Institut für Thermodynamik
Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Jürgen Köhler

19. August 2019

Klausur zur Vorlesung
Thermodynamik

Für alle Aufgaben gilt: Der Rechen- bzw. Gedankengang muss stets erkennbar sein!
Interpolationsvorschriften und Stützstellen sind anzugeben.
Hilfsmittel sind zugelassen, die Bearbeitungszeit beträgt 90 Minuten.
Verwenden Sie ausschließlich die im Lehrbuch angegebenen Dampftafeln.
Falls Ersatzergebnisse angegeben sind, müssen diese auf jeden Fall verwendet werden.

Aufgabe 1: *Kompressionsfeuerzeug* 11 von 50 Punkten

Es gibt spezielle Feuerzeuge, die Papier oder Watte nur durch Kompression eines Gases und der damit verbundene Temperaturerhöhung entzünden können. Diese Feuerzeuge bestehen aus einem zylinderförmigen Rohr, in dessen eines Ende ein bisschen Papier oder anderes leicht entzündliches Material gelegt wird. Dann wird dieses Ende dicht verschlossen. In das andere Ende wird ein Kolben zunächst vorsichtig 2 cm weit eingeführt. Dann wird der Kolben schlagartig in das Rohr geschoben, so dass das im Rohr eingeschlossene Gas annähernd adiabat verdichtet wird. Gehen Sie weiterhin davon aus, dass die Verdichtung des Gases reibungsfrei erfolgt.

Das Rohr hat einen Innendurchmesser von $d_i = 15\,mm$ und eine Gesamtlänge von $L = 20\,cm$. Das (ideale) Gas im Rohr ist Luft, die zunächst eine Tempertur von $t_1 = 20°C$ hat.

a) Wie weit muss der Kolben in das Rohr eindringen, damit sich das Papier selbst entzündet? Hinweis: Papier hat eine Zündtempertur von etwa $300°C$.

b) Warum entzündet sich das Papier nicht, wenn man den Kolben zu langsam in das Rohr schiebt?

c) Wie weit müsste der Kolben in das Rohr eindringen, wenn man das Rohr statt mit Luft mit dem (idealen) Edelgas Helium füllte und die gleiche Temperatur ($300°C$) erreichen wollte? (Natürlich entzündet sich das Papier in Helium nicht.)

d) Beim Experimentieren mit dem Kompressionsfeuerzeug wird folgende Beobachtung gemacht: Wenn der Kolben die Luft langsam verdichtet und dann schlagartig losgelassen wird, so dass sich die Luft wieder ausdehnen kann, trübt sich die Luft im Rohr ein. Erklären Sie diesen Effekt!

Lösungsvorschlag A1:

a) Es handelt sich um eine adiabt isentrope ZÄ: Das zu erzielende Temperturverhältnis beträgt $\frac{T_1}{T_2} = \frac{293{,}15K}{573{,}15K}$. Damit ergibt sich ein Volumenverhältnis von $\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 5,34$. Da der relevante Abschnitt des Rohrs zunächst (20-2)=18 cm lang ist, muss dieser Abschnitt durch Einschieben des Kolbens auf 18cm / 5,34 = 3,37cm verkürzt werden. Der Kolben dring also 20-3,37 = 16,63cm in das Rohr ein.

b) Dann ist es nicht mehr adiabat, da Wärme abgegeben werden kann.

c) Gleiche Rechnung nur mit anderem Kappa:Helium hat laut Anhang Kappa 1,66. Damit ergibt sich ein Einschub von 13,48 cm.

d) Nun isotherme Kompression und dann adiabate Entspannung. Dabei sinkt die Temperatur. Wird der Taupunkt unterschritten, ist also $p_s(t_2)$ kleiner als p_d, kondensiert Wasser aus und es bildet sich ein feiner Nebel.

Aufgabe 2: *Wasser im Nassdampfgebiet* 9 von 50 Punkten

a) In einem Wasserkocher mit einer Leistunsaufnahme $\dot{W}_{el} = 2\,kW$, der in Ihrer Küche steht, befinden sich 750 g Wasser mit einer Temperatur von $50°C$. Wie lange dauert es mindestens bis 2 Prozent der Wassermasse verdampft sind?

b) In einem Behälter mit einem konstanten Volumen von 4,10 Litern befindet sich ausschließlich 2,00 kg Wasser im Zustand 1 mit einem Druck von $p_1 = 1{,}00\,bar$. Wieviel Wärme Q_{1-2} muss zugeführt werden, damit in dem Behälter im Zustand 2 nur siedende Flüssigkeit vorliegt? Zeichen Sie den Prozess in ein p-V-Diagramm ein!

Lösungsvorschlag A2: a) Energiebedarf (Erwärmen auf $100°C$ und Verdampfen von 2 Prozent): $0{,}75kg \cdot (100°C - 50°C) \cdot 4{,}18\frac{kJ}{kgK} + 0{,}02 \cdot 0{,}750kg \cdot (2673{,}8 - 417{,}4)\,\frac{kJ}{kg} = 190{,}6kJ$.

Dauer: $\frac{190{,}6kJ}{2kW} = 95{,}3$ Sekunden.

b) $v_1 = \frac{V}{m} = 2.05 \cdot 10^{-3}\frac{m^3}{kg}$

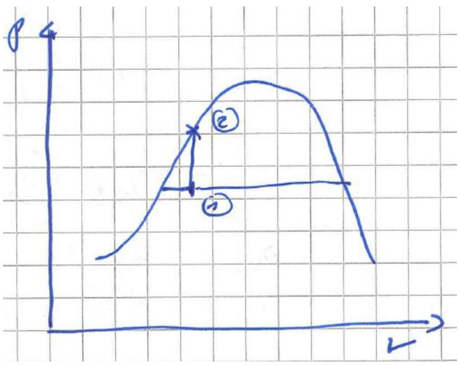
$x_1 = \frac{v_1 - v'}{v'' - v'} = 5.97 \cdot 10^{-4}$

$h_1 = x_1\,(h'' - h') + h' = 418.75\frac{kJ}{kg}$

konstantes Volumen, also: $v_1 = v_2'$ ablesen aus Dampftafel ergibt $p_2 = 200bar$

$h_2 = h'(200bar) = 1823{,}6\frac{kJ}{kg}$

$Q = (\Delta h - \Delta pv)\,m = 2728.1kJ$



Aufgabe 3: *Gemischte Fragen* 13 von 50 Punkten

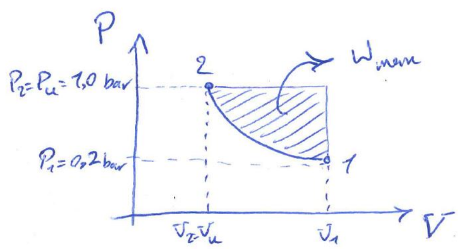
a) In einem Kolben-Zylinder-System befindet sich Luft mit einem Druck $p_1 = 0{,}2\,bar$ und Umgebungstemperatur $t_U = 20°C$. Der Umgebungsdruck beträgt $p_U = 1\,bar$. Wird der Kolben losgelassen, kann er Arbeit verrichten. Zeichnen Sie die maximale Arbeit qualitativ korrekt in ein p-v-Diagramm ein. Berechnen Sie außerdem die maximale spezifische Arbeit.

b) In einen Luftstrom ($\dot{m}_{L,trocken} = 0{,}2\,\frac{kg}{s}$, $t_{L,1} = 20°C$, $\varphi_1 = 25\%$) wird bei Normaldruck Wasser eingespritzt. Nach der Einspritzung hat die Luft eine relative Feuchte von $\varphi_2 = 80\%$ und die Wasserbeladung liegt bei $x_2 = 7\,g/kg$. Berechnen (!) Sie, wie viel Gramm Wasser pro Sekunde eingespritzt wurden, und ermitteln Sie die Temperatur der Luft nach der Einspritzung?

c) Erklären Sie, wie Sie die Enthalpie eines Systems in Abhängigkeit von Volumen und Temperatur H(V,T) bestimmen können, wenn Ihnen lediglich eine Funktion für die freie Energie in Abhängigkeit von Volumen und Temperatur F(V,T) zur Verfügung steht?

Lösungsvorschlag A3:

a) $-w = u_1 - u_u + P_u\,(v_1 - v_u) - T_u\,(s_1 - s_2)$
$u_1 - u_u = 0$ (ideales Gas, innere Energie nur von Temperatur abhängig, $T_1 = T_u$)
$P_u\,(v_1 - v_u) = 336,65\frac{kJ}{kg}$ (Volumen über ideale Gasgleichung $v = \frac{RT}{p}$)
$T_u\,(s_1 - s_2) = T_u\left(c_p \ln\frac{T_1}{T_u} - R\ln\frac{p_1}{p_u}\right) = -135,46\frac{kJ}{kg}$
$-w = 201,2\frac{kJ}{kg}$



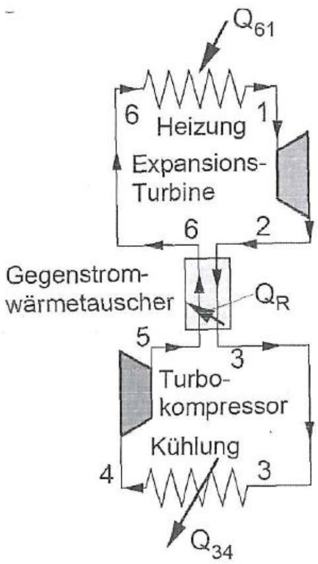
b) $p_{s,1}(20°C) = 0.0234bar$ aus Dampftafel
$p_{D,1} = p_{s,1}\varphi_1 = 0.00585bar$
$x_1 = 0.622\frac{p_{D,1}}{p - p_{D,1}} = 3,66\frac{g\ H_2O}{kg\ Luft}$
$\Delta x = 3.34\frac{g\ H_2O}{kg\ Luft}$ und damit $\dot{m}_w = \Delta x \cdot \dot{m}_{L,trocken} = 0.668\frac{g\ H_2O}{s}$
$u_2 = 0.622\frac{p_{D,2}}{p - p_{D,2}}$ umgestellt nach $p_{D,2} = 0.011bar$
$p_{S,2} = \frac{p_{D,2}}{\varphi_2} = 0.014bar$
Interpolation in Dampftafel liefert $T_2 = 11,7°C$

c) H=U+pV und F=U-TS liefern zusammen H=F+TS+pV
F, V und T sind gegeben. Unbekannte sind S und p.
Vergleich von $dF = -SdT - pdV$ und totalem Differential $dF = \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT$

liefert: $S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V$ und $p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T$ (Alternativ aus Guggenheim Quadrat)
Somit $H(V,T) = F(V,T) - T\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V - V\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T$

Aufgabe 4: *Geschlossener Jouleprozess* 17 von 50 Punkten

Betrachtet wird der unten abgebildete Joule-Prozess mit internem Wärmeübertrager, in dem das Arbeitsmedium Luft (ideales Gas: $\kappa = 1{,}4$ und $c_p = 1{,}006\,\frac{kJ}{kg\,K}$) umläuft. Alle Wärmeübertrager sind isobar. Dem adiabaten Verdichter mit dem Wirkungsgrad $\eta_{S,V} = 0,90$ wird eine Leistung $\dot{W}_t = 200\,kW$ zugeführt . Am Eintritt des Verdichters beträgt der Druck 0,25 bar und die Temperatur $35°C$. Im internen Wärmeübertrager wird die Wärme $\dot{Q}_{5-6} = 85\,kW$ übertragen. Dem Prozess wird die Wärme $\dot{Q}_{6-1} = 0{,}55\,MW$ zugeführt, die zu einer Temperaturänderung von $\Delta T_{6-1} = 728,96\,K$ führt. Der gesamte Prozess hat einen thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 0{,}445$.



a) Zeichnen Sie den Prozess in ein T-s-Diagramm und tragen Sie die bereits bekannten Werte ein.

b) Bestimmen Sie die Temperaturen und Drücke an allen sechs Eckpunkten des Prozesses.

c) Bestimmen Sie den Isentropenwirkungsgrad $\eta_{S,T}$ der Turbine.

d) Wäre es sinnvoll, einen größeren internen Wärmeübertrager zu verwenden?

Lösungsvorschlag A4:

a) Joule Prozess im T-S-Diagramm, rechtslaufender Prozess im Gasgebiet
$T_4 = 308,15K$ und $p_{ND} = 0.25bar$ gegeben, $4 \to 5$ verlustbehaftete Verdichtung auf p_{HD}
$5 \to 6$ isobare WÜ im IHX, Wärme wird aufgenommen
$6 \to 1$ isobare Wärmeaufnahme, gleiche Isobare wie $5 \to 6$
$1 \to 2$ verlustbehaftete Entspannung auf p_{ND}
$2 \to 3$ isobare Wärmeabgabe im IHX (wichtig: $T_2 > T_6$ und $T_3 > T_5$!)
$3 \to 4$ isobare Wärmeabgabe

b) $p_{ND} = 0.25bar = p_4 = p_3 = p_2$
$m = 0.75\frac{kg}{s}$ aus $\dot{Q}_{61}$ und kalorischer Zustandsgleichung + ideales Gas

T_3 aus kal. Zustandsgl. & $\dot{Q}_{34}$, $\dot{Q}_{34}$ wird mit η_{th} berechnet
$\dot{Q}_{23} = \dot{Q}_{56}$ daraus folgt $T_2 = T_3 + \frac{\dot{Q}_{23}}{c_p \cdot \dot{m}}$
T_5 über Zustandsänderung $4 \rightarrow 5$ $T_5 = T_4 + \frac{\dot{P}_{verd}}{c_p \cdot \dot{m}}$ T_5^* aus Verdichterwirkungsgrad berechnen, um $p_5 = p_{HD}$ aus isentroper Zustandsänderung von $4 \rightarrow 5^*$ berechnen zu können.
$p_5 = P_4 \cdot \left(\frac{T_5^*}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = p_6 = p_1$
T_6 mit kal. Zustandsgl. und $\dot{Q}_{56}$ berechnen, T_1 über gegebenes ΔT_{61}

c) T_2^* wird über isentrope ZÄ analog zu Berechnung von T_5^* bestimmt.
Daraus ergibt sich für den Wirkungsgrad $\eta_{S,T} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2^*} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_2^*} = 0.955$

d) Ja es ist sinnvoll, da:
- eine hohe Temperaturdifferenz im internen WÜ vorliegt; somit ist Potential für die Übertragung eines höheren Wärmestroms vorhanden
- ein größerer WÜ bedeutet eine größere Wärmeübertragungsfläche und somit eine kleinere Temperaturdifferenz bei gleichbleibendem Wärmestrom
- kleinere Temperaturdifferenz bei Wärmeübertragung bedeutet weniger Entropieproduktion
- wenn der Wärmestrom im internen WÜ vergrößert wird muss dem Prozess weniger Wärme zugeführt werden; dadurch verbessert sich der Systemwirkungsgrad