

## 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: *Reduktion des Primärenergieverbrauchs*

8 von 50 Punkten

In einem Haushalt werden alle konventionellen Glühbirnen (insgesamt  $\dot{W}_{el,1} = 800 \text{ W}$ ) durch LED-Lampen (insgesamt  $\dot{W}_{el,2} = 120 \text{ W}$ ) ersetzt. An Wintertagen, an denen die Lampen 8h betrieben werden, wird das Haus mit einer Gasheizung beheizt, die einen Wirkungsgrad von  $\eta = 0,93$  hat, in der also 93 Prozent der im Gas gebundenen Energie als Wärme an die Räume abgegeben werden. An Sommertagen hingegen werden die Lampen nur 2 Stunden lang betrieben. Weiterhin wird das Haus im Sommer von einer Klimaanlage gekühlt, die eine Leistungszahl von  $\varepsilon = 3$  hat.

Der für Beleuchtung und Klimatisierung benötigte Strom kommt aus einem Gaskraftwerk, das einen thermischen Wirkungsgrad von  $\eta_{th} = 0,45$  hat.

Hinweis: Die Wirkungsgrade des Elektromotors der Klimaanlage bzw. des Generators im Kraftwerk sind in den gegebenen Wirkungsgraden bzw. Leistungszahlen bereits eingeschlossen. Leitungsverluste des elektrischen Stroms sollen nicht berücksichtigt werden.

- Wie groß ist im Sommer die durch das Auswechseln der Leuchtmittel erzielte Ersparnis an Primärenergie (= im Gas gebundene Energie) pro Stunde, in der das Licht brennt?
- Ist die Ersparnis an Primärenergie pro Sommertag größer als pro Wintertag?

Lösungsvorschlag 1:

Die Leistungsreduktion der Beleuchtung beträgt  $800-120 = 680$  W.

a) In einer Stunde werden also  $680 \text{ W} * 3600\text{s} = 2448$  kJ Energie gespart, die nicht als el. Strom zugeführt werden müssen. Um die Ersparnis an Primärenergie im Kraftwerk auszurechnen, muss dieser Wert durch den thermischen Wirkungsgrad des Kraftwerks geteilt werden:  $2448 \text{ kJ} / 0,45 = 5440$  kJ.

Gleichzeitig muss auch die Klimaanlage  $2448$  kJ Wärme weniger abführen und braucht somit  $2448 \text{ kJ} / 3 = 816$  kJ weniger Strom. Das führt zu einer zusätzlichen Primärenergieersparnis von  $816 / 0,45 = 1813$  kJ.

Die Gesamtersparnis an Primärenergie pro Stunde im Sommer beträgt also  $5440 \text{ kJ} + 1813 \text{ kJ} = 7253$  kJ.

b) In den 2h Brenndauer im Sommer werden also  $2\text{h} * 7253 \text{ kJ/h} = 14506$  kJ Primärenergie gespart.

An einem Wintertag werden fürs Beleuchten  $8\text{h} * 680\text{W} / 0,45 = 43520$  kJ Primärenergie gespart.

Nun fehlt die beim Beleuchten eingesparte Wärme ( $8\text{h} * 680\text{W} = 19584$  kJ) aber beim Heizen und muss von der Gasheizung kompensiert werden. Diese benötigt dafür die folgende Primärenergie  $19584 \text{ kJ} / 0,93 = 21058$  kJ.

Die Ersparnis beträgt also nur  $43520 \text{ kJ} - 21058 \text{ kJ} = 22462$  kJ; ist aber immer noch größer als an einem Sommertag.

**Aufgabe 2:** *Feuchte Luft*

11 von 50 Punkten

Kurzfrage: Kann in einem handelsüblichen Backofen eine relative Feuchte von 100 Prozent vorliegen, während Sie bei 180°C einen Kuchen backen?

In einen Luftstrom ( $\dot{m}_{L,trocken} = 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ,  $t_{L,1} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_1 = 20\%$ ) werden bei Normaldruck  $1 \frac{\text{g}}{\text{s}}$  Wasser eingespritzt. Nach der Einspritzung hat die Luft eine relative Feuchte von  $\varphi_2 = 51\%$ .

- a) Wie hoch ist die Wasserbeladung  $x_2$  nach der Einspritzung?
- b) Welche Temperatur hat die feuchte Luft nach der Einspritzung?
- c) Bestimmen Sie rechnerisch, welche Temperatur  $t_W$  und welchen Aggregatzustand das eingespritzte Wasser haben muss.

Lösungsvorschlag 2:

- a) Mit 20 Prozent rel. Feuchte und 20°C kann man aus dem h-x-Diagramm eine Wasserbeladung von  $x=3\text{g/kg}$  ablesen. Fügt man nun 1g Wasser pro 200g trockene Luft (=5g/kg) hinzu, so beträgt die Wasserbeladung danach  $x_2 = (3+5) \text{ g/kg} = 8 \text{ g/kg}$ .
- b) Mit der nun bekannten Wasserbeladung  $x_2$  und der rel. Feuchte von 51 Prozent liest man aus dem h-x-Diagramm eine Temperatur von 21°C ab.
- c) Die Summe der mit der Luft zugeführten Enthalpie ( $0,2 \text{ kg/s} * 27,735 \text{ kJ/kg}$ ) und der mit dem eingespritzten Wasser zugeführten Enthalpie  $H_w$  muss gleich der Enthalpie der Luft im Endzustand ( $0,2 \text{ kg/s} * 41,448 \text{ kJ/kg}$ ) sein. Mit 0,001 kg/s eingespritztem Wasser ergibt sich eine spezifische Enthalpie des Wassers von 2742 kJ/kg. Das entspricht dampfförmigem Wasser bei 126 °C. ( $2742\text{kJ} = 2500\text{kJ} + 1,92\text{kJ/K} * 126\text{K}$ )

Vier Eiswürfel mit einer Masse von jeweils  $m_E = 5\text{ g}$  und einer Temperatur  $t_E = -15^\circ\text{C}$  werden in einen adiabaten Becher mit 300 Gramm Wasser (flüssig) geworfen, das eine Temperatur von  $t_W = 40^\circ\text{C}$  hat. Nach 10 Minuten sind die Eiswürfel vollständig geschmolzen und das Schmelzwasser hat sich mit dem übrigen Wasser vollständig vermischt. Gehen Sie davon aus, dass weder die Eiswürfel noch das flüssige Wasser Wärme an die Umgebung ( $p_U = 1\text{ bar}$ ,  $t_U = 20^\circ\text{C}$ ) übertragen.

- Bestimmen Sie die Temperatur des Wassers nach 10 Minuten.
- Bestimmen Sie die Exergie, die insgesamt in diesem Prozess in Anergie umgewandelt wird bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Eis zu schmelzen beginnt.
- Welche Masse Eis ( $t_E = -15^\circ\text{C}$ ) hätte man dem Wasser ( $m = 300\text{ g}$ ,  $t_W = 40^\circ\text{C}$ ) hinzufügen müssen, damit sich ein Phasengleichgewicht (fest/flüssig) mit einem Eis-Massenanteil von 10 Prozent eingestellt hätte?

Lösungsvorschlag 3

a) die Masse Eis beträgt 0,02 kg. Zum Erwärmen auf  $0^\circ$  ( $c=2,1\text{ kJ/kgK}$ ) und zum Schmelzen ( $r_s = 334\text{ kJ/kg}$ ) werden somit 7,31 kJ benötigt, die das Getränk ( $c_{fl} = 4,18\text{ kJ/kgK}$ ) um 5,83K abkühlen. Danach findet einfach eine Mischung von  $0^\circ\text{C}$  kaltem und  $34,17^\circ\text{C}$  warmen Wasser (0,3kg) statt. Die Temperatur der Mischung beträgt  $32,04^\circ\text{C}$ .

b) Exergie der inneren Energie (Sonderfall isobar!):  $-w_{ex} = (h_2 - h_1) - T_u(s_2 - s_1)$ .

Für das Eis gilt beim Erwärmen bis  $0^\circ\text{C}$ :

$$H_2 - H_1 = 0,02\text{ kg} * 15\text{ K} * 2,1\text{ kJ/kgK} = 630\text{ J}$$

$$S_2 - S_1 = \ln(T_2/T_1) * m * c = 2,372\text{ J/K}$$

Abnahme an Exergie beim Erwärmen des Eises = 65,40 J

Das Getränk kühlt derweil auf  $39,50^\circ\text{C}$  ab. (Gleiches Delta H, nur umgedrehtes Vorzeichen im Vergleich zum Eis mit  $c=2,1\text{ kJ/kgK}$ : Delta T = -0,502K)

Getränk:

$$H_2 - H_1 = -630\text{ J}$$

$$S_2 - S_1 = -2,013\text{ J/K}$$

Abnahme an Exergie beim Abkühlen des Getränks: 39,76 J

Gesamtverlust an Exergie:  $65,4\text{J} + 39,76\text{J} = 105,16\text{J}$

c) Ansatz: Energie des Eises + Energie des Getränks = Energie der Mischung mit  $x=0,1$  (Eisanteil).

$$m_{Eis} = \frac{m_{fl} \frac{r_s}{T_0} + c_{fl} T_{fl,1}}{0,9r_s - c_{Eis} T_{Eis,1}} = 0,181\text{ kg}$$

Das Arbeitsmedium R290 ( $\dot{m} = 0,25 \frac{kg}{s}$ ) durchläuft in einem Kreisprozess folgende Schritte: Nach einer isobaren Wärmeabfuhr vom Zustand 1 bis zu einem Dampfgehalt von  $x = 0,05$  (Zustand 2) erfolgt eine adiabate Drosselung auf den Zustand 3 ( $t_3 = 1,7^\circ C$ ). Anschließend erfolgt eine isobare Wärmezufuhr bis das Arbeitsmedium im Zustand 4 um  $10 K$  überhitzt ist. Um Zustand 1 wieder zu erreichen, folgt eine Kompression mit einem Verdichter. Der Verdichterwirkungsgrad ist  $\eta_{SV} = 0,90$  und die Leistungsaufnahme des Verdichters beträgt  $\dot{W}_t = 18,9 kW$ . Die Umgebungstemperatur beträgt  $20^\circ C$ .

Stoffwerte für R290 (gasförmig)

spezifische Enthalpie [kJ/kg] in Abhängigkeit von Druck und Temperatur:

	274,9 K	284,9 K	333,1 K	344,8 K	351,1 K
3,6 bar	582,6	599,6	685,8	708,1	720,3
5,0 bar	576,8	594,4	682,5	705,0	717,3
6,7 bar	-	587,5	678,2	701,1	713,6
12,3 bar	-	230,1	662,4	686,9	700,2
20 bar	-	-	633,2	662,4	678,0

spezifische Entropie [kJ/kg K] in Abhängigkeit von Druck und Temperatur:

	274,9 K	284,9 K	333,1 K	344,8 K	351,1 K
3,6 bar	2,4478	2,5085	2,7879	2,8535	2,8884
5,0 bar	2,3705	2,4334	2,7188	2,7853	2,8206
6,7 bar	-	2,3611	2,6545	2,7227	2,7585
12,3 bar	-	-	2,5056	2,5780	2,6161
20 bar	-	-	2,3461	2,4334	2,4769

Stoffwerte für R290 (Naßdampfgebiet)

p [bar]	T[K]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]	s' [kJ/kgK]	s'' [kJ/kgK]
2,0	247,7	138,54	545,75	0,7659	2,4099
3,6	264,2	178,44	565,09	0,9206	2,3829
5,0	274,9	204,33	576,77	1,0156	2,3705
6,7	284,9	229,87	587,49	1,1057	2,3611
12,3	308,6	294,02	610,37	1,3181	2,3433
20,0	330,4	359,36	626,02	1,5172	2,3243
25,0	341,4	395,71	630,11	1,6219	2,3085

Lösen Sie folgende Aufgaben, die sich auf den oben beschriebenen Kreisprozess (vorangegangene Seite) beziehen:

- a) Zeichnen Sie den Prozess in ein T-s Diagramm ein!

- b) Bestimmen Sie für alle vier Eckpunkte die Temperatur und den Druck, sowie für Punkt 3 und 4 den Dampfgehalt  $x$  sofern diese Punkte im Naßdampfgebiet liegen.
- c) Zeichnen Sie die technische Verlustarbeit des Verdichters in das Diagramm ein und berechnen Sie weiterhin dessen Arbeitsverlust durch Irreversibilitäten pro Minute.
- d) Wie groß ist der vom Prozess aufgenommene Wärmestrom? Wie groß der abgegebene?
- e) Kommentieren Sie knapp, ob der beschriebene Prozess eher für einen TIEFKühlschrank oder einen normalen Kühlschrank geeignet ist; und ob dieser eher in Norddeutschland (normales Wetter - NICHT dieser Sommer) oder in Süditalien steht.

#### Lösungsvorschlag 4

a) Kaltdampfprozess.

b) Punkt 3 ist weitgehend bekannt. Im ND-Gebiet lässt sich für 274,85K lässt sich ein Druck von 5 bar ablesen.

Punkt 4 hat den gleichen Druck (isobar!) und eine Tempertur von 284,85K (10K überhitzt!). Für den nun bekannten Punkt 4 lassen sich aus der Tabelle für das Gasgebiet, die spez. Enthalpie (594 kJ/kg) und Entropie (2433,4 kJ/kgK) ablesen.

Punkt 1 hat die spez. Enthalpie von Punkt 4 PLUS die Arbeit des Verdichters bezogen auf den Massestrom des Arbeitsmediums: 670 kJ/kg. Daraus ergibt sich unter Einbeziehung des Verdichterwirkungsgrades eine spez. Enthalpie des Punktes 1\* (Endzustand einer isentropen Verdichtung) von 662,4 kJ/kg. Weiterhin ist die spez. Entropie von 1\* gleich der von Punkt 4 (2433,4 kJ/kgK). Mit  $s$  und  $h$  ist Punkt 1\* eindeutig bestimmt:  $p_1 = p_{1^*} = 20$  bar. Mit  $h_1$  und  $p_1$  ist nun auch Punkt 1 eindeutig bestimmt:  $T_1$  kann durch Interpolation zu 336,73K bestimmt werden.

von Punkt 2 ist der Dampfgehalt bekannt:  $x_2=0,05$ . Weiterhin muss  $p_2=p_1=20$ bar sein (isobar!). Das Punkt2 im ND-Gebiet liegt, folgt aus dem Druck direkt die Temperatur: 330,4K. Mithilfe von  $x_2$  lässt sich auch  $h_2$  aus  $h'$  und  $h''$  (20 bar) zu 372,7 kJ/kg bestimmen.

Die adiabate Drossel ist isenthalp. Somit ist  $h_3=h_2=372,7$  kJ/kg. Damit lässt sich aus  $h'$  und  $h''$  (5 bar)  $x_3$  zu 0,450 bestimmen.

c) Fläche unter der isobaren Verbindung von 1 und 1\*. Irr. Arbeitsverlust ist  $T_u \cdot \text{Sprod}$ . Sprod ist  $s_1-s_4$ . Wird diese spez. Entropieproduktion mit dem Massenstrom, 60s/min und  $T_u = 293,15$ K multipliziert erhält man den gesuchten Arbeitsverlust.

d) Aufgenommener Wärmestrom = Massestrom \*  $(h_4-h_3)$ .

Abgegebener Wärmestrom = Aufgenommener Wärmestrom + Leistungsaufnahme des Verdichters.

e) Die Verdampfertemperatur von 1,7°C schließt den Einsatz in einem TK aus. Es muss ein Kühlschrank sein, der wohl eher in Italien steht, da eine Temperatur im Verflüssiger von 330K= ca. 57°C eher zu einer Küchenlufttemperatur von 40°C also von 20 °C passt.