wenn es schon nach Dampfgehalt fragt, dann sollte Stoffzustand in ND. (Nass-Dampf) sein

Endzustand $T_2 = 25^\circ C$, aus oben $V_2 = 0,764756 \frac{m^3}{kg}$

Mit unserer Überlegung, es muss in ND sein $\Rightarrow$ TAB-A2 (Liquid-Vapor)

ges.: x_2

Aus ZF

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

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

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f) \Rightarrow V_2 = V_f + x(V_g - V_f)$

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

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

$$\downarrow$$

$$x_2 = \frac{V_2 - V_f}{V_g - V_f}$$

$T [^\circ C]$	p	$V_f \times 10^3$	$V_g [\frac{m^3}{kg}]$
25	0.03169	1.0029	43.360

TAB-A2

$$x_2 = \frac{0,764756 - 1,0029 \times 10^{-3}}{43,360 - 1,0029 \times 10^{-3}} = \underline{\underline{0,017615}}$$

ML. 0,0176 ✓

- den Druck p_2 , Es ist in ND, was bedeutet es?

Dort Druck und Temp sind gekoppelt.

$$\Rightarrow T_2 = 25^\circ\text{C} \text{ bekannt} \Rightarrow P_2 = \underline{0,03169 \text{ bar}} \text{ aus TAB A-2}$$

M.L. 3,169 Kpa ✓

- die spezifische innere Energie u_2 .

$$u_{1,8} @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ aus Vorher}$$

Diese lerp. wert bringt uns nicht weiter...

Opps. u lerp. umsonst. Zeit verschwendet

option: ① lerp. wegstreichen, weitere Ansatz finden

② lerp. stehen lassen, weitere Ansatz finden

Neu Überlegung: Bekannt ND, x_2 , T_2 , P_2

ges. u_2

Aus ZF

Schau noch in TAB A-2

u_f , u_g in TAB

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 $h_{fg} = h_g - h_f$



$$\Rightarrow u_2 = u_f + x_2(u_g - u_f)$$

$$u_f @ 25^\circ\text{C} = 104,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_g @ 25^\circ\text{C} = 2409,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

TAB A-2

$$u_2 = [104,88 + 0,017615(2409,8 - 104,88)] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{145,4811 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

M.L. 145,45 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ✓

b) Berechnen Sie den Wärmeübergang Q_{12} zwischen System und Umgebung, der nötig ist, um vom Anfangszustand zum Gleichgewichtszustand zu gelangen.

Systemgrenz, Ansatz?

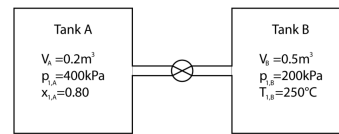
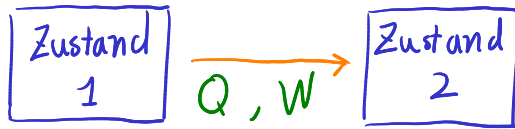


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Überlegung für Ansatz-Findung



Zustand 1, 2 bekannt
ges.: Prozessgrößen wie Q, W

1. HS nützlich

Energieänderung zw. 2 Zustände $\Delta E = Q - W$ ← Die rein/aus gehende Energie, diese ΔE verursacht

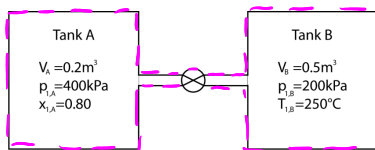


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

• Geschlossenes System, diatherm (nicht isoliert)

$$Q \neq 0$$

• Von Zustand 1 $\rightarrow$ 2: $V_{\text{tot}} = \text{const}$

$$\Rightarrow p dV = 0 \Rightarrow \text{keine Volumenarbeit}$$

$$\Rightarrow W_{V,12} = 0$$

$$\Rightarrow \Delta E = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} = Q_{12} - \cancel{W_{V,12}} \rightarrow 0, V = \text{const}$$

Ruhe Gas.

$$\Delta U = Q_{12}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12}$$

Wie berechnen wir U auf Zustand 1 und 2?

U_1 : Tank A, B getrennt $\Rightarrow$ Unseres Gesamtes Sys. besteht aus 2 Sub-Sys.



Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

$$U_1 = U_{1,A} + U_{1,B}$$

$$= m_A \cdot u_{1,A} + m_B \cdot u_{1,B}$$

m_A, m_B aus a)

$u_{1,A}, u_{1,B}$ unbekannt

ges: $u_{1,A}$?

geg: $x_{1,A} = 0,8 \Rightarrow ND$ $p_{1,A} = 400 \text{ kPa} = 4 \text{ bar} \Rightarrow$ in TAB A-3

Lsg: **Aus ZF**

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

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

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

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f) \Rightarrow u_{1,A} = u_f + x_{1,A}(u_g - u_f)$

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

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

$u_f = 604,31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
 $u_g = 2553,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ aus TAB A-3

$$u_{1,A} = \left[604,31 + 0,8(2553,6 - 604,31) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2163,742 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ges: $u_{1,B}$

geg: $P_{1,B} = 2 \text{ bar}$ $T_{1,B} = 250^\circ\text{C}$

Lsg: "Superheated Vapor"

Aus a), wir hatten für $u_{1,B}$ aus falscher Intension ge-lerpt.

① lerp. wegstreichen, weitere Ansatz finden

- Du musst doppelte Lerp. für $u_{1,B}$ nochmals machen.
- Weil wir in dieser großen Aufgabe lerp. Formel schon hingeschrieben haben, müssen wir sie nicht mehr nochmals schreiben.
- Stellt die lerp. TAB auf, Oder einfach schreiben, Welche Werte genutzt werden, und aus welcher TAB sie kommt.

② lerp. stehen lassen, weitere Ansatz finden

aus a) $u_{1,B} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

ich hatte genau das bei meiner Prüfung gemacht.

Falsche Ansatz $\rightarrow$ eine nützlose Wert mit Doppelte lerp. bekommen,

Kurz Panik ... Ruhe bewahren,

lasse meine lerp. stehen,

Weiter gelöst.

Dann kam in nächste Teil Aufgabe, brauche ich dies lerp. ich konnte deswegen direkt sagen,

"Wert@... = ... aus Vorher"

und musste nicht gleiche lerp. nochmals machen.

z.B.

Aus TAB ...

@ $P = \dots \text{ bar}$

Wert 1 @ $T = \dots$ lerp.
Wert 2 @ $T = \dots$] $\rightarrow$ Wert A @ Ziel Temp.

@ $P = \dots \text{ bar}$

Wert 3 @ $T = \dots$ lerp.
Wert 4 @ $T = \dots$] $\rightarrow$ Wert B @ Ziel Temp.

lerp. für Ziel Druck

$\rightarrow$ Wert, Final @ Ziel P, T

$$U_1 = U_{1,A} + U_{1,B}$$

$$= m_A \cdot u_{1,A} + m_B \cdot u_{1,B}$$

$$= 1168,90536 \text{ kJ} + 1024,494988 \text{ kJ} = 2193,4 \text{ kJ}$$

$$u_{1,A} = 2163,742 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_{1,B} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$m_{A,1} = 0,540224 \text{ kg}$$

$$m_{B,1} = 0,3751 \text{ kg}$$

$$\Delta U = Q_{12}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12}$$

Rote Faden nicht verlieren, brauchen noch U_2

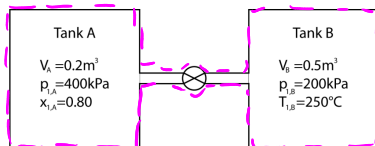


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Endzustand :

Tank A, B herrscht gleiche Bedingung (p, T)

$\Rightarrow$ Man kann das Sys. als Ein betrachten

$$\Rightarrow U_2 = m_{\text{tot}} \cdot u_2$$

$$m_{\text{tot}} = 0,915324 \text{ kg} \quad \text{aus a)}$$

$$u_2 = 145,4817 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 133,1623 \text{ kJ}$$

$$\Rightarrow Q_{12} = \Delta U = U_2 - U_1 = \underline{\underline{-2060,23765 \text{ kJ}}}$$

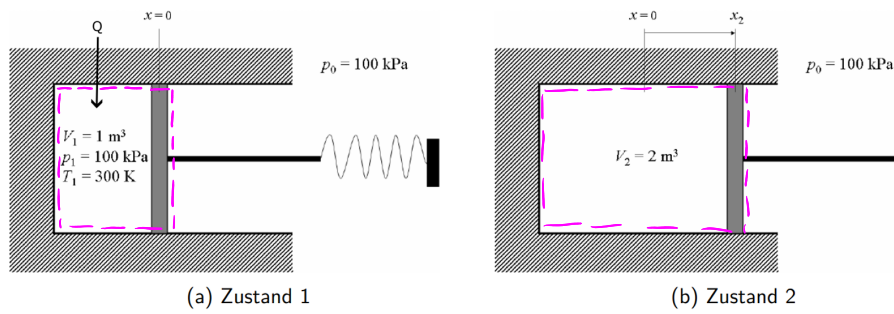
$$\text{ML. } -2059,5 \text{ kJ } \checkmark$$

Sys. verliert oder bekommt die Wärme ?

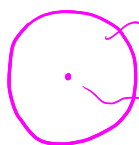
Bankkonto Analogie für Wärme

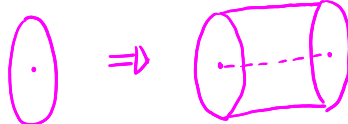
$Q < 0 \Rightarrow$ Verlust $\Rightarrow$ Wärme geht raus

Wieso hat Federkraft kein Einfluss auf Volumenarbeit?
Wieso betrachtet man Federkraft separat?



Sys. grenze - Querschnitt

 Feder-Stab Querschnitt vernachlässigen $\Rightarrow$ Federkraft wird zu einem Punkt

Überlegung: 

Wenn man eine Fläche zieht, entsteht Volume

Wenn man einen Punkt zieht, entsteht Linie $\neq$ Volume

deswegen verursacht diese Punkt Kraft keine Volumenarbeit,
Weil es keine ΔV verursacht.

Aber diese Punktkraft hat auch einen Weg hinterlegt

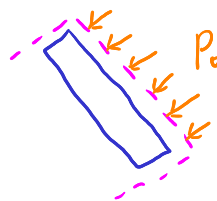
$\Rightarrow$ Sys. hat gegen diese Punktkraft Arbeit geleistet $\Rightarrow$ Federarbeit.

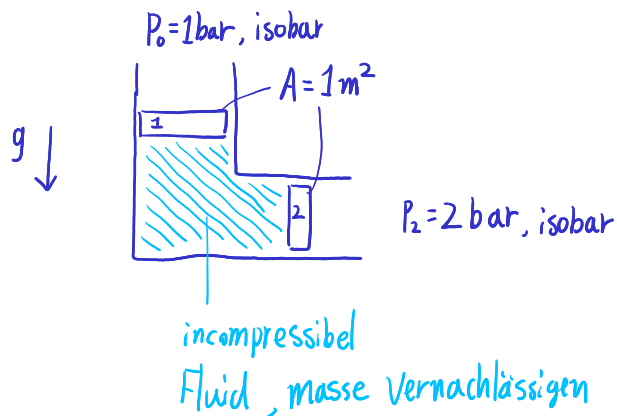
Volumenarbeit

$$W_V = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

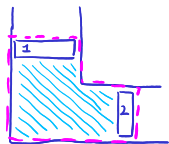
$\uparrow$
der Druck, der an sys. Grenze wirkt

Der Ausdehnung, die an dieser spezifische Grenze passiert.

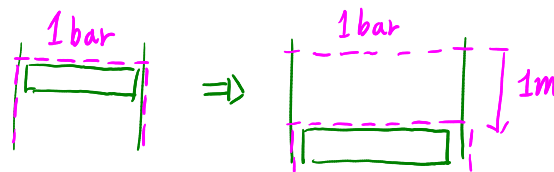




Kolben 1 1m nach unten bewegt,
 Welche W_v hat sys. geleistet?



Kolben 1



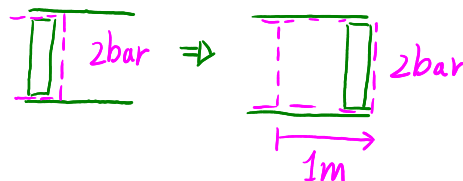
$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta V_1 &= \Delta x_1 \cdot A \\ &= -1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 \\ &= -1 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volumenarbeit an dieser sys. Grenze

$$W_{V1} = \int P_0 dV = P_0 \cdot \Delta V_1 = 100 \text{ kPa} \cdot (-1 \text{ m}^3) = -100 \text{ kJ}$$

incompressibel $\Delta V_{\text{tot}} = 0$ für Medium $\Rightarrow$ Kolbe 2 muss auch nach rechts 1m

$$\Delta V_{\text{tot}} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = -1 \text{ m}^3 + \underbrace{\Delta x_2 \cdot A}_{\Delta V_2 = 1 \text{ m}^3} = 0$$



für Kolben 2 $W_{V2} = P \Delta V = 2 \text{ bar} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 200 \text{ kJ}$

$$W_v = W_{V2} + W_{V1} = 200 \text{ kJ} - 100 \text{ kJ} = \underline{\underline{100 \text{ kJ}}}$$

Kolben 1 hat gewicht.

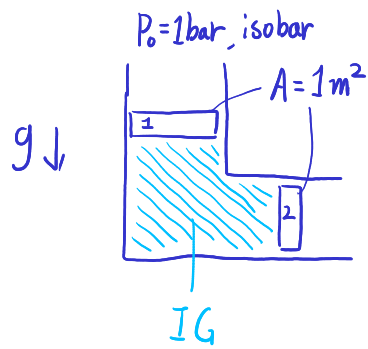
verursacht $P_2 = 2 \text{ bar}$.

$$W = 100 \text{ kJ} \quad \Delta E = \Delta PE = -W = -100 \text{ kJ}$$

↑ Kolben

↑ Kolben 1, 1m gesunken ✓

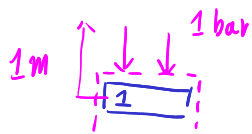
Appendix



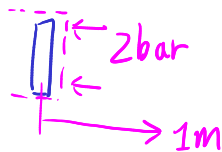
Kolben 1 nach oben 1m

Kolben 2 nach Rechts 1m

Welche W_v hat sys. geleistet?

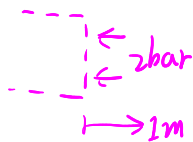
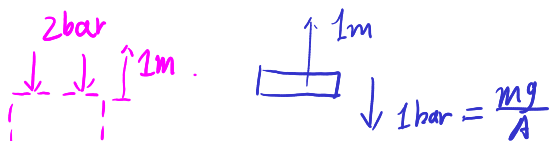


$$100\text{kPa} \cdot 1\text{m}^3 = 100\text{kJ}$$



$$200\text{kPa} \cdot 1\text{m}^3 = 200\text{kJ}$$

$$W_v = (100 + 200)\text{kJ} = \underline{\underline{300\text{kJ}}}$$



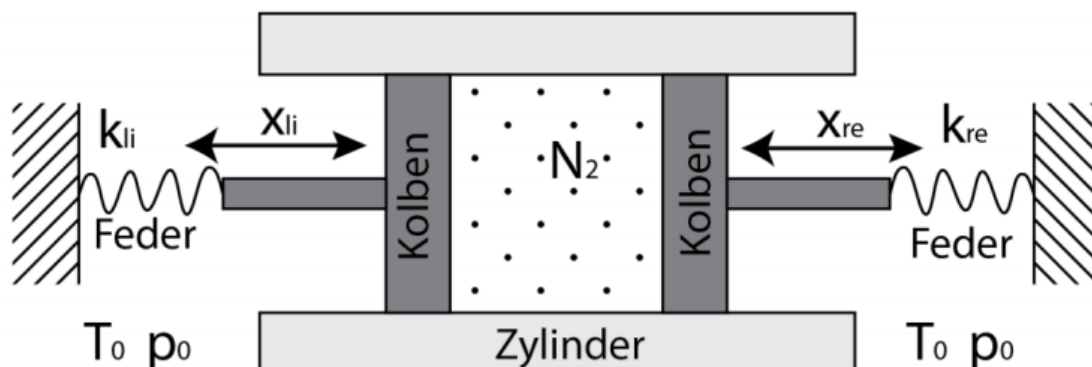
sys. ohne Kolben 1: $\Rightarrow 400\text{kJ} = W_v$

Aufgabe 3 – Stickstoff im Doppelkolben-Zylinder-System (~25% der Punkte)

In einem Doppelkolben-Zylinder-System befindet sich Stickstoff (N_2 , Annahme: ideales Gas). Im Anfangszustand (Zustand 1) gilt $V_1 = 4 \text{ m}^3$, $p_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 700 \text{ K}$. Jeder der beiden Kolben ist nach aussen mit einer Feder verbunden (siehe Skizze). In Zustand 1 üben die Federn keine Kraft auf den jeweiligen Kolben aus. Je nach Auslenkung der Feder $|x|$ (Stauchung oder Dehnung) ist die Federrückstellkraft $|F| = k \cdot |x|$, mit den Federkonstanten $k_{li} = 10 \text{ kN/m}$ (linke Feder) und $k_{re} = 20 \text{ kN/m}$ (rechte Feder). Die Querschnittsfläche der Kolben beträgt jeweils $A = 1 \text{ m}^2$.

Nun gibt der Stickstoff Wärme an die Umgebung ab, wodurch sich das Stickstoffvolumen halbiert und das System Zustand 2 erreicht. Der Umgebungsdruck beträgt $p_0 = 1 \text{ bar}$, die Umgebungstemperatur beträgt $T_0 = 280 \text{ K}$.

- (8 Punkte) Bestimmen Sie die Masse des Stickstoffs, sowie den Druck p_2 und die Temperatur T_2 des Stickstoffs in Zustand 2.
- (5 Punkte) Bestimmen Sie die gesamte Arbeit W_{12} , die der Stickstoff mit seiner Umgebung während der Zustandsänderung 1 nach 2 austauscht. Geben Sie an, ob der Stickstoff Arbeit leistet, oder Arbeit an ihm geleistet wird.
- (4 Punkte) Bestimmen Sie die Wärme Q_{12} der Zustandsänderung 1 nach 2.
- ~~(3 Punkte) Berechnen Sie die vom System erzeugte Entropie S_{erz} während der Zustandsänderung 1 nach 2.~~



Aufgabe 3 – Lösung

$$a) \quad m_{N_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot \bar{R} / M_{N_2}} = 1.9252 \text{ kg} \quad \text{mit } M_{N_2} = 0.002801 \text{ kg/mol aus TAB A-1}$$

$$\text{Auslenkung: } x_{\text{ges}} = x_{\text{li}} + x_{\text{re}} = \frac{\Delta V}{A} = 2 \text{ m}$$

$$\text{Kräftegleichgewicht: } F_{\text{li}} = F_{\text{re}} \rightarrow k_{\text{li}} \cdot x_{\text{li}} = k_{\text{re}} \cdot x_{\text{re}}$$

$$x_{\text{li}} = (k_{\text{li}} / (k_{\text{li}} + k_{\text{re}})) \cdot x_{\text{ges}} \quad k_{\text{li}} \cdot 2 = k_{\text{re}}$$

$$\text{Druck im Zustand 2: } p_2 = p_0 - \frac{F}{A} = p_0 - \frac{k_{\text{li}} \cdot x_{\text{li}}}{A} = 0.86667 \text{ bar}$$

$$\text{Temperatur im Zustand 2: } T_2 = T_1 \frac{p_2 \cdot V_2}{p_1 \cdot V_1} = 303.33 \text{ K}$$

$$b) \quad p(\tilde{x}) = p_0 - \frac{F_{\text{li}}}{A} = p_0 - \frac{k_{\text{li}} \cdot \tilde{x}_{\text{li}}}{A}$$

$$W_{12,\text{li}} = \int_{V_{\text{Zustand 1}}}^{V_{\text{Zustand 2}}} p(\tilde{x}) dV = A \cdot \int_{x_{\text{Z1}}}^{x_{\text{Z2}}} p_{N_2}(x) dx = A \cdot \int_{x_{\text{li}}}^0 \left(p_0 - \frac{k_{\text{li}} \cdot \tilde{x}_{\text{li}}}{A} \right) d\tilde{x}_{\text{li}}$$

$$= -A \cdot p_0 \cdot x_{\text{li}} - k_{\text{li}} \cdot \int_{x_{\text{li}}}^0 \tilde{x}_{\text{li}} d\tilde{x}_{\text{li}} = -A \cdot p_0 \cdot x_{\text{li}} + k_{\text{li}} \cdot \frac{x_{\text{li}}^2}{2} = -124.44 \text{ kJ}$$

$$W_{12,\text{re}} = \dots = -A \cdot p_0 \cdot x_{\text{re}} + k_{\text{re}} \cdot \frac{x_{\text{re}}^2}{2} = -62.22 \text{ kJ}$$

$$W_{12,\text{ges}} = W_{12,\text{li}} + W_{12,\text{re}} = -186.67 \text{ kJ}$$

Die Umgebung leistet Arbeit am Stickstoff.

c) Energiebilanz für ein geschlossenes System:

$$U_{12} = Q_{12} - W_{12,\text{ges}} \rightarrow Q_{12} = U_{12} + W_{12,\text{ges}} = -766.272 \text{ kJ}$$

$$U_{12} = U_2 - U_1 = m_{N_2} \cdot (u_2 - u_1) = m_{N_2} \cdot c_v \cdot (T = (T_1 + T_2) / 2) \cdot (T_2 - T_1) = -579.606 \text{ kJ}$$

$$c_v(T = (T_1 + T_2) / 2) = c_v(T = 500 \text{ K}) = 0.759 \text{ kJ/(kgK)} \quad \text{aus TAB A-20 interpoliert}$$

Alternativ: mit Tabelle A-23

$$U_{12} = U_2 - U_1 = (m_{N_2} / M_{N_2}) \cdot (\bar{u}_2 - \bar{u}_1) = -583.227 \text{ kJ}$$

$$U_{12} = Q_{12} - W_{12,\text{ges}} \rightarrow Q_{12} = U_{12} + W_{12,\text{ges}} = -769.894 \text{ kJ}$$

$$d) \quad S_{\text{erz},12} = S_2 - S_1 - \frac{Q_{12}}{T_G} = S_2 - S_1 - \frac{Q_{12}}{T_0} = 1131.62 \text{ J/K}$$

$$S_2 - S_1 = m_{N_2} \cdot (s_2 - s_1) = m_{N_2} (c_p \cdot \ln(T_2 / T_1) - R_{N_2} \cdot \ln(p_2 / p_1)) = -1618 \text{ J/K}$$

$$R_{N_2} = \bar{R} / M_{N_2} = 296.823 \text{ J/(kgK)} \quad c_{p,N_2} = c_{v,N_2} + R_{N_2} = 1055.823 \text{ J/(kgK)}$$