

Thermodynamik 2

Klausur

15. März 2018

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 7 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zur Vorlesung, Übung und Tutorien sowie Lehrbücher und Taschenrechner sind als Hilfsmittel zugelassen.

Geben Sie diese Aufgabenstellung bitte zusammen mit Ihren Lösungsblättern ab. Füllen Sie die Angaben zu Ihrer Person aus und versehen Sie jedes Lösungsblatt mit Ihrem Namen.

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

| Aufgabe | Maximale Punktzahl | Erreichte Punkte | Korrektor |
|---------------|--------------------|------------------|-----------|
| 1 | 30 | | |
| 2 | 28 | | |
| 3 | 22 | | |
| Zwischensumme | | | |
| Summe | | | |
| Bewertung | | | |

Aufgabe 1 (30 Punkte)

Am Lehrstuhl wird zur Kühlung von Experimenten Crushed-Eis benötigt, welches in einer Eismaschine produziert werden soll. Die Eismaschine arbeitet nach dem Prinzip der Kompressionskältemaschine. Als Kältemittel soll R143a eingesetzt werden welches folgende Zustandsänderungen durchläuft:

- 1 → 2: isobare Wärmezufuhr durch die Abwärme des Kompressormotors
- 2 → 3: adiabate Kompression des Kältemittels mit einem isentropen Wirkungsgrad von 75 %
- 3 → 4: isobare Wärmeabfuhr bis siedende Flüssigkeit vorliegt
- 4 → 5: isenthalpe Drosselung des Kältemittels auf das untere Druckniveau
- 5 → 1: isobare Wärmezufuhr bis zu zur Taulinie

Die Eismaschine soll eine Eismenge von 120 kg in 24 h produzieren. Hierzu wird normales Leitungswasser, welches bei 10 °C und 1013,5 hPa aus der Wasserleitung kommt, vollständig und ohne Unterkühlung durchgefroren. Die Abwärme wird an die Umgebungsluft in einem Gegenstromwärmeübertrager abgegeben. Das Kältemittel kondensiert 10 K über der Raumtemperatur von 20 °C. Für die Wärmeübertragung im Verdampfer ist eine minimale Temperaturdifferenz von 10 K nötig.

- a) Zeichnen Sie das Anlagenschema und stellen Sie den Prozess qualitativ in einem $\log(p),h$ -Diagramm und einem T,s -Diagramm dar. (8 P)
- b) Stellen Sie die Temperaturverläufe in beiden Wärmeübertragern in jeweils einem Diagramm für die Temperatur über der Lauflänge des Wärmeübertragers dar (für Kältemittel und Umgebungsluft bzw. Kältemittel und Wasser/Eis). Bei welchen Temperaturen findet die Verdampfung und Kondensation des Kältemittels statt? (2 P)
- c) Welcher Massenstrom an Kältemittel wird benötigt? (6 P)

Falls Sie Aufgabenteil c) nicht lösen konnten, rechnen Sie mit einem Kältemittelmassenstrom von 3,5 g/s weiter.

Die Eismaschine benötigt zum Betrieb 300 W elektrische Anschlussleistung für den Kompressor, die Steuerungselektronik und den Vortriebmotor des Eises. Von dieser elektrischen Leistung werden 30 % als Abwärmestrom vor der Kompression zugefügt (Zustandsänderung 1 → 2).

- d) Auf welche Temperatur wird das Kältemittel vor der Kompression erwärmt? (3 P)
- e) Im Betrieb darf am Kompressor eine Temperatur von 70 °C nicht überschritten werden. Ist dies bei dem vorliegenden Prozess gegeben? (4 P)
- f) Wieviel elektrische Leistung wird für die Steuerungselektronik und den Vortriebmotor des Eises benötigt? (2 P)
- g) Bestimmen Sie die Leistungszahl der Kompressionskältemaschine und die elektrische Leistungszahl der Eismaschine. (3 P)
- h) Erläutern Sie kurz, wie sich die Eisproduktion verändert, wenn bei beiden Wärmeübertragern eine minimale Temperaturdifferenz von nur noch 5 K vorliegen würde? (2 P)

Die isobare Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt 4,2 kJ/(kg K).
Die Schmelzenthalpie von Wasser bei Umgebungsdruck beträgt 333 kJ/kg.

Kritischer Punkt von R143a:

$$t_c = 72,71 \text{ °C} ; p_c = 3,761 \text{ MPa}$$

Zweiphasiger Zustand R143a:

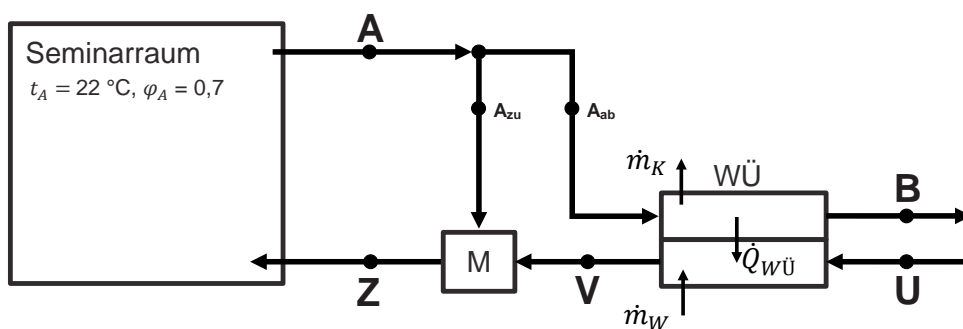
| t | p | h' | h'' | s' | s'' |
|-----|---------|--------|--------|-----------|-----------|
| °C | MPa | kJ/kg | kJ/kg | kJ/(kg K) | kJ/(kg K) |
| -15 | 0,37737 | 178,06 | 379,76 | 0,91828 | 1,6996 |
| -10 | 0,44823 | 185,27 | 382,54 | 0,94567 | 1,6953 |
| -5 | 0,52873 | 192,58 | 385,23 | 0,97290 | 1,6913 |
| 0 | 0,61967 | 200,00 | 387,81 | 1,0000 | 1,6876 |
| 25 | 1,2616 | 239,19 | 398,54 | 1,1349 | 1,6693 |
| 30 | 1,4340 | 247,56 | 400,07 | 1,1621 | 1,6652 |
| 35 | 1,6236 | 256,16 | 401,31 | 1,1895 | 1,6606 |
| 40 | 1,8314 | 265,04 | 402,19 | 1,2174 | 1,6553 |

Homogener Zustand R143a:

| t | h | s | t | h | s |
|-------------------|--------|-----------|-------------------|--------|-----------|
| °C | kJ/kg | kJ/(kg K) | °C | kJ/kg | kJ/(kg K) |
| $p = 0,37737$ MPa | | | $p = 0,44823$ MPa | | |
| -10 | 384,77 | 1,7188 | -5 | 387,70 | 1,7147 |
| -5 | 389,74 | 1,7375 | 0 | 392,80 | 1,7336 |
| 0 | 394,69 | 1,7558 | 5 | 397,88 | 1,7520 |
| 5 | 399,64 | 1,7738 | 10 | 402,94 | 1,7701 |
| 10 | 404,59 | 1,7914 | 15 | 407,99 | 1,7878 |
| 15 | 409,54 | 1,8088 | 20 | 413,05 | 1,8052 |
| 20 | 414,51 | 1,8259 | 25 | 418,12 | 1,8223 |
| 25 | 419,50 | 1,8427 | 30 | 423,20 | 1,8392 |
| 30 | 424,50 | 1,8594 | 35 | 428,30 | 1,8559 |
| $p = 0,52873$ MPa | | | $p = 0,61967$ MPa | | |
| 0 | 390,54 | 1,7110 | 5 | 393,29 | 1,7075 |
| 5 | 395,79 | 1,7300 | 10 | 398,69 | 1,7267 |
| 10 | 400,99 | 1,7486 | 15 | 404,04 | 1,7454 |
| 15 | 406,18 | 1,7667 | 20 | 409,35 | 1,7637 |
| 20 | 411,35 | 1,7845 | 25 | 414,64 | 1,7816 |
| 25 | 416,51 | 1,8020 | 30 | 419,92 | 1,7991 |
| 30 | 421,68 | 1,8192 | 35 | 425,19 | 1,8164 |
| 35 | 426,86 | 1,8361 | 40 | 430,47 | 1,8334 |
| 40 | 432,05 | 1,8528 | 45 | 435,76 | 1,8501 |
| $p = 1,2616$ MPa | | | $p = 1,4340$ MPa | | |
| 50 | 429,94 | 1,7706 | 50 | 426,52 | 1,7497 |
| 60 | 441,76 | 1,8066 | 60 | 438,80 | 1,7872 |
| 70 | 453,45 | 1,8412 | 70 | 450,82 | 1,8227 |
| 80 | 465,08 | 1,8746 | 80 | 462,72 | 1,8569 |
| 90 | 476,71 | 1,9070 | 90 | 474,56 | 1,8900 |
| $p = 1,6236$ MPa | | | $p = 1,8314$ MPa | | |
| 50 | 422,45 | 1,7276 | 50 | 417,50 | 1,7035 |
| 60 | 435,34 | 1,7669 | 60 | 431,27 | 1,7454 |
| 70 | 447,80 | 1,8038 | 70 | 444,31 | 1,7840 |
| 80 | 460,03 | 1,8389 | 80 | 456,95 | 1,8203 |
| 90 | 472,13 | 1,8727 | 90 | 469,38 | 1,8550 |

Aufgabe 2 (28 Punkte)

Im Winter soll ein Seminarraum, in dem sich 50 Personen befinden, mit einer Klimaanlage klimatisiert werden. Die Raumzuluft (Z) soll mit einem definierten Zustand in den Raum einströmen, sodass sich nach der Wärme- und Wasserdampfaufnahme die gewünschte Temperatur $t_A = 22^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchte $\varphi_A = 70\%$ einstellen. Dazu muss ein Massenstrom $\dot{m}_{tr.L,A} = 0,5 \text{ kg/s}$ trockene Luft ausgetauscht werden. Die Seminarteilnehmer geben pro Person $\dot{m}_{WD,P} = 2 \text{ g/min}$ Wasserdampf an die Raumluft ab. Damit ist ein Enthalpiestrom von $\Delta\dot{H}_{WD,P} = 85 \text{ W}$ verbunden. Zusätzlich wird pro Person durch die Kleidung ein Wärmestrom von $\dot{Q}_P = 35 \text{ W}$ an die Raumluft abgegeben. Außerdem benutzt jede Person einen Laptop, der einen Wärmestrom von $\dot{Q}_L = 50 \text{ W}$ an die Raumluft abgibt. Die Raumabluft (A) wird nach dem Verlassen des Seminarraums aufgeteilt. 70% Massenanteil der Raumabluft (A_{ab}) werden im Wärmeübertrager (WÜ) abgekühlt und im Zustand (B) in die Umgebung abgeführt, zudem fällt in diesem Prozessschritt ein Kondensatmassenstrom \dot{m}_K an. Der im Wärmeübertrager anfallende Wärmestrom $\dot{Q}_{WÜ}$ wird genutzt, um die angesaugte Frischluft (U) aus der Umgebung ($t_U = 5^\circ\text{C}$, $\varphi_U = 90\%$) auf den Zustand (V) vorzuwärmen. Dabei wird dem Frischluftstrom (U) flüssiges Wasser \dot{m}_W bei $t_W = 0^\circ\text{C}$ zugeführt. Die vorgewärmte Frischluft (V) wird in einer Mischkammer (M) mit 30% Massenanteil der Raumabluft (A_{zu}) adiabatisch vermischt und strömt anschließend im Zustand (Z) in den Seminarraum. Der gesamte Prozess ist nach außen hin adiabatisch sowie isobar ($p_{ges} = 1,01325 \text{ bar}$). Luft und Wasserdampf können als ideale Gase betrachtet werden. Verwenden Sie folgende Abkürzungen für die Kennzeichnung der Luftzustände: Raumzuluft (Z), Raumabluft (A), Umgebungsluft (U), Umgebungsluft nach Vorwärmung und Wasserzugabe (V), Raumabluft nach Abkühlung (B).



Hinweis: Die Aufgabenteile a) bis g) sind rein rechnerisch zu lösen. Aus dem beiliegenden h_{1+x},x -Diagramm abgelesene Werte dürfen nur zur Überprüfung der Rechenergebnisse genutzt werden. Für niedergeschriebene Zahlenwerte, die nicht im Zusammenhang mit einem angemessenen Rechenweg stehen, werden keine Punkte vergeben.

- a) Berechnen Sie den aus der Umgebung (U) angesaugten Massenstrom trockene Luft. (2 P)
- b) Welchen Wärmestrom \dot{Q}_{zu} und Wasserdampfstrom \dot{m}_{WD} nimmt die Luft im Seminarraum auf? (2 P)
- c) Berechnen Sie den Wassergehalt der Luft im Zustand (A) und Zustand (U). (4 P)
- d) Berechnen Sie den Wassergehalt und die Temperatur der Raumzuluft (Z), damit die gewünschten Luftbedingungen im Seminarraum erreicht werden. Hinweis: Zustandspunkt (Z) liegt im homogenen Gebiet. (5 P)
- e) Berechnen Sie den Wassergehalt und die Temperatur der Luft im Zustand (V) vor der Mischkammer. (4 P)
- f) Wie viel Gramm flüssiges Wasser muss dem angesaugten Frischluftstrom (U) im Wärmeübertrager pro Minute zugegeben werden? (2 P)
- g) Berechnen Sie den Wärmestrom $\dot{Q}_{WÜ}$ im Wärmeübertrager. (5 P)
- h) Tragen Sie alle Zustände und Zustandsänderungen der feuchten Luft in das beiliegende h_{1+x}, x -Diagramm ein (Zustand (B) muss nicht eingetragen werden). (4 P)

Stoffdaten:

Spezifische isobare Wärmekapazitäten: Trockene Luft $c_{p,L} = 1,007 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Wasserdampf $c_{p,D} = 1,86 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Flüssiges Wasser $c_{p,W} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0°C : $\Delta h_v = 2500 \text{ kJ}/\text{kg}$

Molare Massen: Luft $M_L = 28,96 \text{ kg}/\text{kmol}$;

Wasser $M_W = 18,015 \text{ kg}/\text{kmol}$

Allgemeine Gaskonstante: $R_m = 8,314472 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$

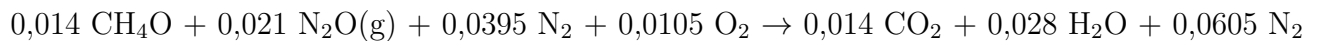
Dampfdruck von Wasser: $\ln(p/\text{mbar}) = 18,9141 - 4010,823/(t/^\circ\text{C} + 234,4623)$

Aufgabe 3 (22 Punkte)

In einem Motor wird Methanol (CH_4O) mit Luft ($\lambda = 1$) verbrannt, wobei die Luft idealisiert aus 21 mol-% Sauerstoff und 79 mol-% Stickstoff besteht.

- a) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für 0,01 mol Brennstoff auf. (3 P)
- b) Berechnen Sie die Reaktionsenthalpie im Standardzustand. (3 P)
- c) Berechnen Sie die Reaktionsenthalpie bei einer Reaktionstemperatur von $T = 1000$ K. (4 P)

Um die Leistung dieses Motors kurzfristig zu steigern, kann bei der Verbrennung ein Teil der Luft durch Lachgas (N_2O) ersetzt werden. Bei gleichem Hubraum des Motors (gleiches Volumen der zugeführten Lachgas/Luft Mischung im Vergleich zum Volumen der reinen Luft aus Aufgabenteil a)) ergibt sich folgende Reaktionsgleichung:



- d) Berechnen Sie hierfür die Reaktionsenthalpie im Standardzustand. (3 P)
- e) Berechnen Sie die Reaktionsenthalpie bei einer Reaktionstemperatur von $T = 1000$ K. (4 P)
- f) Nennen Sie zwei Gründe für die höhere Reaktionsenthalpie der Verbrennung mit dem Lachgas/Luft Gemisch. *Tipp: Betrachten Sie dazu auch die Stoffmengen.* (3 P)
- g) Mit welchem Gas würden Sie die Luft bzw. die Lachgas/Luft Mischung bei diesem Motor ersetzen, wenn noch höhere Leistungen (bzw. Reaktionsenthalpien) gefordert sind? Begründen Sie ihre Antwort. Nennen Sie einen Nachteil der sich daraus für den Motor ergibt. (2 P)

Folgende Stoffdaten gelten für beide Reaktionen. Eine Komponente vollzieht einen Phasenwechsel, wenn die Siedetemperatur (bei vorliegendem Partialdruck) der Komponente überschritten wird.

Stoffdaten:

| Stoff | $\Delta^B h_\Theta$ | c_p | Stoff | $\Delta^B h_\Theta$ | c_p |
|---------------------------|---------------------|------------|--------------------------|---------------------|------------|
| | kJ/mol | kJ/(mol K) | | kJ/mol | kJ/(mol K) |
| CH_4O (l) | -238,57 | 0,0812 | O_2 (g) | 0 | 0,0306 |
| CH_4O (g) | -200,66 | 0,0600 | CO_2 (g) | -393,5 | 0,0433 |
| N_2O (g) | 82,05 | 0,0465 | H_2O (l) | -286,0 | 0,0755 |
| N_2 (g) | 0 | 0,0301 | H_2O (g) | -242,1 | 0,0347 |

| Stoff | T_s | $\Delta^V h$ | Stoff | T_s | $\Delta^V h$ |
|-----------------------|--------|--------------|----------------------|--------|--------------|
| | K | kJ/mol | | K | kJ/mol |
| CH_4O | 327,12 | 35,912 | H_2O | 372,75 | 40,668 |