

# Thermodynamik Übungsskriptum

Bachelorstudiengänge Mechatronik/Umwelt und Technik  
2021/2022

Prof. (FH) Dr.-Ing. Markus Preißinger

illwerke vkw Stiftungsprofessor für Energieeffizienz

Forschungszentrum Energie

Fachhochschule Vorarlberg

1. März 2022

## **Vorwort**

Dieses Übungsskript wurde im Wintersemester 2019/2020 für die Lehrveranstaltung *Thermodynamik* im B.Sc. Studiengang Mechanik der Fachhochschule Vorarlberg erstellt und enthält 18 Übungen, die teilweise als Hausübungen zu bearbeiten sind, teilweise in der Vorlesung gerechnet werden. Die Abgabe der Hausübungen sowie Ihr Peer-Feedback machen als Prüfungsteil 10 Prozent der Gesamtnote aus.

Eine Weitergabe des Skriptes an Dritte ist hiermit ausdrücklich untersagt.

*Prof. (FH) Dr.-Ing. Markus Preißinger*

Dornbirn, am 28.09.2021

# Übung 1

## Aufgabe 1

Sie wollen die Eigenschaften des Wassers in Ihrem Wasserkocher thermodynamisch beschreiben. Nennen Sie zwei intensive und zwei extensive Zustandsgrößen, die Sie hierfür verwenden können. Wie viele Zustandsgrößen benötigen Sie mindestens, damit Sie das Wasser thermodynamisch vollständig charakterisieren können?

## Aufgabe 2

Handelt es sich bei den folgenden drei Beispielen um ein offenes, geschlossenes oder isoliertes System? Begründen Sie Ihre Antwort.

- a) das menschliche Herz
- b) ein Autoreifen
- c) eine Sauna

## Aufgabe 3

In einem Raum befindet sich Luft mit einer spezifische Gaskonstante von  $R_L = 287,058 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , einer Temperatur  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck  $p = 1 \text{ bar}$ . Die Luft kann als ideales Gas angesehen werden.

- a) Welche Luftmasse ist in einem Volumen von  $V = 1 \text{ m}^3$  enthalten?
- b) Wie groß ist die Dichte  $\rho$  und das spezifische Volumen  $v$  der Luft?

## Übung 2

### Aufgabe 1

In einem geschlossenen System befindet sich Luft ( $R_L = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $c_v = 0,717 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ). Die Luft vom Zustand 1 ( $p_1 = 2 \text{ bar}$  und  $T_1 = 300 \text{ K}$ ) wird auf den Zustand 2 ( $p_2 = 2 \text{ bar}$  und  $T_2 = 450 \text{ K}$ ) gebracht.

- a) Zeichnen Sie die Zustandsänderung in ein  $p, V$ -Diagramm ein.
- b) Bestimmen Sie die zugeführte spezifische Wärmemenge  $q_{12}$ .
- c) Bestimmen Sie die spezifische Volumenänderungsarbeit  $w_{12}^V$ .
- d) Wäre es auch möglich, die Temperatur von Zustand 2 direkt aus Zustand 1 mittels isochorer Zustandsänderung zu erreichen? Zeichnen Sie - falls möglich - diese Zustandsänderung in das  $p, v$ -Diagramm ein.
- e) Sie wollen bei der Zustandsänderung von Zustand 1 zu 2 jetzt die Temperatur statt des Drucks konstant halten. Zeichnen Sie auch diese Zustandsänderung in das  $p, V$ -Diagramm ein. Ist die Volumenänderungsarbeit jetzt höher oder geringer als in Teilaufgabe c)?

## Übung 3

### Aufgabe 1

Eine Wärmekraftmaschine wird mit dem Arbeitsmedium Wasserstoff nach dem Stirling-Prozess betrieben. In einem geschlossenen System werden folgende Zustandsänderungen durchlaufen:

- 1 → 2: isotherme Kompression von  $p_1=1$  bar,  $T_1=300$  K auf  $p_2=10$  bar
- 2 → 3: isochore Wärmezufuhr auf  $T_3=750$  K
- 3 → 4: isotherme Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

Durch einen internen thermischen Energiespeicher kann die freiwerdende Wärmemenge  $q_{41}$  für die Wärmezufuhr im Schritt 2 → 3 genutzt werden, d.h. es gilt  $q_{41} = -q_{23}$ . Wasserstoff kann als ideales Gas mit einer Gaskonstante von  $R_{H_2}=4,157$  kJ/kgK betrachtet werden. Alle Zustandsänderungen verlaufen reibungsfrei.

- a) Stellen Sie die Zustandsänderungen in einem  $p, v$ -Diagramm dar.
- b) Berechnen Sie die Zustandsgrößen  $p$ ,  $v$  und  $T$  der Eckpunkte.
- c) In welchem Prozessschritt muss von außen Wärme zugeführt werden? Berechnen Sie diese spezifische Wärmemenge.
- d) Wie groß sind die spezifischen Arbeiten bei der Kompression bzw. Expansion?
- e) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ ?

# Übung 4

## Aufgabe 1

Zur Beurteilung motorischer Prozesse sollen drei verschiedene, rechtslaufende Kreisprozesse betrachtet werden. Die Zustandsänderungen verlaufen reibungsfrei. Luft kann bei den Berechnungen als ideales Gas angesehen werden (es gilt:  $c_v=717 \text{ J/kgK}$ ,  $R_L=287 \text{ J/kgK}$ ).

Im Folgenden sollen der Otto-Prozess, der Diesel-Prozess und der Carnot-Prozess untereinander verglichen werden. Die Prozesse laufen wie folgt ab:

### Otto-Prozess

- 1 → 2: isentrope Kompression
- 2 → 3: isochore Wärmezufuhr
- 3 → 4: isentrope Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

### Diesel-Prozess

- 1 → 2: isentrope Kompression
- 2 → 3: isobare Wärmezufuhr
- 3 → 4: isentrope Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

### Carnot-Prozess

- 1 → 2: isotherme Kompression
- 2 → 3: isentrope Kompression
- 3 → 4: isotherme Expansion
- 4 → 1: isentrope Expansion

Um einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen, werden die Prozesse mit gemeinsamen Eckdaten hinterlegt:

- maximales Volumen:  $V_{max}=0,5 \text{ l}$
- maximaler Druck:  $p_{max}=60 \text{ bar}$
- maximale Temperatur:  $T_{max}=2400 \text{ K}$
- minimaler Druck:  $p_{min}=1 \text{ bar}$  für Otto, Diesel;  $p_{min}=0,02 \text{ bar}$  für Carnot
- minimale Temperatur:  $T_{min}=300 \text{ K}$

Lösen Sie im folgenden für den **Carnot und Dieselprozess** folgenden Aufgaben:

- a) Stellen Sie den Prozess in einem  $p, V$ -Diagramm dar.
- b) Bestimmen Sie die Zustandsgrößen  $p$ ,  $V$  und  $T$  der Eckpunkte.
- c) Bestimmen Sie die zu- und abgeführten Wärmemengen.
- d) Bestimmen Sie die während eines Durchlaufs geleistete Arbeit.
- e) Bestimmen Sie den thermischen Wirkungsgrad.

## Übung 5

### Aufgabe 1

Ein wärmeisolierter Behälter mit einem Volumen von  $V = 0,5\text{m}^3$  ist im Ausgangszustand mit Luft gefüllt ( $p_1=1\text{bar}$ ,  $T_1=300\text{K}$ ). Über ein adiabates Drosselventil strömt Druckluft mit einem Druck von  $7,5\text{bar}$  und einer Temperatur von  $300\text{K}$  bis zum Druckausgleich in den Behälter ein. Luft kann als ideales Gas angesehen werden ( $c_v=717\text{J/kgK}$ ,  $R_L=287\text{J/kgK}$ ). Die Änderungen äußerer Energie können vernachlässigt werden.

- a) Welche Masse der Luft befindet sich im Ausgangszustand im Behälter?
- b) Welche Temperatur stellt sich nach der Befüllung im Behälter ein?

### Aufgabe 2

In einem wärmeisolierten, starren Behälter befindet sich durch eine Wand voneinander getrennt Luft ( $c_v=717\text{J/kgK}$ ,  $R_L=287\text{J/kgK}$ ) mit unterschiedlichen Drücken. In der Kammer A mit einem Volumen von  $V_A=1\text{m}^3$  beträgt der Druck  $1\text{bar}$  und die Temperatur  $300\text{K}$ . In der Kammer B mit einem Volumen von  $V_B=0,1\text{m}^3$  beträgt der Druck bei gleicher Temperatur  $10\text{bar}$ .

- a) Welcher Druck stellt sich ein, nachdem die Trennwand entfernt wurde?
- b) Wie groß ist die Entropieänderung bei dem beschriebenen Druckausgleich?

## Übung 6

### Aufgabe 1

Zu Beginn ist ein wärmeisolierter Behälter mit einem Volumen von  $V=50\text{ l}$  evakuiert. Durch das Öffnen eines adiabaten Drosselventils strömt Umgebungsluft ( $p_u=1\text{ bar}$ ,  $T_u=300\text{ K}$ ) in den Behälter bis zum Druckausgleich ein. Luft kann als ideales Gas angesehen werden ( $c_v=717\text{ J/kgK}$ ,  $R_L=287\text{ J/kgK}$ ). Die Änderungen äußerer Energie können vernachlässigt werden.

- a) Welche Temperatur stellt sich nach der Befüllung ein?
- b) Welche Masse ist nach der Befüllung im Behälter enthalten?

### Aufgabe 2

In einem wärmeisolierten und starren Behälter befinden sich durch eine Wand voneinander getrennt zwei Ideale Gase: Sauerstoff ( $c_{p,O_2}=0,91\text{ kJ/kgK}$ ,  $R_{O_2}=0,26\text{ kJ/kgK}$ ) mit einem Volumen von  $0,21\text{ m}^3$  und Stickstoff ( $c_{p,N_2}=1,04\text{ kJ/kgK}$ ,  $R_{N_2}=0,297\text{ kJ/kgK}$ ) mit einem Volumen von  $0,79\text{ m}^3$ . Die Temperatur im Behälter beträgt  $300\text{ K}$ , der Druck  $1\text{ bar}$ .

- a) Welche Massen des Sauerstoffs und des Stickstoffs sind in den Behältern?
- b) Welche Drücke nehmen Sauerstoff und Stickstoff ein, nachdem die Trennwand entfernt wurde?
- c) Wie groß ist die Entropieänderung bei dem Mischungsprozess?



# Übung 7

## Aufgabe 1

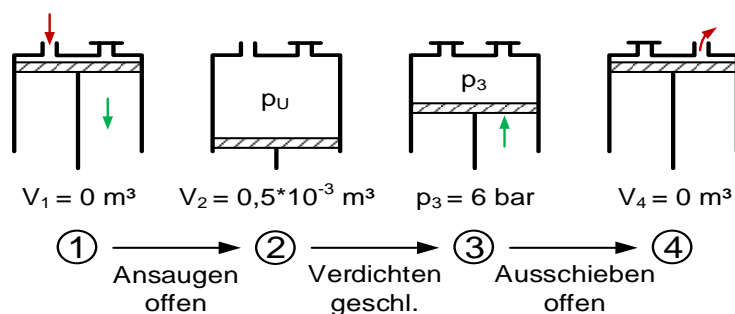
Ein technischer Luftverdichter arbeitet nach dem Prinzip eines adiabaten Kolbenverdichters wie folgt:

1 → 2: Ansaugen: Der Kolben steht ganz oben ( $V_1=0\text{ m}^3$ ). Luft wird bei konstantem Druck  $p_u=1\text{ bar}$  bis zu dem Volumen  $V_2=0,5\text{ Liter}$  angesaugt. Ventil A ist geöffnet, Ventil B geschlossen.

2 → 3: Verdichten: Das Ventil A wird geschlossen und es erfolgt eine isentrope Verdichtung auf  $p_3=6\text{ bar}$ .

3 → 4: Ausschieben: Das Ventil B wird geöffnet und die Luft wird bei konstantem Druck vollständig ausgeschoben.

Die Luft soll als ideales Gas angesehen werden ( $c_v=717\text{ J/kgK}$ ,  $R_L=0,287\text{ kJ/kgK}$ ). Die Umgebungstemperatur beträgt  $T_U=300\text{ K}$ . Die Bewegungen des Kolbens sind reibungsfrei. Die Änderungen äußerer Energien können vernachlässigt werden.



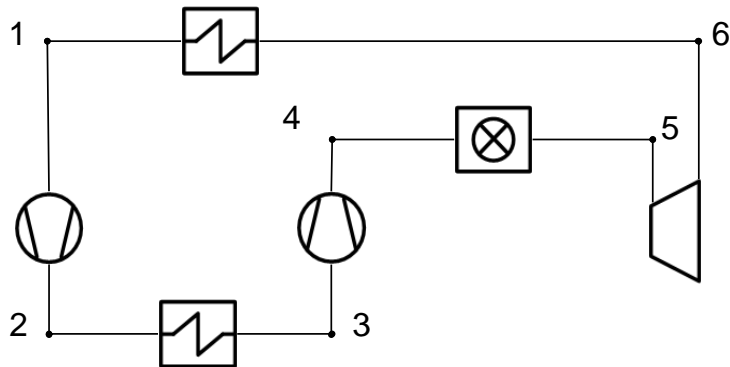
- a) Stellen Sie den Prozess in einem  $p, V$ -Diagramm dar.
- b) Welche Temperatur  $T_2$  stellt sich ein und welche Masse  $m_e$  wird angesaugt?
- c) Wie groß ist das Volumen  $V_3$  und die Temperatur  $T_3$  nach der Verdichtung?
- d) Wie groß sind die Arbeiten in den einzelnen Prozessschritten?
- e) Wie groß ist die gesamte Arbeit des Verdichtungsprozesses?
- f) Welche Leistung ist erforderlich, um stündlich 100 kg Luft zu verdichten?

## Übung 8

### Aufgabe 1

- 1 → 2: isentrope Kompression von  $p_1=20$  bar,  $T_1=300$  K auf  $p_2=40$  bar
- 2 → 3: isobare Wärmeabfuhr im Zwischenkühler auf  $T_3=300$  K
- 3 → 4: isentrope Kompression im zweiten Kompressor auf  $p_4=65$  bar
- 4 → 5: isobare Wärmezufuhr im Erhitzer auf  $T_5=1150$  K
- 5 → 6: isentrope Expansion in der Turbine auf  $p_6=20$  bar
- 6 → 1: isobare Wärmeabfuhr im Kühler auf  $T_1=300$  K

Helium soll als ideales Gas angesehen werden ( $c_p=5,18$  kJ/kgK,  $\kappa=1,66$ ). Die Änderungen äußerer Energien können vernachlässigt werden.



- a) Stellen Sie den Prozess in einem  $p, V$ -Diagramm und in einem  $T, s$ -Diagramm dar.
- b) Bestimmen Sie die Zustandsgrößen in den Punkten 1 bis 6.
- c) Welche spezifischen Wärmemengen werden in den Kühlern und im Erhitzer übertragen?
- d) Welche spezifischen Arbeiten benötigen die Verdichter?
- e) Welche spezifische Arbeit gibt die Turbine ab?
- f) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Kreisprozesses?

## Übung 9

### Aufgabe 1

Angenommen die Turbine in Übung 8 wäre nicht isentrop sondern polytrop mit einem Polytropenkoeffizient  $n=1,5$ .

- a) Ist die sich nun einstellende Temperatur  $T_6$  nach der Turbine geringer oder höher als im isentropen Fall?
- b) Bestimmen Sie die neue Temperatur  $T_6$ .
- c) Zeichnen Sie die Zustandsänderung von 5 nach 6 in ein  $T, s$ -Diagramm ein.
- d) Bestimmen Sie die sich ergebende irreversible Reibungsarbeit in der Turbine.
- e) Zeichnen Sie diese Reibungsarbeit in das Diagramm aus Teilaufgabe c) ein.

# Übung 10

## Aufgabe 1

In einem senkrechten Zylinder befindet sich 1 kg Wasser vom Zustand 1 mit einer Temperatur von  $T_1 = 20 \text{ °C}$  und einem Druck von  $p_1 = 2 \text{ bar}$ . Das flüssige Wasser ist inkompressibel und hat eine Wärmekapazität von  $c_F = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ . Der Wasserdampf kann als ideales Gas angesehen werden ( $c_{p,Wd} = 1,86 \text{ kJ/kgK}$ ;  $R_{Wd} = 0,461 \text{ kJ/kgK}$ ). Weitere Zustandsgrößen befinden sich in folgender Tabelle:

T	p	h'	h''	r
°C	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
120,23	2,0	504,7	2706,3	2201,6

Das Wasser durchläuft folgende Zustandsänderungen:

- 1 → ' : Wärmezufuhr bis zum Siedepunkt
- ' → 2: weitere Wärmezufuhr bis zu einem Dampfgehalt von  $x_2 = 0,564$
- 2 → " : weitere Wärmezufuhr bis zur vollständigen Verdampfung des Wassers (Taulinie)
- " → 3: weitere Wärmezufuhr bis zu einer Temperatur von  $T_3 = 220 \text{ °C}$

- a) Welche Wärmemenge wird bei der Zustandsänderung von 1 nach ' zugeführt?
- b) Welche Wärmemenge wird bei der Zustandsänderung von ' nach 2 zugeführt?
- c) Welche Wärmemenge wird bei der Zustandsänderung von 2 nach " zugeführt?
- d) Welche Wärmemenge wird bei der Zustandsänderung von " nach 3 zugeführt?
- e) Stellen Sie die Zustandsänderungen in einem  $T, s$ -Diagramm dar.

# Übung 11

## Aufgabe 1

Ein einfacher Dampfkraftprozess wird durch folgende Zustandsänderungen beschrieben:

1 → 2: Ein Dampfmassenstrom von 80 kg/s an überhitztem Dampf mit einer Temperatur von  $T_1 = 500 \text{ °C}$  und einem Druck von  $p_1=120 \text{ bar}$  wird in einer Turbine auf den Kondensationsdruck  $p_2=0,1 \text{ bar}$  entspannt. Der Dampfgehalt beträgt  $x_2=0,85$ .

2 → 3: Im Kondensator kondensiert der Dampf isobar bis zum Siedezustand  $x=0$ .

3 → 4: Eine reibungsfrei arbeitende Speisewasserpumpe erhöht den Druck auf  $p_4=120 \text{ bar}$ .

4 → 1: Durch isobare Wärmezufuhr im Dampferzeuger wird wieder der überhitzte Dampf vom Zustand 1 erreicht.

Die Dampfturbine und die Speisewasserpumpe sind adiabat. Die Stoffdaten für Wasserdampf können der beiliegenden Tabelle entnommen werden. Das flüssige Wasser ist inkompressibel ( $v=0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ ).

T	p	h'	h''	s'	s''	r
°C	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kgK	kJ/kg
45,83	0,1	191,83	2584,4	0,6493	8,1511	2392,9
324,65	120	1491,8	2689,2	3,4972	5,5002	1197,4

T	p	h	s
°C	bar	kJ/kg	kJ/kgK
500	120	3349,6	6,496

- Stellen Sie die Zustandsänderungen qualitativ in einem  $T, s$ -Diagramm dar.
- Wie groß sind die Leistungen der Turbine und der Speisewasserpumpe?
- Welche Wärmeleistung muss im Dampferzeuger zugeführt werden?
- Welche Wärmeleistung wird im Kondensator an die Umgebung abgeführt?
- Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Dampfkraftprozesses?

# Übung 12

## Aufgabe 1

Die heißen Abgase einer Gasturbine werden in einem Abhitzekessel (AHK) zur Erzeugung von überhitztem Dampf für einen Dampfkraftprozess genutzt (siehe Anlagenskizze). Die Abgase haben einen Massenstrom von  $\dot{m}_{AG}=600$  kg/s und eine Temperatur von  $T_{AG, \text{ein}} = 510$  °C. Das Abgas verlässt den Abhitzekessel mit einer Temperatur von  $T_{AG, \text{aus}} = 125$  °C. Das Abgas kann als ideales Gas mit einer konstanten Wärmekapazität von  $c_{p, AG}=1,1$  kJ/(kgK) angesehen werden.

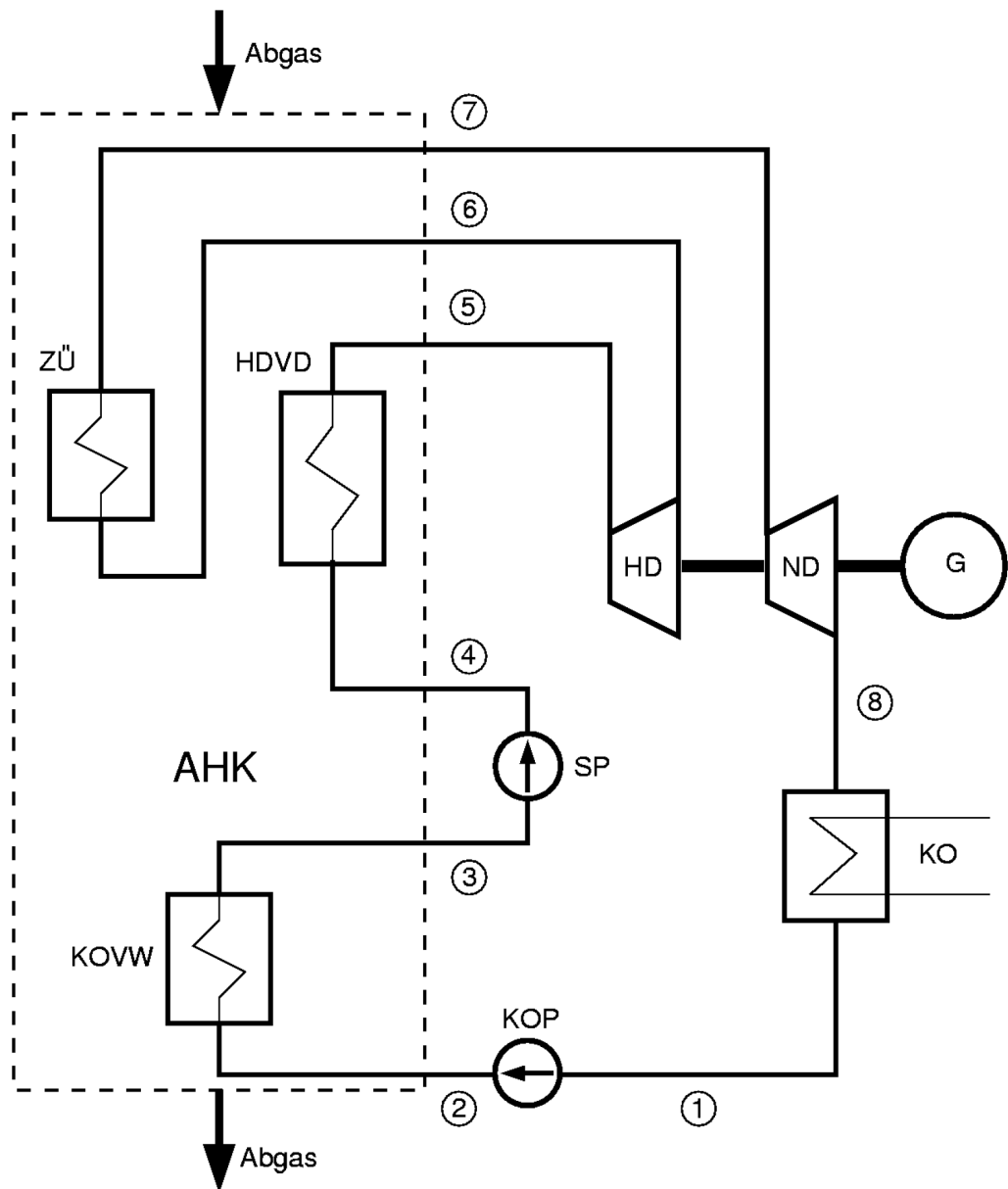
Eine Kondensatpumpe (KOP) erhöht den Druck des im Kondensator (KO) isobar kondensierten Wassers ( $x_1=0$ ,  $p_1=0,1$  bar) reibungsfrei auf  $p_2=10$  bar. Anschließend wird das Wasser im Kondensatvorwärmer (KOVW) bis zum Siedezustand ( $x_3=0$ ) isobar erwärmt. Nach der reibungsfrei arbeitenden Speisewasserpumpe (SP) stellt sich ein Druck von  $p_4=100$  bar ein. Im isobaren Hochdruckverdampfer (HDVD) wird überhitzter Dampf mit einer Temperatur von  $T_5 = 500$  °C erzeugt. In der Hochdruckturbine (HD) expandiert der Dampf auf einen Druck von  $p_6=10$  bar, wobei sich eine Temperatur von  $T_6 = 225$  °C einstellt. Durch eine isobare Zwischenüberhitzung (ZÜ) wird wieder die Temperatur von  $T_7 = 500$  °C erreicht. In der Niederdruckturbine (ND) entspannt der Dampf auf den Kondensatordruck von  $p_8=0,1$  bar, wobei ein Nassdampfgehalt von  $x_8=0,98$  entsteht.

Die Turbinen (HD; ND) und die Pumpen (KOP; SP) sind adiabat. Das flüssige Wasser ist inkompressibel ( $v=0,001$  m<sup>3</sup>/kg). Änderungen äußerer Energien sind vernachlässigbar.

Die Enthalpien des überhitzten Dampfes der Zustände 5, 6 und 7 betragen  $h_5=3375$  kJ/kg,  $h_6=2887$  kJ/kg und  $h_7=3479$  kJ/kg. Zustandsgrößen von siedendem Wasser und trocken gesättigtem Dampf sind:

T	p	h'	h''
°C	bar	kJ/kg	kJ/kg
45,3	0,1	192	2584
179,9	10	763	2777

- Stellen Sie den Prozess qualitativ in einem  $T, s$ - und  $h, s$ -Diagramm dar.
- Wie groß ist die Wärmeleistung des Abhitzekessels  $\dot{Q}_{AHK}$ .
- Wie groß ist der erzeugte Dampfmassenstrom  $\dot{m}_D$ ?
- Wie groß sind die Leistungen der Turbinen?
- Welche Leistungen haben die Pumpen?
- Welche Wärmeleistung wird im Kondensator abgegeben?
- Welchen thermischen Wirkungsgrad hat die Gesamtanlage?
- Welche Temperatur  $T_{AG, KOVW}$  hat das Abgas vor dem Kondensatvorwärmer?





## Übung 13

### Aufgabe 1

Ein Dampfkraftprozess soll mit einer Speiswasservorwärmung nachgerüstet werden, um den thermischen Wirkungsgrad zu verbessern.

Zunächst wird lediglich die alte Verschaltungsvariante OHNE Speiswasservorwärmung (Anhang, Bild links) betrachtet.

In der Turbine (T) wird überhitzter Wasserdampf mit einer Temperatur von  $T_1 = 400\text{ °C}$  und einem Druck von  $p_1 = 50\text{ bar}$  auf  $p_2 = 0,1\text{ bar}$  entspannt. Der Dampfgehalt beträgt  $x_2 = 0,95$ . Im Kondensator (K) kondensiert der Dampf isobar bis zum Siedezustand ( $x_3 = 0$ ). Die Speiswasserpumpe (P1) erhöht den Wasserdruck auf  $p_4 = 50\text{ bar}$  ( $h_4 = 203,5\text{ kJ/kg}$ ). Abschließend erfolgt eine isobare Wärmezufuhr im Dampferzeuger (DE).

Die Turbine (T) und die Speiswasserpumpe (P1) sind adiabat. Änderungen äußerer Energien sind zu vernachlässigen. Zustandsgrößen von siedendem Wasser und trocken gesättigtem sowie überhitztem Dampf sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

- Stellen Sie den Dampfkraftprozess OHNE Speiswasserpumpe (Zustandspunkte 1-4) qualitativ in einem  $T, s$ -Diagramm dar.
- Ermitteln Sie die spezifische Enthalpie  $h_2$  im Zustand 2.
- Bestimmen Sie die spezifische Arbeit der Speiswasserpumpe (P1) und der Turbine (T).
- Welche spezifische Wärmemenge wird im Dampferzeuger (DE) zugeführt?
- Welche spezifische Wärmemenge wird im Kondensator (K) abgeführt?
- Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Dampfkraftprozesses?

Jetzt wird die Aufrüstung MIT Speiswasservorwärmung (Anhang, Bild rechts) betrachtet. Für die Speiswasservorwärmung wird ein Teilmassenstrom von  $\dot{m}_{7^*} = 0,05\text{ kg/s}$  an überhitztem Wasserdampf bei einem Druck von  $p_{7^*} = 3\text{ bar}$  und einer Temperatur  $T_{7^*} = 160\text{ °C}$  aus der Turbine (T) entnommen. Der Teilstrom  $7^*$  wird im Vorwärmer (VW) isobar und vollständig kondensiert und wärmt damit den Strom 4 ( $\dot{m}_4 = 1,4\text{ kg/s}$ ) isobar auf eine Temperatur von  $T_{5^*} = 66,6\text{ °C}$  vor. Die Speiswasserpumpe (P2) erhöht den Wasserdruck auf  $p_{9^*} = 50\text{ bar}$  ( $h_{9^*} = 570,5\text{ kJ/kg}$ ). Die beiden Teilströme  $9^*$  und  $5^*$  werden danach im Mischer (M) zusammengeführt.

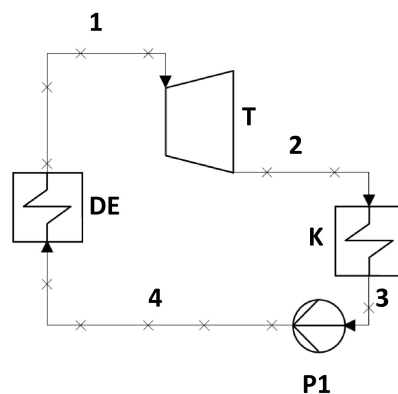
Die Speiswasserpumpe (P2) und der Mischer (M) sind adiabat. Änderungen äußerer Energien sind zu vernachlässigen. Zustandsgrößen von siedendem Wasser und trocken gesättigtem sowie überhitztem Dampf sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen.

- Zeichnen Sie die Zustandspunkte  $7^*$ ,  $8^*$  und  $9^*$  in das  $T, s$ -Diagramm aus Aufgabe a) ein.
- Bestimmen Sie die Leistung der Speiswasserpumpen (P1) und (P2) sowie der Turbine (T)

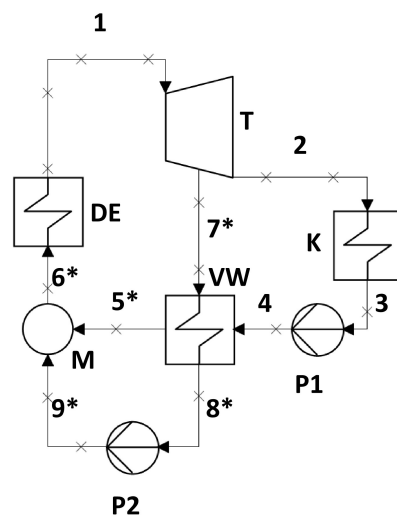
- i) Bestimmen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Prozesses mit Speisewasservorwärmung.

### Anhang zu Aufgabe 1

Alte Verschaltung **ohne**  
Speisewasservorwärmung



Neue Verschaltung **mit**  
Speisewasservorwärmung



#### Stoffwerte

Stoffwerte von siedendem Wasser und trocken gesättigtem Wasserdampf

$T$ °C	$p$ bar	$h'$ kJ/kg	$h''$ kJ/kg	$s'$ kJ/(kg·K)	$s''$ kJ/(kg·K)
45,81	0,1	191,81	2583,89	0,6492	8,1489
133,53	3,0	561,46	2724,89	1,6718	6,9916
263,94	50,0	1154,60	2794,20	2,9210	5,9737

Stoffwerte von flüssigem Wasser und überhitztem Wasserdampf

$T$ °C	$p$ bar	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/(kg·K)
66,6	50,0	282,83	0,9103
160,0	3,0	2782,60	7,1291
400,0	50,0	3196,70	6,6483

# Übung 14

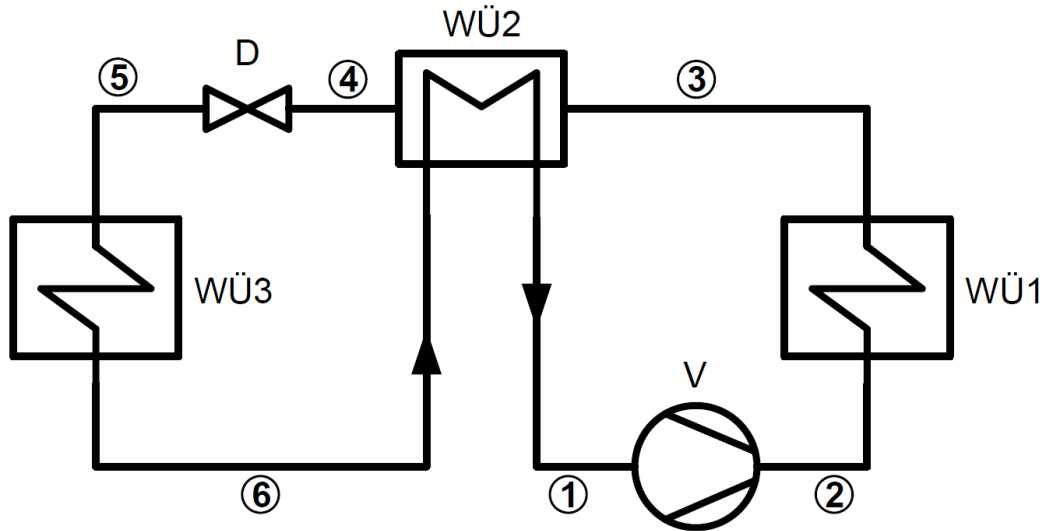
## Aufgabe 1

In einem Wärmepumpenprozess (siehe Anlagenskizze) wird nasser Ammoniak-Dampf in einem Verdichter (V) reibungsfrei verdichtet, so dass im Zustand 2 trocken gesättigter Dampf vorliegt ( $T_2 = 45\text{ °C}$ ,  $x_2 = 1$ ). Durch isobare Wärmeabgabe im Wärmeübertrager (WÜ1) wird der Ammoniak gerade vollständig kondensiert ( $x_3 = 0$ ) und anschließend im Wärmeübertrager (WÜ2) weiter auf den Zustand 4 isobar abgekühlt. Nach der Drossel (D) liegt der Ammoniak im Zustand 5 als Nassdampf bei einer Temperatur von  $T_5 = 0\text{ °C}$  vor. Durch isobare Wärmezufuhr in den Wärmeübertragern (WÜ3 und WÜ2) wird der Ammoniak teilweise verdampft. Die Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager (WÜ2) zwischen dem Zustand 4 und dem Zustand 6 beträgt  $T_4 - T_6 = 10\text{ °C}$ . Der Verdichter (V), der Wärmeübertrager (WÜ2) und die Drossel (D) sind adiabat. Die Änderungen äußerer Energien sind vernachlässigbar. Die Umgebungstemperatur beträgt  $T_U = 5\text{ °C}$ .

Flüssiges Ammoniak kann als inkompressible Flüssigkeit mit konstanter Wärmekapazität ( $c_{NH_3} = 4,75\text{ kJ/(kgK)}$ ) angesehen werden. Zustandsgrößen von siedendem Ammoniak und trocken gesättigtem Dampf sind:

T	p	h'	h''	s'	s''
°C	bar	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kgK
0	4,29	200	1462	1,000	5,621
45	17,8	416	1491	1,722	5,102

- Stellen Sie den Prozess qualitativ in einem  $h, s$ -Diagramm dar.
- Bestimmen Sie den Dampfgehalt  $x_1$ .
- Bestimmen Sie die spezifische Verdichterarbeit  $w_{12}^t$ .
- Welche spezifische Wärmemenge  $q_{23}$  wird im Wärmeübertrager WÜ1 abgegeben?
- Welche spezifische Wärmemenge  $q_{34}$  wird im Wärmeübertrager WÜ2 abgegeben?
- Bestimmen Sie den Dampfgehalt  $x_5$  und  $x_6$ .
- Welche spezifische Wärmemenge  $q_{56}$  wird im Wärmeübertrager WÜ3 zugeführt?
- Bestimmen Sie die Leistungskennziffer des Wärmepumpenprozesses.
- Wie groß sind die irreversiblen spezifischen Entropieänderungen im Wärmeübertrager WÜ3 und in der Drossel? Hinweis: Die Wärmezufuhr in den Wärmeübertrager WÜ3 erfolgt aus der Umgebung.



## Aufgabe 2

Die Frage aller Fragen in der Klausur: Wie komme ich nur auf die fehlende Enthalpie? Die Antwort ist ganz einfach: eine der folgenden 11 Möglichkeiten funktioniert:

- Fließtext der Aufgabenstellung
- trocken gesättigter Dampf,  $x = 1$ ,  $h''$  aus der Tabelle
- siedende Flüssigkeit,  $x = 0$ ,  $h'$  aus der Tabelle
- unterkühlte Flüssigkeit, Wert aus der Tabelle bei  $p, T$  ablesen
- überhitzter Dampf, Wert aus der Tabelle bei  $p, T$  ablesen
- aus bekanntem Dampfgehalt  $x_i = \frac{h_i - h'}{h'' - h'}$
- aus der Formel für ideale Flüssigkeiten  $\Delta h = c_F \cdot \Delta T$
- aus der Formel für ideale Gase  $\Delta h = c_p \cdot \Delta T$
- aus adiabater Drossel, isenthalp,  $h_{aus} = h_{ein}$
- aus nach außen adiabatem Wärmeübertrager,  $q_{ij} = -q_{kl}$
- aus gegebener Leistung/Arbeit des Bauteils (Turbine, Verdichter, Wärmeübertrager), insbesondere über den Ansatz der technischen Arbeit über inkompressible Fluide

## Übung 15

### Aufgabe 1

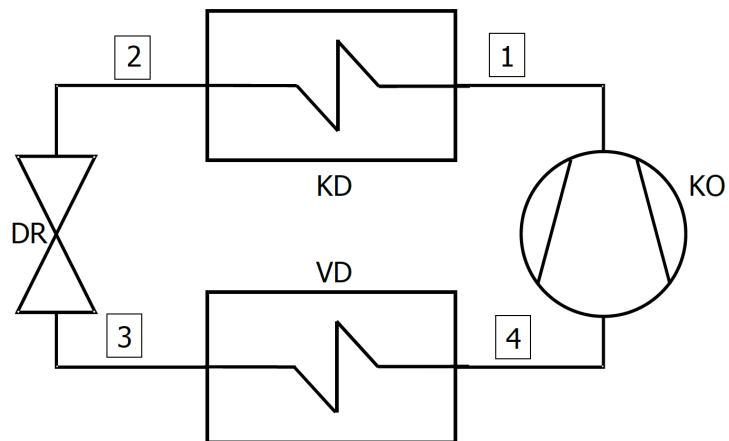
Ein einfacher Wärmepumpen-Kreisprozess mit dem Arbeitsmedium Ammoniak nimmt aus der Außenluft ( $T_{Luft} = -5\text{ °C}$ ) Wärme auf und führt beim Durchlaufen des Kreisprozesses einer Fußbodenheizung ( $T_{Heiz} = 25\text{ °C}$ ) Wärme zu. Die Wärmepumpe beinhaltet folgende Bauteile:

- einen Verdampfer (VD) und einen Kondensator (KD) mit jeweils isobarer Wärmeübertragung, wobei bei der Wärmeübertragung von der Außenluft an den Prozess sowie bei der Wärmeübertragung vom Prozess an die Heizung jeweils eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 5\text{ °C}$  auftritt
- einen isentrop arbeitenden Kompressor (KO) und eine adiabate Drossel (DR)

Beim Probetrieb der Wärmepumpe hat sich gezeigt, dass am Eingang des Kondensators (KD) trocken gesättigter Ammoniak-Dampf ( $x = 1$ ) und am Ausgang siedender Ammoniak ( $x = 0$ ) vorliegt. Am Ein- und Ausgang des Verdampfers (VD) liegt Ammoniak-Nassdampf mit unterschiedlichem Dampfgehalt vor.

Stoffwerte von siedendem Ammoniak und trocken gesättigtem Ammoniak-Dampf befinden sich in der Tabelle im Anhang.

- a) Stellen Sie die Zustandsänderungen des Wärmepumpen-Prozesses in qualitativer Form in einem  $h, s$ -Diagramm dar.
- b) Bestimmen Sie die Dampfgehalte in den Zuständen 3 und 4 sowie die spezifische Enthalpie im Zustand 4.
- c) Berechnen Sie die spezifische Arbeit des Kompressors (KO) und die übertragenen spezifischen Wärmemengen beim Verdampfer (VD) und Kondensator (KD).
- d) Wie groß ist die Leistungszahl der Wärmepumpe?



Stoffwerte von siedendem Ammoniak und trocken gesättigtem Ammoniak-Dampf:

$\vartheta$ °C	$p$ bar	$h'$ kJ/kg	$h''$ kJ/kg	$s'$ kJ/(kg·K)	$s''$ kJ/(kg·K)
- 10	2,9071	154,0	1451	0,8293	5,757
- 5	3,5476	176,9	1457	0,9152	5,688
0	4,2938	200,0	1462	1,0000	5,621
...					
20	8,5748	293,8	1480	1,3290	5,376
25	10,0320	317,7	1483	1,4090	5,319
30	11,6720	341,8	1486	1,4880	5,263

## Übung 16

### Aufgabe 1

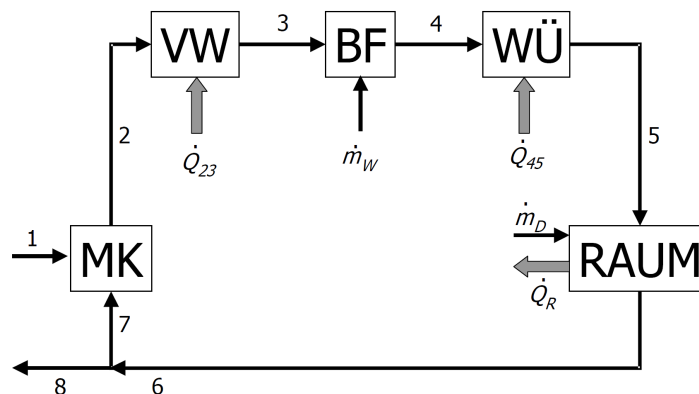
Durch eine Klimaanlage soll die Wärmeabgabe eines Raumes in Höhe von 15.000 kJ/h an die Umgebung gedeckt werden. Die Luft in dem Raum nimmt darüber hinaus eine kontinuierlich anfallende Satttdampfmenge mit der Temperatur  $T_s = 25\text{ °C}$  auf.

Zur Klimatisierung werden in einer adiabaten Mischkammer (MK) Außenluft vom Zustand 1 ( $T_1 = 0\text{ °C}$ ,  $\varphi_1 = 0,4$ ) mit Umluft vom Zustand 7 im Verhältnis  $\dot{m}_{L1}/\dot{m}_{L7} = 1,5$  gemischt. Die Luft vom Zustand 2 wird in einem Vorwärmer (VW) bis zum Zustand 3 erwärmt. Nach einer Befeuchtung (BF) mit flüssigem Wasser von  $20\text{ °C}$  wird im Zustand 4 eine relative Feuchte von  $\varphi_4 = 0,9$  erreicht. Durch eine anschließende Wärmezufuhr im Wärmeübertrager (WÜ) hat die Luft im Zustand 5 eine Temperatur von  $T_5 = 25\text{ °C}$  und eine relative Feuchte von  $\varphi_5 = 0,4$ . Die aus dem Raum austretende Luft hat eine relative Feuchte von  $\varphi_6 = 0,7$ . Der Massenstrom der trockenen Luft im Zustand 6 beträgt  $\dot{m}_{L6} = 3.000\text{ kg/h}$ .

Der Gesamtdruck beträgt überall 1 bar. Die trockene Luft und der Wasserdampf können als ideale Gase behandelt werden. Die Änderungen äußerer Energien sind vernachlässigbar.

- Bestimmen Sie den Zustandspunkt 6 im  $h^*, X$ -Diagramm.
- Welche Satttdampfmenge wird dem Raum zugeführt?
- Bestimmen Sie die Zustandspunkte 2, 3 und 4 im  $h^*, X$ -Diagramm.
- Wie groß ist die Wärmeleistung des Vorwärmers?
- Welche Wassermenge wird im Befeuchter zugegeben?
- Wie groß ist die Wärmeleistung des Wärmeübertragers?

Anlagenskizze zu Übung 8



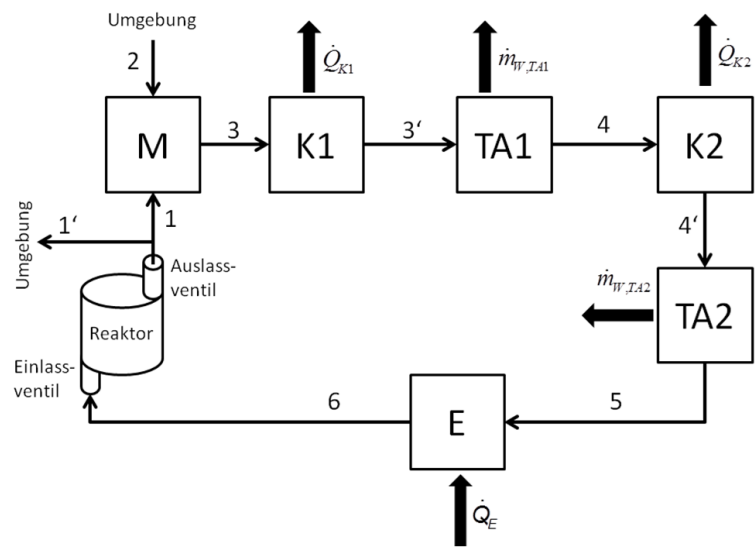
## Übung 17

### Aufgabe 1

Das Anlagenschema im Anhang zeigt die Frischluftzufuhr eines Reaktors in der chemischen Industrie an einem heißen trockenen Sommertag. Das Auslassventil wird geöffnet, wenn im Reaktor eine Temperatur von  $T_1 = 29\text{ °C}$  und ein Wassergehalt von  $x_1 = 20\text{ g/kg}$  erreicht wird, der Massenstrom an trockener Luft beträgt  $\dot{m}_{L1} = 10\text{ kg/s}$  (der Teilstrom vom Zustand 1' entweicht an die Umgebung und soll nicht weiter betrachtet werden). Nach Mischung mit Außenluft aus der Umgebung vom Zustand 2 ( $T_2 = 37\text{ °C}$ ,  $\varphi_2 = 5\%$ ) liegt nach dem Mischer (M) Zustand 3 ( $T_3 = 31\text{ °C}$ ) vor. Nach einer Wärmeabfuhr im Kühler 1 (K1) ergibt sich Zustand 3' im Zweiphasengebiet. Nach anschließenden vollständiger Abscheidung des anfallenden flüssigen Wassers bei konstanter Temperatur im Tropfenabscheider 1 ergibt sich Zustand 4 ( $T_4 = 15\text{ °C}$ ). Nach einer erneuten Wärmeabfuhr im Kühler 2 (K2) sowie einer weiteren vollständigen und isothermen Tropfenabscheidung im Tropfenabscheider 2 (TA2) liegt Zustand 5 ( $T_5 = 5\text{ °C}$ ) vor. Nach einer abschließenden Wärmezufuhr im Erhitzer (E) ergibt sich am Einlassventil des Reaktors Zustand 6 ( $T_6 = 22\text{ °C}$ ). Der gesamte Prozess läuft bei einem Druck von  $p = 1\text{ bar}$  ab.

- Zeichnen Sie die Zustände 1 und 2 in das  $h^*, X$ -Diagramm ein.
- Bestimmen Sie die Zustände 3, 3', 4, 4', 5 und 6 im  $h^*, X$ -Diagramm.
- Bestimmen Sie den Massenstrom an trockener Luft im Zustand 2 ( $\dot{m}_{L2}$ ).
- Bestimmen Sie die Wärmeleistung des Erhitzer (E) sowie die Wärmeleistungen der Kühler 1 und 2 (K1 und K2).
- Bestimmen Sie den abzuführenden Massenstrom an Wasser im Tropfenabscheider 1 ( $\dot{m}_{W,TA1}$ ) und im Tropfenabscheider 2 ( $\dot{m}_{W,TA2}$ ).
- Die Öffnung des Auslassventils soll zukünftig über einen Dampfdruck-Sensor gewährleistet werden. Bestimmen Sie den Dampfdruck im Zustand 1 sowie den sich ergebenden Sättigungsdampfdruck.
- Der zweistufige Trocknungsprozess von 3 nach 5 über die Zwischenzustände 3', 4 und 4' soll durch einen einstufigen Trocknungsprozess über den Zwischenzustand 7 ( $3 \rightarrow 7 \rightarrow 5$ ) ersetzt werden. Zeichnen Sie Zustand 7 in das  $h^*, X$ -Diagramm ein und entscheiden Sie, ob dieser Prozess technisch umsetzbar ist.



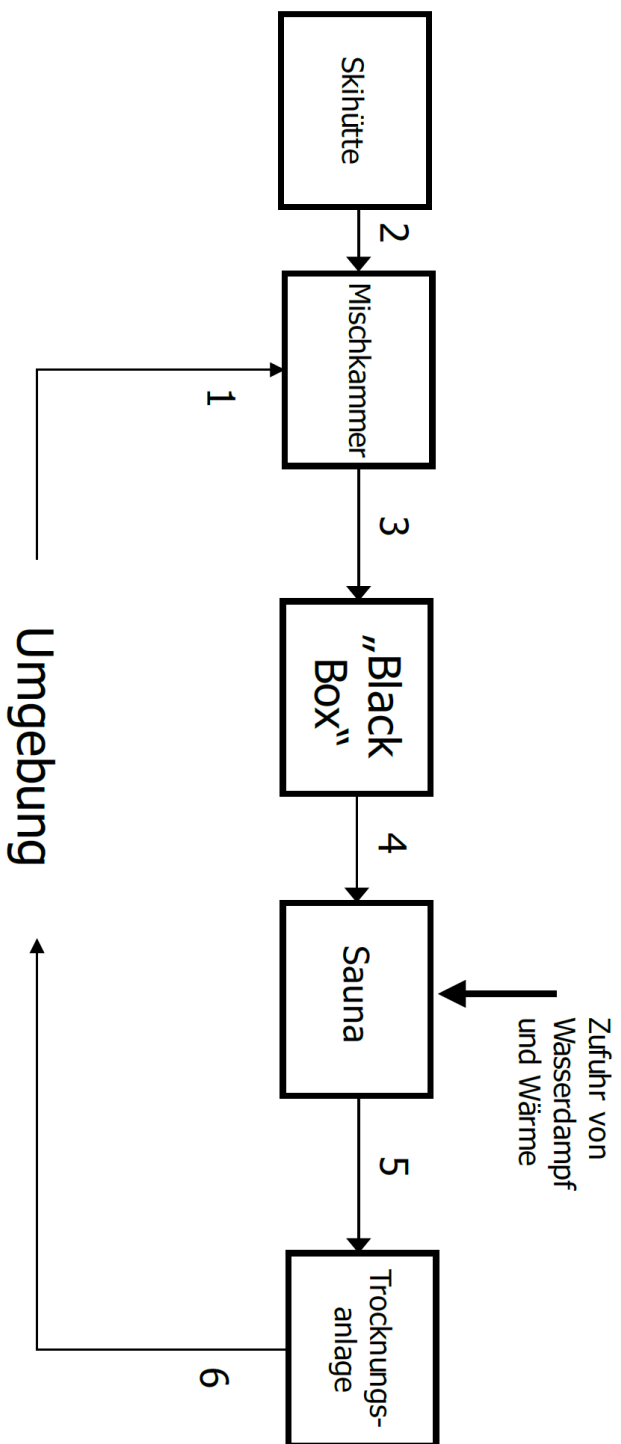


## Übung 18

### Aufgabe 1

In einer Skihütte wird eine neuartige Niedertemperatur-Sauna betrieben. Dabei wird in einer adiabaten Mischkammer feuchte Luft aus der Umgebung ( $T_1 = 0\text{ °C}$ ,  $x_1 = 2\text{ g/kg}$ ) mit Luft aus der Skihütte ( $T_2 = 19\text{ °C}$ ,  $\varphi_2 = 15\%$ ) gemischt, so dass sich eine Temperatur von  $T_3 = 10\text{ °C}$  einstellt. Der Luftstrom 3 wird mittels einer nicht näher beschriebenen „Black Box“ auf eine Temperatur  $T_4 = 34\text{ °C}$  und eine relative Feuchte  $\varphi_4 = 90\%$  gebracht und in die Sauna geleitet. In der Sauna ergibt sich durch Wärmezufuhr eine Temperaturerhöhung um  $\Delta T_{45} = 9\text{ °C}$ , durch Schweißabsonderungen von Personen erhöht sich der Wassergehalt – ohne eine weitere Temperaturänderung – um  $\Delta x_{45} = 2,7\text{ g/kg}$ . Die Abluft der Sauna vom Zustand 5 durchläuft zunächst eine Trocknungsanlage und wird anschließend bei einer Temperatur von  $T_6 = 43\text{ °C}$  an die Umgebung abgegeben. Der Gesamtdruck beträgt überall 1 bar. Luft und Wasserdampf sollen als ideale Gase behandelt werden. Änderungen äußerer Energien sind vernachlässigbar.

- a) Zeichnen Sie – nachvollziehbar – die Zustände 1, 2, 3, 4 und 5 in das beiliegende  $h^*, X$ -Diagramm ein.
- b) Um welchen Betrag  $\Delta x_{56}$  muss der Wassergehalt im Trocknungsprozess mindestens sinken, damit beim Austritt der Abluft in die Umgebung eine Nebelbildung vermieden wird?
- c) Beschreiben Sie die benötigten Bauteile inkl. ihrer Funktionsweisen für die Trocknungsanlage. In der Trocknungsanlage sollen keine chemischen Trocknungsmittel zum Einsatz kommen.



# Lösungen zu allen Übungen

## Übung 1

### Aufgabe 1

intensive Zustandsgrößen: Druck, Temperatur

extensive Zustandsgrößen: Masse, Volumen

man benötigt mindestens 2 voneinander unabhängige intensive Zustandsgrößen

### Aufgabe 2

- a) Das menschliche Herz: offenes System, da es einen Stofffluss gibt (Blutkreislauf) und eine Wärmeübertragung erfolgt (vom Herz an das umliegende Gewebe)
- b) Ein Autoreifen: geschlossenes System, da es zu keinem Massenaustausch mit der Umgebung kommt, aber eine Wärmeübertragung zur Umgebung auftritt
- c) Eine Sauna: Isoliertes System sofern die Tür zu ist, da es dann zu keiner Wärmeübertragung kommt und auch keinem Massenaustausch (wenn man die zu-/abgeführte Luft zwecks Sauerstoffzufuhr vernachlässigt)

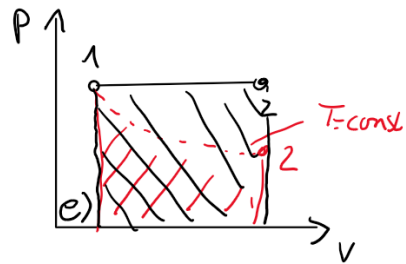
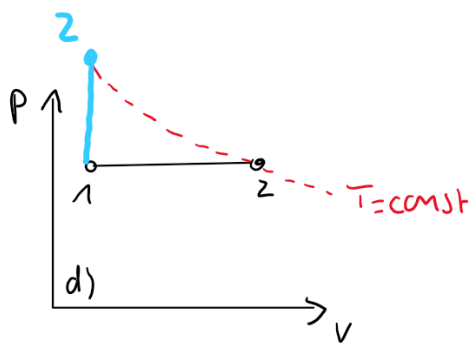
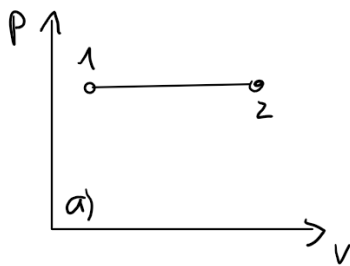
### Aufgabe 3

- a)  $m=1,168 \text{ kg}$
- b)  $\rho=1,168 \text{ kg/m}^3$ ;  $v=0,856 \text{ m}^3/\text{kg}$

## Übung 2

### Aufgabe 1

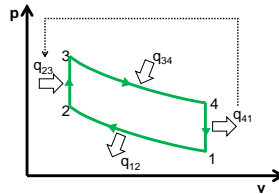
- a)  $p$ - $v$ -Diagramm
- b)  $q_{12} = 150,7 \text{ kJ/kg}$
- c)  $w_{12}^v = -43,2 \text{ kJ/kg}$
- d) Ja, über eine isochore Zustandsänderung.
- e) Die Volumenänderungsarbeit geringer als in Teilaufgabe c.



## Übung 3

### Aufgabe 1

a)  $p$ - $v$ -Diagramm



b) Zustandspunkte

$$p_1=1 \text{ bar}, T_1=300 \text{ K}, v_1=12,47 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_2=10 \text{ bar}, T_2=300 \text{ K}, v_2=1,247 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_3=25 \text{ bar}, T_3=750 \text{ K}, v_3=1,247 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_4=2,5 \text{ bar}, T_4=750 \text{ K}, v_4=12,47 \text{ m}^3/\text{kg}$$

c) Wärmezufuhr von außen

$$\text{In Prozessschritt 3 nach 4: } q_{34}=7178 \text{ kJ/kg}$$

d) Zu-/abgeführte Arbeiten

$$w_{12}^v=2871 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{12}^v=-7178 \text{ kJ/kg}$$

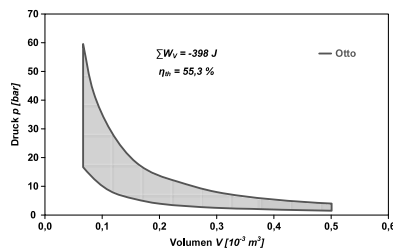
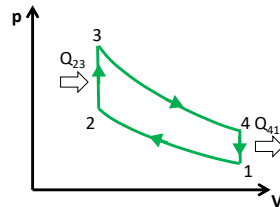
e) Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th}=60 \%$$

# Übung 4

## Otto-Prozess

a)  $p$ - $v$ -Diagramm



b) Zustandspunkte

$$p_1=1 \text{ bar}, T_1=300 \text{ K}, V_1=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$p_2=16,79 \text{ bar}, T_2=672 \text{ K}, V_2=6,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$p_3=60 \text{ bar}, T_3=2400 \text{ K}, V_3=6,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$p_4=3,58 \text{ bar}, T_4=1073 \text{ K}, V_4=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

c) Wärmemengen

$$Q_{23}=720 \text{ J}$$

$$Q_{41}=-322 \text{ J}$$

d) Arbeit

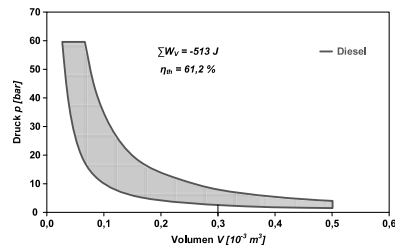
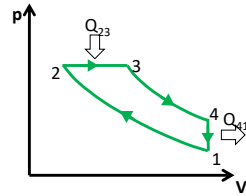
$$W_{ges}^v=-398 \text{ J}$$

e) Wirkungsgrad

$$\eta_{th}=55,3 \%$$

## Diesel-Prozess

a)  $p$ - $v$ -Diagramm



b) Zustandspunkte

$$p_1 = 1 \text{ bar}, T_1 = 300 \text{ K}, V_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$p_2 = 60 \text{ bar}, T_2 = 964 \text{ K}, V_2 = 2,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$p_3 = 60 \text{ bar}, T_3 = 2400 \text{ K}, V_3 = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$p_4 = 3,6 \text{ bar}, T_4 = 1079,5 \text{ K}, V_4 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

c) Wärmemengen

$$Q_{23} = 838 \text{ J}$$

$$Q_{41} = -322 \text{ J}$$

d) Arbeit

$$W_{ges}^v = -516 \text{ J}$$

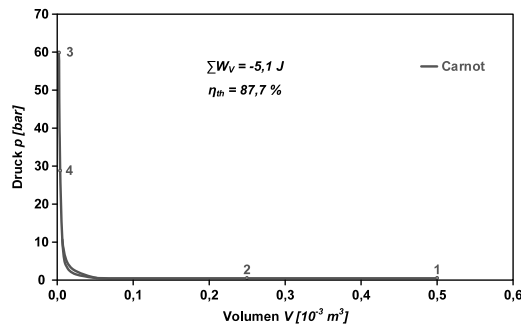
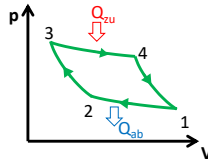
e) Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = 61,6 \%$$



## Carnot-Prozess

a)  $p$ - $v$ -Diagramm



b) Zustandspunkte

$$p_1 = 0,02 \text{ bar}, T_1 = 300 \text{ K}, V_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$p_2 = 0,041 \text{ bar}, T_2 = 300 \text{ K}, V_2 = 2,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$p_3 = 60 \text{ bar}, T_3 = 2400 \text{ K}, V_3 = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$p_4 = 28,96 \text{ bar}, T_4 = 2400 \text{ K}, V_4 = 2,76 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

c) Wärmemengen

$$Q_{12} = -0,716 \text{ J}$$

$$Q_{34} = 5,83 \text{ J}$$

d) Arbeit

$$W_{ges}^v = -5,11 \text{ J}$$

e) Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = 87,7 \%$$

## Übung 5

### Aufgabe 1

a)  $m_L = 0,581 \text{ kg}$

b)  $T_2 = 398 \text{ K}$

### Aufgabe 2

a)  $p_2 = 1,817 \text{ bar}$

b)  $S_{12} = 830,76 \text{ J/K}$

## Übung 6

### Aufgabe 1

- a)  $T_2 = 420 \text{ K}$
- b)  $m = 0,0415 \text{ kg}$

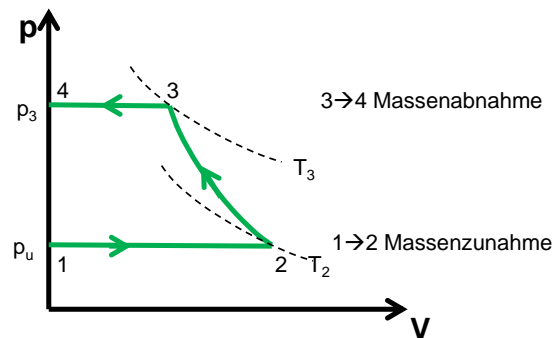
### Aufgabe 2

- a)  $m_{O_2} = 0,269 \text{ kg}$ ;  $m_{N_2} = 0,887 \text{ kg}$
- b)  $p_{O_2} = 0,21 \text{ bar}$ ;  $p_{N_2} = 0,79 \text{ bar}$
- c)  $S_2 - S_1 = 171,3 \text{ J/kg}$

# Übung 7

## Aufgabe 1

a)  $p, V$ -Diagramm:



b)  $T_2=300\text{ K}; \Delta m=5,81\cdot 10^{-4}\text{ kg}$

c)  $V_3=0,139\cdot 10^{-3}\text{ m}^3; T_3=500\text{ K}$

d)  $W_{12}^v=-50\text{ J}; W_{23}^v=83,4\text{ J}; W_{34}^v=83,4\text{ J}$

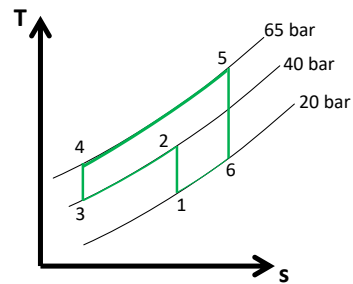
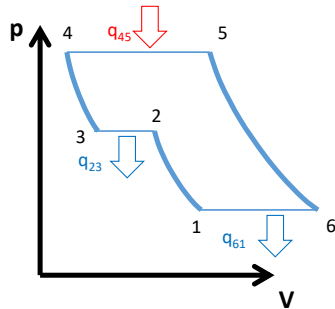
e)  $W_{ges}^v=116,8\text{ J} = W_{23}^t = \int_2^3 v dp$

f)  $P_{ges}=5,58\text{ kW}$

# Übung 8

## Aufgabe 1

a) Diagramme



b)  $p_1=20 \text{ bar}, T_1=300 \text{ K}, v_1=0,309 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $p_2=40 \text{ bar}, T_2=395 \text{ K}, v_2=0,203 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $p_3=40 \text{ bar}, T_3=300 \text{ K}, v_3=0,155 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $p_4=65 \text{ bar}, T_4=364 \text{ K}, v_4=0,115 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $p_5=65 \text{ bar}, T_5=1150 \text{ K}, v_5=0,364 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$   
 $p_6=20 \text{ bar}, T_6=720 \text{ K}, v_6=0,742 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

c)  $q_{23}=-492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $q_{61}=-2176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $q_{45}=4071 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

d)  $w_{12}^t=492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$   
 $w_{34}^t=332 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

e)  $w_{56}^t=-2227 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

f)  $\eta_{th}=34,5 \%$

## Übung 9

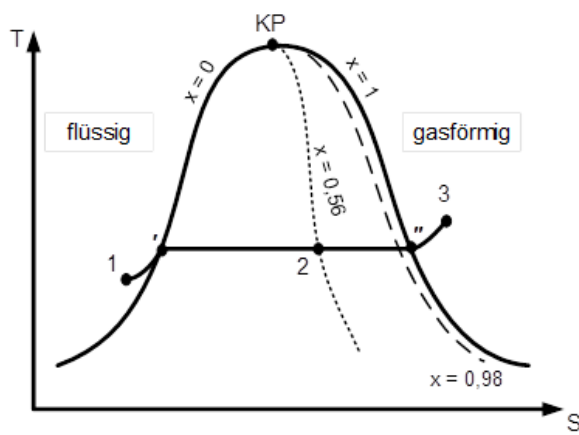
### Aufgabe 1

- a) Höher
- b)  $T_6=776,4$  K.
- c) nicht-isentrope Entspannung (linksgekrümmte Kurve zu höheren Entropien)
- d)  $w_{56}^R=373,6$  kJ/kg
- e) Fläche unter der Kurve

# Übung 10

## Aufgabe 1

- a)  $Q_1 = 420 \text{ kJ}$
- b)  $Q_2 = 1241,7 \text{ kJ}$
- c)  $Q_m = 959,9 \text{ kJ}$
- d)  $Q_3 = 185,6 \text{ kJ}$
- e)  $T, s$ -Diagramm

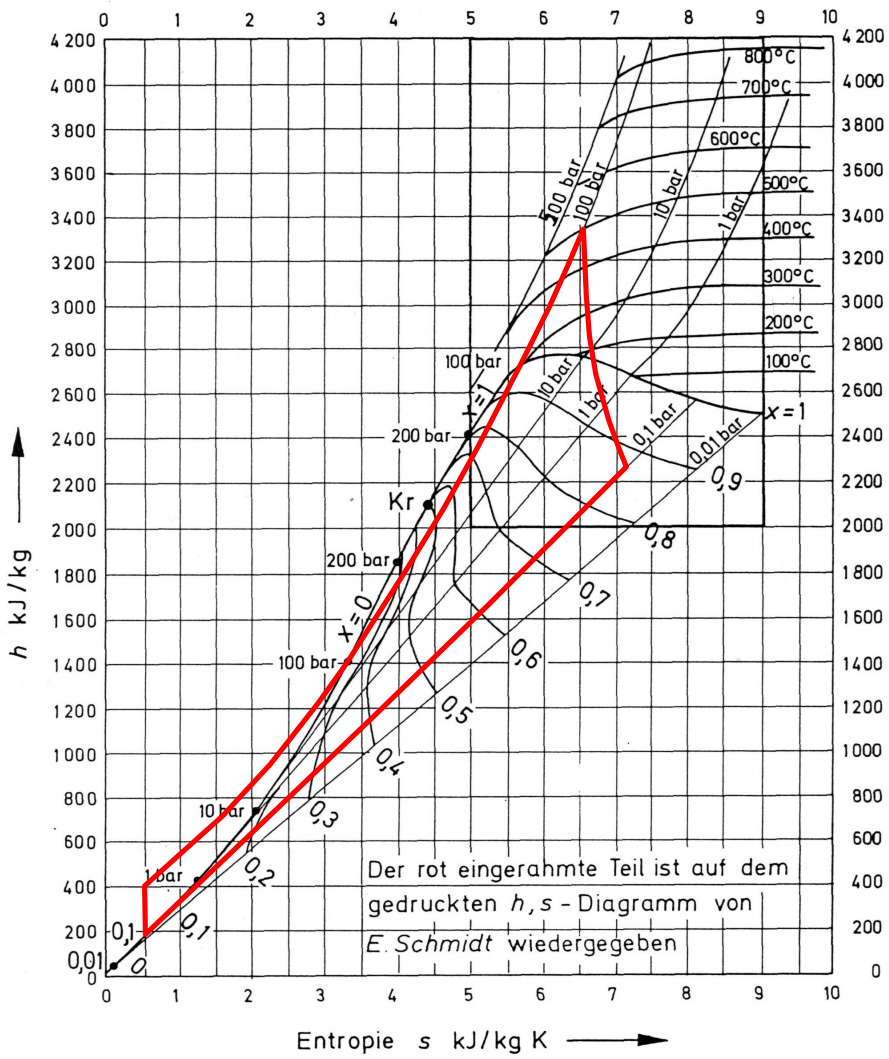


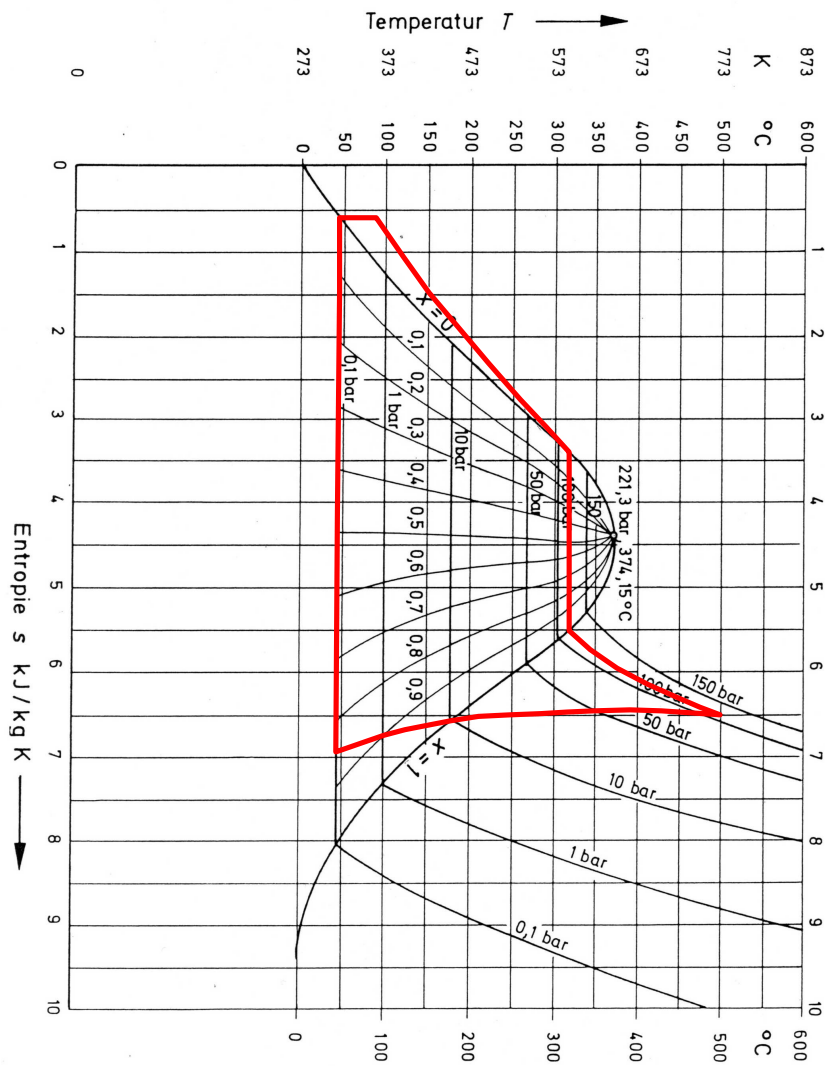
## Übung 11

### Aufgabe 1

- a)  $T, s$ - und  $h, s$ -Diagramm
- b)  $P_{34}^t = 0,959 \text{ MW}$ ,  $P_{12}^t = -89,9 \text{ MW}$
- c)  $\dot{Q}_{41} = 251,7 \text{ MW}$
- d)  $\dot{Q}_{23} = -162,7 \text{ MW}$
- e)  $\eta_{th} = 35,3 \%$



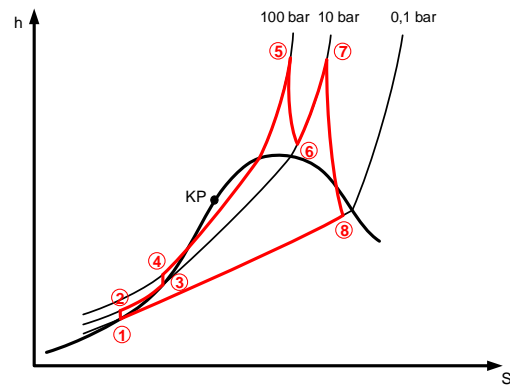




# Übung 12

## Aufgabe 1

a)  $h, s$ -Diagramm:



b)  $\dot{Q}_{AHK} = -254,1 \text{ MW}$

c)  $\dot{m}_D = 67,5 \text{ kg/s}$

d)  $P_{56}^t = -32,94 \text{ MW}; P_{78}^t = -63,65 \text{ MW}$

e)  $P_{12}^t = 67,5 \text{ kW}; P_{34}^t = 607,5 \text{ kW}$

f)  $\dot{Q}_{81} = -158,2 \text{ MW}$

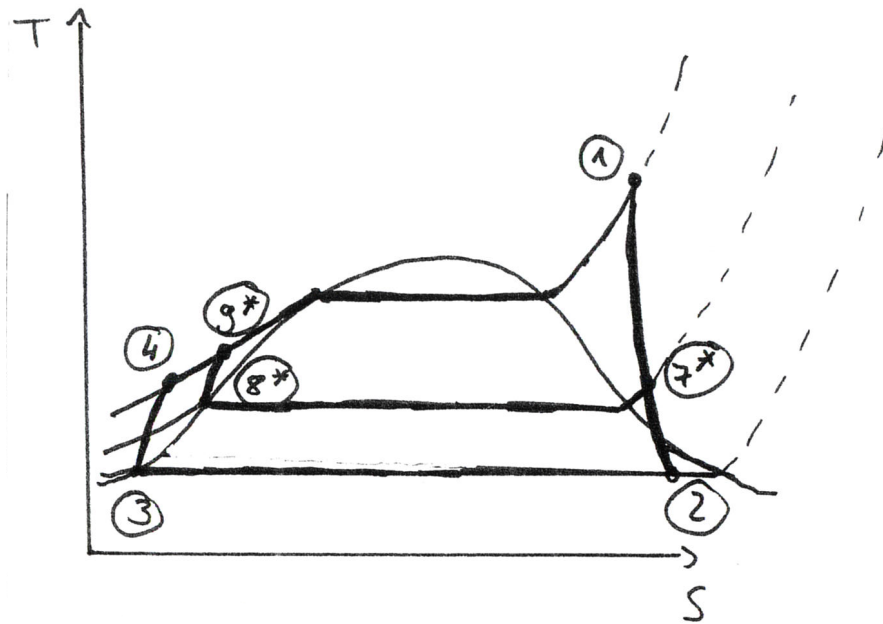
g)  $\eta_{th} = 37,7 \%$

h)  $T_{AG, KOVW} = 183,3 \text{ }^\circ\text{C}$

## Übung 13

### Aufgabe 1

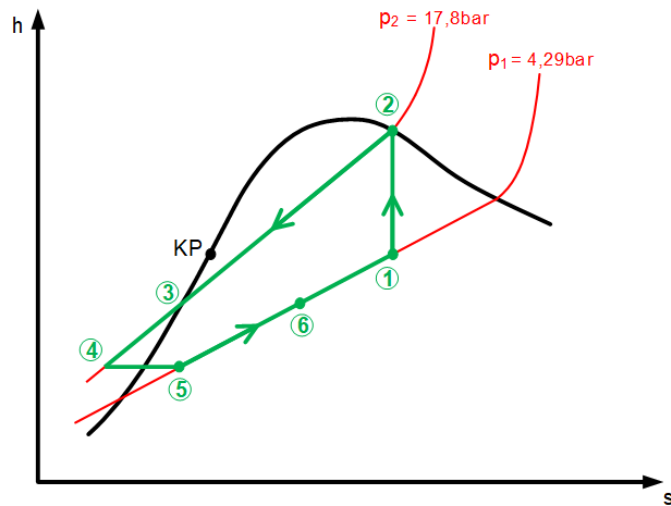
a)  $T, s$ -Diagramm



- b)  $h_2 = 2464,29 \text{ kJ/kg}$   
c)  $w_{P1}^t = 11,69 \text{ kJ/kg}$ ;  $w_T^t = -732,41 \text{ kJ/kg}$   
d)  $q_{DE} = 2993,20 \text{ kJ/kg}$   
e)  $q_K = -2272,48 \text{ kJ/kg}$   
f)  $\eta_{th} = 24,1\%$   
g) siehe a)  
h)  $P_{P1}^t = 16,37 \text{ kW}$ ;  $P_{P2}^t = 0,45 \text{ kW}$ ;  $P_T^t = -1046,1 \text{ kW}$   
i)  $\eta_{th} = 24,4\%$

## Übung 14

a)  $h, s$ -Diagramm



b)  $x_1 = 0,889$

c)  $w_{12}^t = 169,08 \text{ kJ/kg}$

d)  $q_{23} = -1075 \text{ kJ/kg}$

e)  $q_{34} = -166,25$

f)  $x_5 = 0,0394; x_6 = 0,756$

g)  $q_{56} = 905,92 \text{ kJ/kg}$

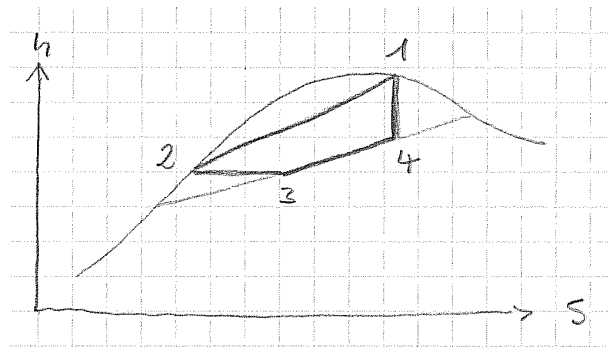
h)  $\epsilon = 6,36$

i)  $s_{irr,56} = 0,0596 \text{ kJ/(kgK)}, s_{irr,45} = 0,014 \text{ kJ/(kgK)}$

## Übung 15

### Aufgabe 1

a)  $h, s$ -Diagramm:



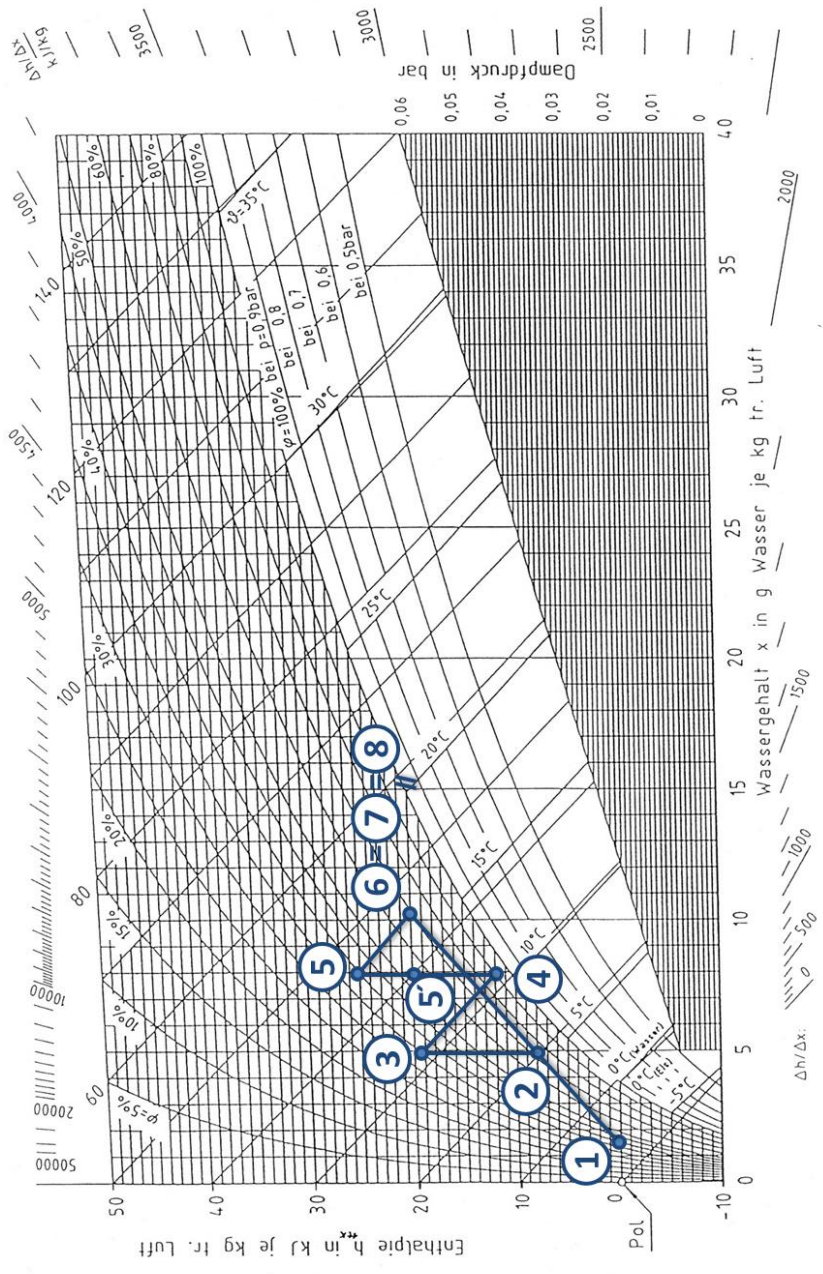
b)  $x_3 = 0,145, x_4 = 0,9, h_4 = 1321 \text{ kJ}/(\text{kgK})$

c)  $w_{41}^t = 165 \text{ kJ}/\text{kg}, q_{34} = 979,2 \text{ kJ}/\text{kg}, q_{12} = -1144,2 \text{ kJ}/\text{kg}$

d)  $\epsilon_{WP} = 6,94$

## Übung 16

- a) siehe Diagramm
- b)  $\dot{m}_D = 6,6 \text{ kg/h}$
- c) siehe Diagramm
- d)  $\dot{Q}_{VW} = 9,6 \text{ kW}$
- e)  $\dot{m}_{W,34} = 9,0 \text{ kg/h}$
- f)  $\dot{Q}_{WUE} = 11,25 \text{ kW}$

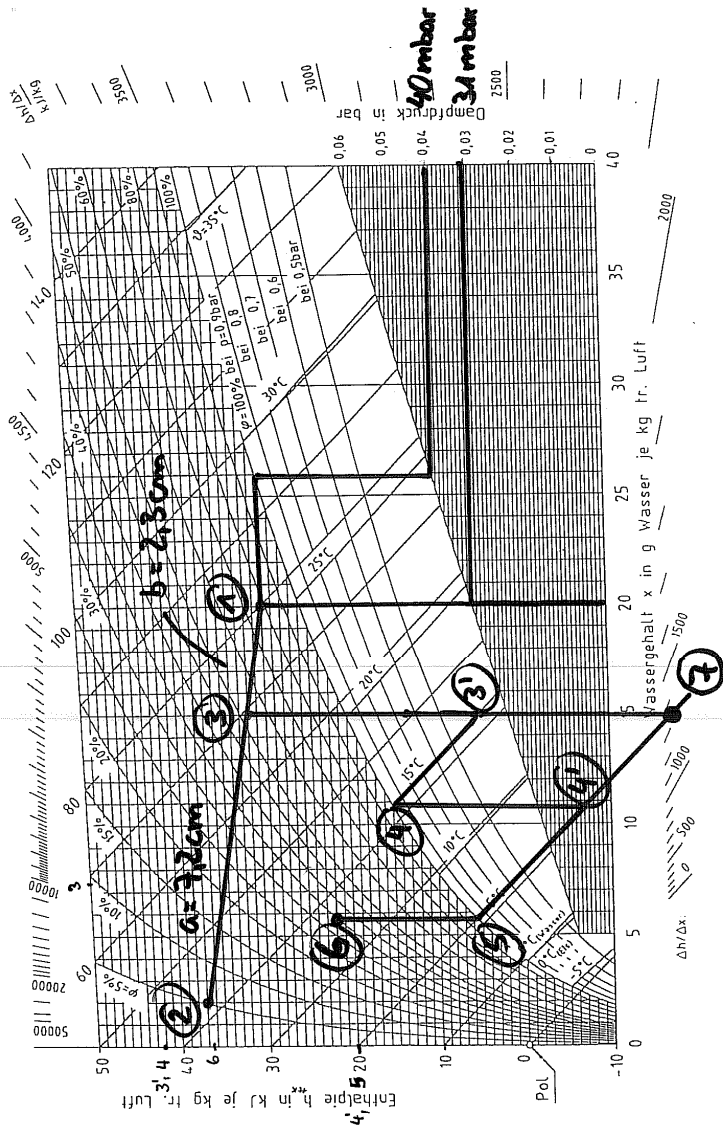




## Übung 17

### Aufgabe 1

- a) siehe Diagramm
- b) siehe Diagramm
- c)  $\dot{m}_{L2} = 3,2 \text{ kg/s}$ .
- d)  $\dot{Q}_E = 217,8 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_{K1} = -349,8 \text{ kW}$ ,  $\dot{Q}_{K2} = -290,4 \text{ kW}$
- e)  $\dot{m}_{W,TA1} = 55,4 \text{ g/s}$ ,  $\dot{m}_{W,TA2} = 67,32 \text{ g/s}$
- f)  $p_d = 31 \text{ mbar}$ ;  $p_s = 40 \text{ mbar}$
- g) Ja.



## Übung 18

### Aufgabe 1

- a) siehe Diagramm
- b)  $\Delta x_{56} = 8,9 \text{ g/kg}$
- c) Wärmeabfuhr ins 2-Phasengebiet mit einem Wärmeübertrager; adiabate Abscheidung der Flüssigkeit im Tropfenabscheider; Wärmezufuhr bis zur Temperatur  $T_6$  im Wärmeübertrager

