

Thermodynamik I
Klausur, 04.06.2020

Bearbeitungszeit: 180 Minuten
Umfang der Aufgabenstellung: 11 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zu Vorlesung, Übung und Tutorium 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.

Falls es Ihnen in einer Teilaufgabe **nicht möglich ist, Werte zu berechnen**, können Sie in darauffolgenden Teilaufgaben **mit angenommenen Werten** weiterrechnen.

Für Zahlenwerte, die **nicht im Zusammenhang mit einem angemessenen Rechenweg** stehen, werden **keine Punkte** vergeben.

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrekteur
1	21		
2	17		
3	21		
4	31		
Summe:			
Bewertung:			

Aufgabe 1 (21 Punkte)

In einem Diesel-Motor werden 2000 cm^3 Luft von Umgebungsdruck 1 bar und Umgebungstemperatur 298.15 K reversibel adiabat auf 50 bar komprimiert. Dieser hochverdichteten und dadurch erhitzten Luft wird Brennstoff zugeführt, der sich selbständig entzündet und bei der Verbrennung 2.5 kJ Wärme freisetzt. Das Einspritzen des Brennstoffs wird so geführt, dass sich während der Verbrennung der Druck nicht ändert.

- a) Auf welches Volumen wird die Luft komprimiert und welche Temperatur herrscht dann vor der Verbrennung im Zylinder? [2 P]
- b) Welche Temperatur und welches Volumen hat das Gas nach der Verbrennung? Welche Volumenänderungsarbeit leistet das Gas bei der isobaren Expansion? [4 P]
- c) Nach der Verbrennung findet eine reversibel adiabate Expansion auf das Ausgangsvolumen statt. Welcher Druck und welche Temperatur stellen sich ein? Welche Arbeit wird geleistet? [3 P]
- d) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen quantitativ in das p - V -Diagramm auf der nächsten Seite ein. [2 P]
- e) Wie hoch ist der thermische Wirkungsgrad des Diesel-Motors? [3 P]

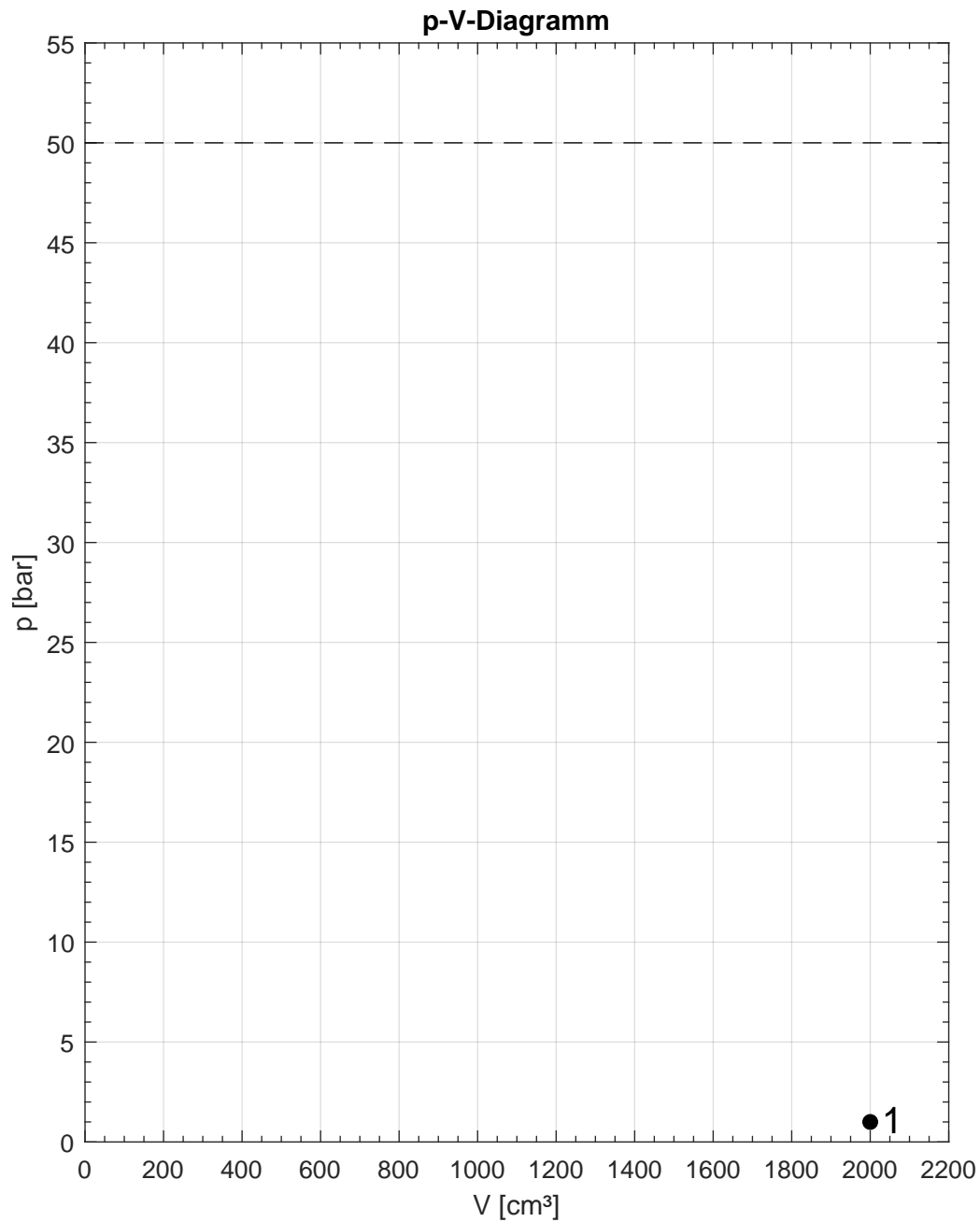
Zum Vergleich soll nun ein Otto-Motor mit dem gleichen Hubraum von 2000 cm^3 betrachtet werden. Beide Motoren beginnen im gleichen Ausgangszustand (1) und sollen nach der Verbrennung denselben Druck und dieselbe Temperatur aufweisen (3). Im Unterschied zum Diesel-Motor erfolgt die Verbrennung beim Otto-Prozess isochor ($2' \rightarrow 3$).

- f) Auf welches Volumen wird die Luft im Otto-Motor komprimiert ($1 \rightarrow 2'$)? Welcher Druck und welche Temperatur herrschen dann vor der Verbrennung im Zylinder? [3 P]
- g) Zeichnen Sie die Zustandsänderung $2' \rightarrow 3$ quantitativ in das p - V -Diagramm auf der nächsten Seite ein. [1 P]
- h) Vergleichen Sie die thermischen Wirkungsgrade beider Motoren. Welcher ist effizienter? [3 P]

Hinweis: Luft kann als ideales Gas behandelt werden. Im betrachteten Temperaturbereich beträgt die molare isobare Wärmekapazität von Luft $c_p = 29.10 \text{ J}/(\text{mol K})$, der Isentropenexponent ist $\kappa = 1.4$. Es kann vernachlässigt werden, dass sich Masse und Zusammensetzung des Gases im Zylinder durch die Verbrennung ändern.

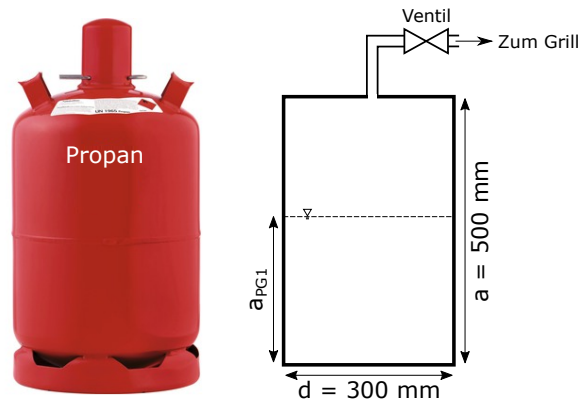
Name: _____

Matrikelnummer: _____



Aufgabe 2 (17 Punkte)

Max möchte eine große Gartenparty feiern. Neben Getränken sollen gegrillte Würstchen für das leibliche Wohl der Gäste sorgen. Der zum Grillen der Würste benötigte Gasgrill wird mit Propan betrieben. Glücklicherweise findet Max in seinem Keller, in welchem eine Umgebungstemperatur von $t_1 = 15^\circ\text{C}$ herrscht, noch eine angebrochene Propangasflasche. Mithilfe einer Waage findet er heraus, dass sich noch 3 kg Propan in der Flasche befinden. Die Gasflasche kann idealisiert als starrer Zylinder mit in nebenstehender Abbildung angegebenen Maßen betrachtet werden.



- Welche Gesamtdichte und welchen Druck hat das Propan in der Flasche, solange sie im Keller gelagert wird? (Zustand 1) [1 P]
- Auf welcher Höhe a_{PG1} befindet sich dabei die Phasengrenze in der stehend gelagerten Flasche? [3 P]

Max holt die Propangasflasche nun aus dem Keller und schließt sie an den Grill an. Das Ventil bleibt allerdings noch geschlossen. Während der weiteren Party-Vorbereitungen nimmt die Gasflasche die Umgebungstemperatur von $t_2 = 30^\circ\text{C}$ an (Zustand 2).

- Wie viel Wärme wurde dabei (Zustand 1 \rightarrow 2) in das Propan übertragen? [4 P]

Max zündet nun den Gasgrill an. Er schätzt ab: 1 g Propan hat einen Heizwert von 46.44 kJ, wobei aber nur 35 % der freigesetzten Wärme genutzt werden kann. Der Grillrost ($m = 1.6\text{ kg}$), der aus Stahl ($c_{p,\text{Stahl}} = 0.5\text{ kJ/(kg K)}$) besteht, muss einmalig von Umgebungstemperatur auf 190°C erhitzt werden.

- Wie viele Würstchen kann er grillen, bevor nur noch gesättigtes Gas in der Propangasflasche (Zustand 3) verbleibt? Um ein einziges Würstchen fertig zu grillen, werden 120 kJ Energie benötigt. [5 P]
- Zeichnen Sie die Zustandsänderungen von 1 \rightarrow 2 und von 2 \rightarrow 3 quantitativ in das T,s -Diagramm auf der nachfolgenden Seite ein und beschriften Sie dieses. [4 P]

Stoffdaten von Propan

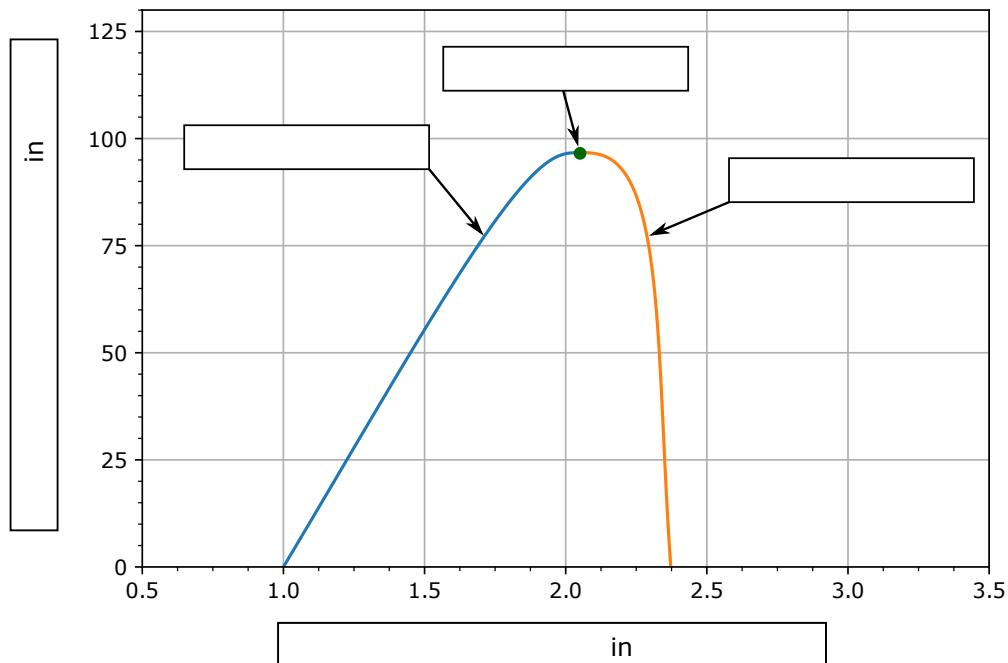
Zweiphasiger Zustand:

t °C	p bar	ρ' kg/m ³	ρ'' kg/m ³	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/(kg K)	s'' kJ/(kg K)
0	4.74	528.59	10.351	200.00	574.87	1.0000	2.3724
5	5.51	521.75	11.969	212.60	580.33	1.0452	2.3672
10	6.37	514.73	13.783	225.40	585.67	1.0902	2.3626
15	7.32	507.50	15.813	238.40	590.89	1.1351	2.3583
20	8.36	500.06	18.082	251.64	595.95	1.1799	2.3544
25	9.52	492.36	20.618	265.11	600.84	1.2247	2.3507
30	10.79	484.39	23.451	278.83	605.54	1.2695	2.3471

Zu Aufgabe 2e

Name: _____

Matrikelnummer: _____



Aufgabe 3 (21 Punkte)

In einer Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Beheizung eines Wohnhauses wird Luft bei der Umgebungstemperatur $t_{L,e} = 2^\circ\text{C}$ angesaugt und Heizungswasser auf die Vorlauftemperatur $T_{W,a}$ erwärmt. Der Wärmepumpenprozess ist in Abbildung 1 skizziert.

In dem Prozess kommt das Arbeitsmedium R32 zum Einsatz und durchläuft folgende Zustandsänderungen:

- 1 \rightarrow 2: Reversibel adiabate Verdichtung. Es wird die mechanische Leistung P zugeführt.
- 2 \rightarrow 3: Isobare Abfuhr des Wärmestroms \dot{Q}_{Heiz} (Heizleistung) bis zur Temperatur $t_3 = 35^\circ\text{C}$. Der Zustand 3 befindet sich auf der Siedelinie.
- 3 \rightarrow 4: Adiabate Drosselung, bis die Temperatur $t_4 = -15^\circ\text{C}$ erreicht wird.
- 4 \rightarrow 1: Isobare Aufnahme des Wärmestroms \dot{Q}_{zu} .

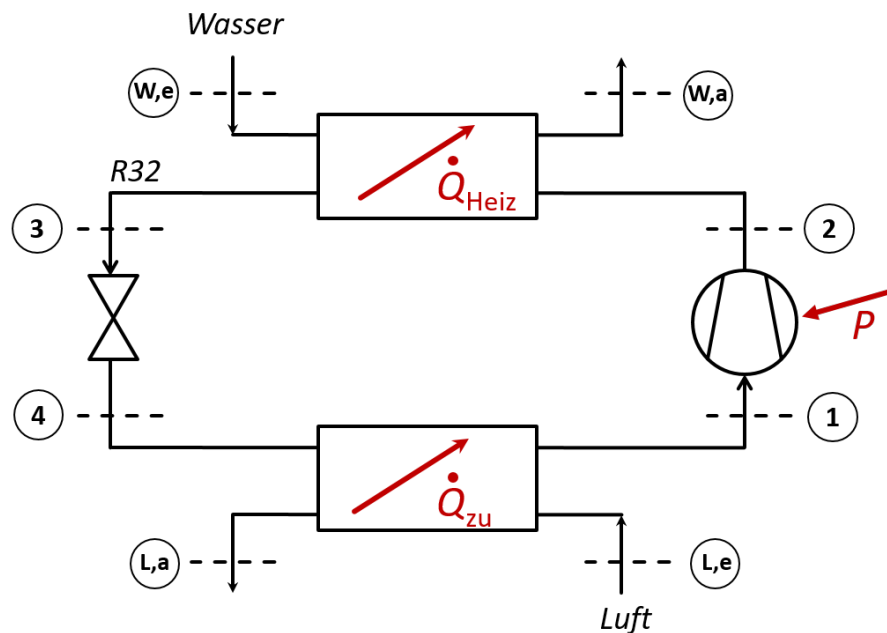


Abbildung 1: Prozess der Wärmepumpe

- a) Stellen Sie die Zustände des Arbeitsmediums soweit wie möglich qualitativ in einem $\log p, h$ -Diagramm dar. Vervollständigen Sie das Diagramm im Laufe der Aufgabe. **[2 P]**
- b) Bei welchem Druck wird das Arbeitsmedium verdampft und bei welchem kondensiert? Wie groß ist der spezifische Exergieverlust in der Drossel? **[4,5 P]**
- c) Berechnen Sie die spezifische mechanische Arbeit sowie die spezifische Heizleistung. Die Leistungszahl der Wärmepumpe ist $\epsilon_{WP} = 4.88$. Das Kältemittel ist am Austritt des Verdampfers um 8 K überhitzt. **[5 P]**

Ein Lüfter saugt die Außenluft mit einem Volumenstrom von $\dot{V}_{L,e} = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck $p_{L,e} = 1 \text{ bar}$ an und fördert sie durch den Verdampfer.

- d) Mit welcher Temperatur $t_{L,a}$ tritt die Luft aus dem Verdampfer aus, wenn die Wärmepumpe eine Heizleistung von 4 kW abgibt? **[5,5 P]**

Der Verdichter saugt pro Umdrehung 30 ml Kältemittel an. Die Drehzahl des Verdichters wird nun auf 50 Hz erhöht. Hierbei soll angenommen werden, dass alle spezifischen Zustandsgrößen unverändert bleiben.

- e) Wie groß ist jetzt die Heizleistung? Zeichnen Sie qualitativ ein Diagramm, in dem die Heizleistung über der Verdichterdrehzahl aufgetragen ist. **[4 P]**

Stoffdaten R32

Zweiphasiger Zustand:

t	p	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
°C	bar	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
35	21.898	917.05	63.343	265.30	514.48	1.2198	2.0284
30	19.275	939.62	54.776	255.32	515.72	1.1881	2.0471
25	16.896	961.01	47.339	245.60	516.51	1.1566	2.0652
20	14.746	981.38	40.856	236.12	516.90	1.1253	2.0831
15	12.808	1000.90	35.190	226.84	516.93	1.094	2.1008
10	11.069	1019.70	30.232	217.74	516.66	1.0628	2.1185
5	9.5145	1037.70	25.891	208.80	516.11	1.0314	2.1363
0	8.1310	1055.30	22.091	200.00	515.30	1.0000	2.1543
-5	6.9058	1072.20	18.769	191.33	514.26	0.96838	2.1727
-10	5.8263	1088.80	15.870	182.76	513.02	0.93652	2.1915
-15	4.8807	1104.90	13.346	174.31	511.58	0.9044	2.2109
-20	4.0575	1120.60	11.157	165.94	509.97	0.87197	2.2310
-25	3.3456	1135.90	9.2657	157.66	508.20	0.83917	2.2518

Einphasiger Zustand:

t	p	ρ	h	s
°C	bar	kg/m ³	kJ/kg	kJ/(kg K)
25.00	21.898	964.25	245.41	1.1542
30.00	21.898	941.58	255.17	1.1867
40.00	21.898	60.15	523.18	2.0565
45.00	21.898	57.51	531.11	2.0816
50.00	21.898	55.25	538.51	2.1047
87.03	21.898	44.48	585.85	2.2436
89.96	21.898	43.88	589.31	2.2532
-30.00	4.881	1151.50	149.52	0.8055
-25.00	4.881	1136.30	157.70	0.8388
-20.00	4.881	1120.80	165.96	0.8718
-10.00	4.881	12.95	517.01	2.2318
-7.00	4.881	12.73	520.16	2.2436
-5.00	4.881	12.59	522.22	2.2514
0.00	4.881	12.26	527.28	2.2701

Zustandsgrößen am kritischen Punkt: $t_c = 78.11^\circ\text{C}$; $p_c = 57.82 \text{ bar}$; $\rho_c = 424 \text{ kg/m}^3$

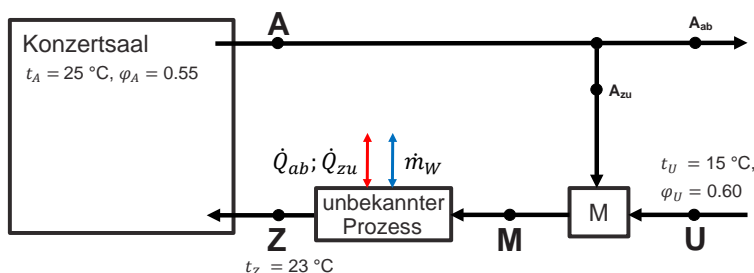
Stoffdaten Luft

Luft kann als ideales Gas mit $c_{p,L} = 1.0056 \text{ kJ/(kg K)}$ und $R_L = 287.085 \text{ J/(kg K)}$ betrachtet werden.

Aufgabe 4 (31 Punkte)

Im Frühling soll ein Konzertsaal, in dem sich 220 Personen befinden, mit einer Klimaanlage klimatisiert werden. Um die Stimmqualität der Instrumente zu gewährleisten, sollen starke Temperaturunterschiede im Saal vermieden werden. Die Raumzuluft (Z) soll daher mit $t_Z = 23^\circ\text{C}$ in den Raum einströmen, sodass sich nach der Wärme- und Wasserdampfaufnahme die gewünschte Temperatur $t_A = 25^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchte $\varphi_A = 55\%$ einstellt. Dazu muss ein Massenstrom trockene Luft $\dot{m}_{tr,L,A}$, der zunächst unbekannt ist, ausgetauscht werden. Im Konzertsaal werden pro Person $\dot{m}_{WD,P} = 2\text{ g/min}$ Wasserdampf an die Raumluft abgegeben. Zusätzlich wird pro Person ein Wärmestrom von 100 W an die Raumluft übertragen, wobei 65% davon als Enthalpiestrom $\Delta\dot{H}_{WD,P}$ des Wasserdampfs anfallen. Die Raumabluft (A) wird nach dem Verlassen des Saals aufgeteilt. 70% Massenanteil der Raumabluft (A_{ab}) werden an die Umgebung abgeführt. Die angesaugte Frischluft (U) aus der Umgebung ($t_U = 15^\circ\text{C}$, $\varphi_U = 60\%$) wird in einer Mischkammer (M) mit 30% Massenanteil der Raumabluft (A_{zu}) adiabatisch vermischt und liegt danach im Zustand (M) vor. In einem unbekannten Prozess wird die Luft vom Zustand (M) auf den definierten Zustand (Z) gebracht. In diesem Prozess muss flüssiges Wasser \dot{m}_W entweder abgeführt **oder** zugeführt werden. Zudem wird hier ein Wärmestrom \dot{Q}_{ab} ; \dot{Q}_{zu} abgeführt **und/oder** zugeführt.

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), Luft nach der Mischkammer (M).



Hinweis: Alle Aufgabenteile bis auf 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) Welchen Wärmestrom $\dot{Q}_{zu,ZA}$, Enthalpiestrom $\Delta\dot{H}_{WD,ZA}$ und Wasserdampfstrom $\dot{m}_{WD,ZA}$ nimmt die Luft im Konzertsaal auf? [2 P]
- b) Berechnen Sie den Wassergehalt der Luft im Zustand (A) und Zustand (U). [3,5 P]
- c) Berechnen Sie den Wassergehalt und die Temperatur der Luft im Zustand (M) nach der Mischkammer. [8 P]
- d) Berechnen Sie den einströmenden Massenstrom trockene Luft $\dot{m}_{tr,L,Z}$, damit die gewünschten Luftbedingungen im Konzertsaal erreicht werden. Hinweis: Zustandspunkt (Z) liegt im homogenen Gebiet. [5 P]

Sollten Sie Aufgabenteil d) nicht lösen können, rechnen Sie mit einem Massenstrom trockene Luft $\dot{m}_{tr,L,Z} = 1.7 \text{ kg/s}$ weiter.

- e) Berechnen Sie den aus der Umgebung (U) angesaugten Massenstrom trockene Luft $\dot{m}_{tr,L,U}$. [1 P]
- f) Begründen Sie, ob in dem unbekannten Prozess zwischen den Zuständen (M) und (Z) Wasser auskondensiert **oder** hinzugegeben werden muss. Wird in diesem Prozess die Mischluft (M) gekühlt **und/oder** erwärmt um den notwendigen Zustand (Z) zu erreichen? [1.5 P]
- g) Tragen Sie alle Zustände und Zustandsänderungen der feuchten Luft in das bei- liegende h_{1+x}, x -Diagramm ein. [3 P]
- h) Berechnen Sie die abgeführten **und/oder** zugeführten Wärmeströme $\dot{Q}_{ab}; \dot{Q}_{zu}$ des unbekannten Prozesses. [7 P]

Stoffdaten:

Spezifische isobare Wärmekapazitäten:

Trockene Luft $c_{p,L} = 1.007 \text{ kJ/(kg K)}$

Wasserdampf $c_{p,D} = 1.86 \text{ kJ/(kg K)}$

Flüssiges Wasser $c_{p,W} = 4.19 \text{ kJ/(kg K)}$

Molare Massen:

Luft $M_L = 28.96 \text{ kg/kmol}$

Wasser $M_W = 18.015 \text{ kg/kmol}$

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

Allgemeine Gaskonstante: $R_m = 8.314472 \text{ kJ/(kmol K)}$

Dampfdruck von Wasser: $\ln(p/\text{mbar}) = 18.9141 - 4010.823/(t/^\circ\text{C} + 234.4623)$