

Übungsaufgaben zur Thermodynamik

Übungsbeispiel 1

Ein ideales Gas hat bei einem Druck von 2,5 bar und $\vartheta_1 = 27^\circ\text{C}$ eine Dichte von $\rho_1 = 2,7 \text{ kg/m}^3$. Durch isobare Wärmezufuhr soll sich das Gasvolumen V_1 verdoppeln ($V_2 = 2V_1$). Wie groß sind nach der Wärmezufuhr die Temperatur ϑ_2 und die Dichte ρ_2 des Gases?

Lösung: $\vartheta_2 = 327,15^\circ\text{C}$, $\rho_2 = 1,35 \text{ kg/m}^3$

Übungsbeispiel 2

Ein Behälter mit $V = 7,36 \text{ m}^3$ enthält 1370 kg Ethan (C_2H_6). Welche Werte haben spezifisches Volumen, Dichte und Molvolumen? Welche Stoffmenge befindet sich im Behälter? ($M_{\text{Ethan}} = 30,05 \text{ kg/kmol}$)

Lösung: $v = 5,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $\rho = 186 \text{ kg/m}^3$, $V_M = 0,161 \text{ m}^3/\text{kmol}$, $n = 45,6 \text{ kmol}$

Übungsbeispiel 3

Welche Dichte und welches spezifische Volumen hat Stickstoff bei einem Druck von $p = 1005 \text{ mbar}$ und einer Temperatur von $\vartheta = 25^\circ\text{C}$? Wie groß ist die Dichte im Normzustand ($\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$, $p_0 = 1013 \text{ mbar}$)?

Gaskonstante N_2 : $R_i = 296,8 \text{ J/kgK}$

Lösung: $\rho = 1,136 \text{ kg/m}^3$, $v = 0,881 \text{ m}^3/\text{kg}$, $\rho_0 = 1,25 \text{ kg/m}^3$

Übungsbeispiel 4

Wieviel Masse („wieviel wiegt“) hat ein Normkubikmeter Luft? ($R_i = 287 \text{ Nm/kgK}$)

Lösung: $m = 1,293 \text{ kg}$

Übungsbeispiel 5

Ein Druckbehälter mit $V = 20 \text{ m}^3$ Inhalt ist mit Sauerstoff gefüllt, der unter einem absoluten Druck von $p_1 = 7 \text{ bar}$ und einer Temperatur $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$ steht. Nach einer Gasentnahme ist der Druck im Behälter noch 4,2 bar und die Temperatur ist auf 12°C gesunken. (Gaskonstante O_2 : $R_i = 259,8 \text{ Nm/kgK}$).

Wieviel kg Sauerstoff wurden dem Behälter entnommen?

Lösung: $\Delta m = m_1 - m_2 = 70,4 \text{ kg}$.

Übungsbeispiel 6

In einer Sauerstoffflasche von 10 l Inhalt befindet sich Sauerstoff von $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$ und $p_1 = 50 \text{ bar}$. Durch Nutzung des Sauerstoffs fällt der Flaschendruck auf $p_2 = 40 \text{ bar}$ bei gleichbleibender Temperatur.

Welche Masse an Sauerstoff wurde entnommen? (Gaskonstante O_2 : $R_i = 259,8 \text{ Nm/kgK}$). Skizzieren Sie den Prozessverlauf im p-v- und im p-T-Diagramm.

Lösung: $m_1 - m_2 = 0,131 \text{ kg}$

Übungsbeispiel 7

In einem Produktionsraum zur Tablettenherstellung mit $V = 2 \text{ m}^3$ soll gegenüber der Umgebung eine Druckdifferenz von $-0,3 \text{ bar}$ bei konstanter Temperatur von 26°C erzeugt werden, damit keine Wirkstoffe in die Umwelt gelangen können.

Welche Luftmasse ist abzusaugen?

Lösung: $m_1 - m_2 = 0,3 \cdot m_1 = 0,722 \text{ kg}$

Übungsbeispiel 8

Eine geschlossene Dose ist mit einem idealen Fluid gefüllt, $p_1 = 0,3 \text{ bar}$ Überdruck bei $\vartheta_1 = 37^\circ\text{C}$. Die Dose wird in ein Wasserbad von $\vartheta_2 = 96^\circ\text{C}$ getaucht. Welcher Enddruck stellt sich in der Dose ein?

Lösung: $p_2 = 1,55 \text{ bar}$

Übungsbeispiel 9

Durch eine sich erweiternde Rohrleitung strömt Wasser. Die mittlere Eintrittsgeschwindigkeit in das Rohr ist $0,0632 \text{ m/s}$, Eintritts- $\varnothing = 4,84 \text{ mm}$, Austritts- $\varnothing = 112,3 \text{ mm}$. Wie groß sind im Austrittsquerschnitt Massenstrom, Massenstromdichte und Strömungsgeschwindigkeit? (Dichte von Wasser: $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$).

Lösung: $m_2 = 0,116 \text{ kg/s}$, $I_2 = 11,7 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $w_2 = 0,0117 \text{ m/s}$

Übungsbeispiel 10

Ein Druckbehälter von 3 m^3 Inhalt ist mit Stickstoff gefüllt, der zunächst unter einem Druck von $p_1 = 2 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 15^\circ\text{C}$ steht. Nach einer Wärmezufuhr steigt die Temperatur auf $\vartheta_2 = 250^\circ\text{C}$. -Wie groß ist der Druck p_2 nach der Wärmezufuhr?

-Welche Wärmemenge $Q_{1,2}$ wurde zugeführt?

$R_i = 296,8 \text{ J/kgK}$, $c_{vm} = 0,927 \text{ kJ/Nm}^3\text{K}$ ($\text{Nm}^3 = \text{Norm m}^3$)

Lösung: $p_2 = 3,63 \text{ bar}$, $Q_{1,2} = +1224 \text{ kJ}$.

Übungsbeispiel 11

500 g Stahl ($c_m = 0,716 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$) von 800°C werden in 10 kg Wasser ($c_m = 4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$) von 15°C abgeschreckt. Die spezifischen Wärmekapazitäten bleiben unverändert. Wie hoch steigt die Temperatur des Wassers, wenn der Temperaturengleich ohne Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt?

Lösung: $\vartheta_m = 21,65^\circ\text{C}$

Übungsbeispiel 12

In einem Verdichter mit nichtadiabaten Wänden wird Luft komprimiert, wobei ihr die innere Arbeit 10 MJ zugeführt wird. Die Enthalpie soll sich während des Verdichtungs Vorgangs nicht ändern (isenthalp). Wieviel Wärme muß zu- oder abgeführt werden?

Lösung: $Q_{1,2} = -10 \text{ MJ}$ (abzuführen)

Übungsbeispiel 13

Eine Gasturbine saugt Luft von $p_1 = 1 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$ an, der Mengenstrom beträgt $9,5 \text{ kg/s}$. Die heißen Gase verlassen die Gasturbine mit $p_2 = 2 \text{ bar}$ und $\vartheta_2 = 500^\circ\text{C}$. An der Gasturbine wird eine techn. Leistung $W_{t1,2} = 10 \text{ MW}$ abgenommen. (spez. Wärmekapazität Luft $c_{pm} = 1,004 \text{ kJ/kgK}$) Welche Wärmemenge pro Zeit (=Wärmestrom) wird der Gasturbine zugeführt?

Lösung: $Q_{1,2} = +14578 \text{ kJ/s}$

Übungsbeispiel 14

In einem N_2 -Verdichter werden stündlich 100 kg N_2 bei einer Ansaugtemperatur von 50°C verdichtet. Der Verdichter nimmt eine techn. Leistung von 3,5 kW auf und gibt durch Kühlung einen Wärmestrom von 3350 kJ/h ab. spez. Wärmekapazität N_2 : $c_{pm} = 1,039 \text{ kJ/kgK}$
Berechnen Sie die Temperatur des N_2 nach der Verdichtung.

Lösung: $\vartheta_2 = 139^\circ\text{C}$.

Übungsbeispiel 15

In einem adiabaten Zylinder von 500 l befindet sich ein ideales Gas. Der Druck wird durch einen belasteten Kolben auf 2 bar (absolut) gehalten. Dem Gas wird die Dissipationsenergie $W_{\text{diss},1,2} = 0,2 \text{ kWh}$ (Rührer) zugeführt, wobei sich die Temperatur von 18°C auf 600°C erhöht. Der Umgebungsdruck beträgt 0,98 bar.

Wie groß ist die Volumenänderungsarbeit?

Wieviel ändert sich die innere Energie des Systems? Nimmt sie zu oder ab?

Wie groß ist die an die Kolbenstange abgegebene Nutzarbeit?

Lösung: $W_{v,1,2} = -200 \text{ kJ}$ (abgegeben); $U_2 - U_1 = 520 \text{ kJ}$ (steigt), $W_{n,1,2} = -102 \text{ kJ}$ (abgegeben)

Übungsbeispiel 16

Ein geschlossenes System, in dem sich 2 kg N_2 befinden, gibt eine Volumenänderungsarbeit von 120000 Nm an die Umgebung ab. Je kg N_2 werden 200 kJ Wärme zugeführt.

1. Wie groß ist die Änderung der inneren Energie des Gases?

2. Nimmt die innere Energie des Gases während der Zustandsänderung zu oder ab?

3. Wie groß ist die Temperaturänderung des Gases, wenn die Temperatur ϑ_1 zu Beginn der Zustandsänderung 25°C beträgt?

(spez. Wärmekapazität $c_{vm} = 0,742 \text{ kJ/kgK}$)

Lösung: $\Delta u = +140 \text{ kJ/kg}$, $\Delta U = +280 \text{ kJ}$, $\vartheta_2 = 213,7^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta = 188,7\text{K}$

Übungsbeispiel 17

Einer adiabaten Maschine (Turbine) strömen 10m^3 Luft mit 5 bar zu. Die Luft gibt in der Maschine die innere Arbeit 6,04 MJ ab und tritt mit 1 bar aus, wobei sich das Luftvolumen auf $34,5 \text{ m}^3$ vergrößert (Änderung der kinetischen und potentiellen Energie vernachlässigbar).

Wie ändern sich innere Energie und Enthalpie der Luft beim Durchströmen der Maschine?

Lösung: $W_{i,1,2} = -6,04 \text{ MJ}$, $U_2 - U_1 = -4,49 \text{ MJ}$

Übungsbeispiel 18

In einem geschlossenen Kessel von $V = 2 \text{ m}^3$ Inhalt befindet sich Luft von $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$ und $p_1 = 5 \text{ bar}$.

$R_i = 287 \text{ Nm/kgK}$ $c_{pm} = 1,004 \text{ kJ/kgK}$ $\chi = 1,4$

-Auf welche Temperatur ϑ_2 muß der Kessel erwärmt werden, damit der Druck auf $p_2 = 10 \text{ bar}$ steigt?

-Welche Wärmemenge muß dazu zugeführt werden?

Lösung: $\vartheta_2 = 313,15^\circ\text{C}$ $Q_{1,2} = 2498,26 \text{ kJ}$

Übungsbeispiel 19

In einem Wärmeübertrager werden bei konstantem Druck stündlich 50000 kg Gas ($c_{pm} = 1,26 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$) von 70°C auf 30°C durch Wasser gekühlt, das sich dabei von 22°C auf 32°C aufwärmt.

Wieviel Wasser ist stündlich erforderlich?

Wie ändern sich innere Energie und Enthalpie des Gases ($c_{vm} = 0,9 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$)?

Lösung: $m_{\text{Wasser}} = 60264 \text{ kg/h}$, $U_2 - U_1 = -1,8 \text{ GJ/h}$, $H_2 - H_1 = -2,5 \text{ GJ/h}$

Übungsbeispiel 20

1 kg Luft von 0°C und 1 bar soll auf den 10-fachen Druck isentrop verdichtet werden.

Es sind die Volumenänderungsarbeit, die techn. Arbeit und die Temperatur am Ende der Verdichtung zu berechnen.

$R_i = 287 \text{ J/kgK}$ $\chi = 1,4$

Lösung: $W_{v1,2} = 182,4 \text{ kJ} = 0,0507 \text{ kWh}$; $W_{t1,2} = 255,36 \text{ kJ} = 0,0709 \text{ kWh}$; $\vartheta_2 = 254,2^\circ\text{C}$.

Übungsbeispiel 21

1 kg Luft expandiert isentrop von $p_1 = 6 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 600^\circ\text{C}$ auf $p_2 = 1 \text{ bar}$.

Gesucht sind die im Prozeß gewonnene Volumenänderungsarbeit, die technische Arbeit sowie die Temperatur ϑ_2 nach Beendigung der Expansion.

Welche Volumenänderungsarbeit ergäbe sich, wenn die Expansion isotherm erfolgen würde (für beide Prozesse ist das gleiche Endvolumen V_2 vorauszusetzen)?

Beide Prozesse sind im p-v Diagramm zu skizzieren.

$R_i = 287 \text{ J/kgK}$ $\chi = 1,4$

Lösung: isentrop $W_{v1,2\text{isentrop.}} = -251,02 \text{ kJ}$ $W_{t1,2} = -351,42 \text{ kJ}$ $\vartheta_2 = 250,16^\circ\text{C}$
isotherm $W_{v1,2\text{isoth.}} = -320,19 \text{ kJ}$ $W_{t1,2} = W_{v1,2}$ $\vartheta_2 = 600^\circ\text{C}$

Übungsbeispiel 22

1 kg Luft von $\vartheta_1 = 0^\circ\text{C}$ und $p_1 = 1 \text{ bar}$ wird isotherm auf den 10-fachen Druck p_2 komprimiert.

Danach werden entweder

1. bei konst. Druck p_2 , oder
2. bei konst. Volumen v_2

$Q_{2,3} = 420 \text{ kJ}$ zugeführt.

Es sind für beide Alternativen zu berechnen:

-insgesamt ($1 \rightarrow 3$) zuzuführende Volumenänderungs- bzw. techn. Arbeit,

-Zustandsgrößen p_3 , v_3 , T_3 beider Endzustände,

-Entropieänderung insgesamt und pro Zustandsänderung

-Skizzieren Sie die Zustandsänderungen im p-v- und im T-s-Diagramm

$R_i = 287 \text{ J/kgK}$ $\chi = 1,4$

Lösung:

isobar $W_{v1,3} = 60,45 \text{ kJ}$; $W_{t1,3} = 180,5 \text{ kJ}$; $T_3 = 691,48 \text{ K}$; $p_3 = 10 \text{ bar}$; $v_3 = 0,198 \text{ m}^3/\text{kg}$
isochor $W_{v1,3} = 180,5 \text{ kJ}$; $W_{t1,3} = 348,5 \text{ kJ}$; $T_3 = 858,52 \text{ K}$; $p_3 = 31,43 \text{ bar}$; $v_3 = 0,0784 \text{ m}^3/\text{kg}$
 $S_{1,2} = -0,66 \text{ kJ/K}$ isobar $S_{2,3} = +0,933 \text{ kJ/K}$ isochor $S_{2,3} = +0,821 \text{ kJ/K}$

Übungsbeispiel 23

Ein mit Stickstoff gefüllter Zylinder von $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$ Inhalt hat einen Zustand $p_1 = 12 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 150^\circ\text{C}$. Das Gas soll sich polytrop auf das 2,5-fache seines Anfangsvolumens entspannen.

Polytropenexponent $n = 1,3$ Isentropenexponent $\chi = 1,4$ $c_{pm} = 1,00 \text{ kJ/kgK}$

Es sind zu berechnen:

1. Enddruck und Endtemperatur des Gases (Lösung: $p_2 = 3,65 \text{ bar}$, $\vartheta_2 = 48,3^\circ\text{C}$)
2. Volumenänderungsarbeit (Lösung: $W_{v1,2} = -96,0 \text{ kJ}$),

3. die während der Entspannung zuzuführende Wärmemenge (Lösung: $Q_{1,2} = + 24,0 \text{ kJ}$).

Übungsbeispiel 24

Es ist ein Kreisprozeß nach Joule, bestehend aus 2 Isentropen und 2 Isobaren zu berechnen.

Angesaugt wird Luft von $p_1 = 1 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 60^\circ\text{C}$, die auf $p_2 = 35 \text{ bar}$ verdichtet wird. Während der isobaren Zustandsänderung wird eine spezifische Wärmemenge von $q = 1200 \text{ kJ/kg}$ zugeführt.

$$R_i = 287 \text{ J/kgK} \quad \chi = 1,4$$

Berechnen Sie:

1. die spezifische Nutzarbeit des Kreisprozesses (Lösung: $w_{\text{in}} = 765,5 \text{ kJ/kg}$)
2. die abgeführte spezifische Wärmemenge (Lösung: $q = 434,5 \text{ kJ/kg}$)
3. spezifisches Volumen im Ansaugzustand (Lösung: $v_1 = 0,9557 \text{ m}^3/\text{kg}$)
4. Temperatur des Gases nach der isentropen Verdichtung (Lösung: $T = 919^\circ\text{K}$)
5. den thermischen Wirkungsgrad des Prozesses (Lösung: $\eta_{\text{th}} = 0,638$)

Übungsbeispiel 25

Es soll ein Kreisprozeß mit Luft als idealem Gas entwickelt werden. Der gedachte Prozeß besteht aus folgenden Zustandsänderungen:

1- 2 Das Gas wird von $p_1 = 1 \text{ bar}$ und 20°C auf $p_2 = 3,5 \text{ bar}$ verdichtet.

2- 3 bei isobarer Wärmezufuhr verdoppelt sich das Volumen

3- 4 das Gas expandiert isotherm auf den Druck $p_4 = 1 \text{ bar}$

4- 1 bei isobarer Wärmeabfuhr wird das Gas auf den Anfangszustand zurückgeführt

$$\chi = 1,4 \quad c_p = 1,0 \text{ kJ/kgK} \quad M = 29 \text{ kg/kmol} \quad R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

Stellen Sie den Prozeß im p-v und im T-s Diagramm dar und berechnen Sie:

1. die Temperatur des Gases nach der isentropen Verdichtung (Lösung: $\vartheta = 146,3^\circ\text{C}$)
2. die während des Kreisprozesses abgegebene techn. Arbeit (Lösung: $w_t = 174,9 \text{ kJ/kg}$)
3. den thermischen Wirkungsgrad des Prozesses (Lösung: $\eta = 24\%$)
4. Vergleichen Sie den thermischen Wirkungsgrad für den oben beschriebenen Prozeß mit dem des Carnot-Prozesses (Lösung: Carnot $\eta = 65,3\%$)

Übungsbeispiel 26

Heißdampf von $p_1 = 7 \text{ bar}$ und $\vartheta_1 = 350^\circ\text{C}$ soll in einer einfachen Düse unter der Voraussetzung isentroper Entspannung und reibungsfreier Strömung auf den Druck $p_2 = 5 \text{ bar}$ entspannt werden. Der Massenstrom beträgt 750 kg/h .

$$\text{spezif. Wärmekapazität Heißdampf } 2,0 \text{ kJ/kgK} \quad \chi = 1,33$$

Berechnen Sie

1. die Geschwindigkeit des Dampfes am Austritt der Düse (Lösung: $w = 431 \text{ m/s}$)
2. den Durchmesser der Düse am Austritt (Lösung: $d = 18 \text{ mm}$).

Übungsbeispiel 27

Heißdampf entspr. Aufgabe 17 soll auf den Druck $p_2 = 1 \text{ bar}$ entspannt werden.

Berechnen Sie

1. die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt (Lösung: $w = 573 \text{ m/s}$)
2. die Geschwindigkeit am Austritt der Düse (Lösung: $w = 942,5 \text{ m/s}$)
3. den Durchmesser der Düse am Austritt (Lösung: $d = 158,7 \text{ mm}$).

Übungsbeispiel 28

Der Zylinder eines gekühlten CO₂-Verdichters hat ein Volumen von $V = 0,005 \text{ m}^3$ Inhalt. Der Verdichter saugt das Gas bei einem Druck $p_1 = 1 \text{ bar}$ und $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ an. Der Verdichter nimmt je Verdichtungsstoß eine Volumenänderungsarbeit von $1,4 \text{ Wh}$ auf. Die Temperatur des verdichteten Gases beträgt 85°C .

Welche Wärmemenge in kJ wird bei jedem Verdichtungsstoß durch die Kühlung abgeführt?

Molmasse CO₂ = 44 kg/kmol, $c_{pm} = 0,82 \text{ kJ/kgK}$ $\chi = 1,3$

Lösung: $m = 0,092 \text{ kg}$, $q = 10,6 \text{ kJ/kg}$, $Q = 0,98 \text{ kJ/Verdichtungsstoß}$.

Übungsbeispiel 29

Ein Verdichter saugt $0,15 \text{ kg/s}$ CO₂-Gas bei einer Temperatur von $p_1 = 1 \text{ bar}$ und 15°C an und verdichtet das Gas isentrop auf $p_2 = 12 \text{ bar}$. In einem nachfolgenden Wärmetauscher wird das Gas isobar auf $\vartheta = 35^\circ\text{C}$ gekühlt. (Das System ist als quasi-offenes System zu betrachten).

Stoffwerte: Molmasse CO₂ = 44 kg/kmol, $c_{pm} = 0,82 \text{ kJ/kgK}$ $\chi = 1,3$

Es sind zu berechnen:

1. die Temperatur des Gases nach der Verdichtung (Lösung: $\vartheta = 238^\circ\text{C}$)
2. die mit der Verdichtung zugeführte Leistung (techn. Arbeit/Zeit) (Lösung: $W_t = 27,4 \text{ kW}$),
3. den im Wärmetauscher abgeführten Wärmestrom (Lösung: $Q = 98751 \text{ kJ/h}$).

Übungsbeispiel 30

Es soll eine Kälteanlage mit Luft als idealem Gas entwickelt werden. Der gedachte Prozeß besteht aus folgenden Zustandsänderungen:

- 1→2 isobare Wärmezufuhr beim Druck $p = 1 \text{ bar}$,
- 2→3 isotherme Kompression bei der Temperatur $T = 300 \text{ K}$,
- 3→4 isobare Wärmeabgabe, wobei die Temperatur auf 240 K sinkt,
- 4→1 isentrope Expansion, wobei die Temperatur auf 160 K sinkt.

Es sind zu bestimmen:

1. die spezifische Kälteleistung (Wärmezufuhr während der Zustandsänderung 1→2) (Lösung: $q = 140 \text{ kJ/kg}$),
2. der maximale Arbeitsdruck (Lösung: $p = 4,13 \text{ bar}$),
3. die zugeführte spezifische technische Arbeit (Lösung: $w_t = 41,6 \text{ kJ/kg}$),
4. die Leistungsziffer (Lösung: $\varepsilon = 3,37$).

Übungsbeispiel 31

500 kg Aluminium sind durch Wärmezufuhr von 350°C auf 500°C zu erwärmen. Berechnen Sie die mittlere spezifische Wärmekapazität im angegebenen Temperaturbereich ($c_{Al} = 0,9 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$ für $\vartheta = 0^\circ\text{C}$). Welche Wärmemenge ist zuzuführen?

Lösung: $c_{m\ 350-500} = 1,0564 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$, $Q_{1,2} = 79230 \text{ kJ}$

Übungsbeispiel 32

Einem System werden $0,222 \text{ kWh}$ elektrischer Arbeit und 40000 Ws an Wellenarbeit (Rührer) zugeführt, gleichzeitig werden 100000 Nm Volumenänderungsarbeit abgeführt. Wie groß ist die Änderung der inneren Energie in J?

Lösung: $U_2 - U_1 = 739200 \text{ J}$.

Übungsbeispiel 33

1 kg Luft (ideales Gas) mit der Temperatur $T_1 = 300 \text{ K}$ werden in einem Behälter adiabat (gegenüber der Umgebung) mit 1 kg Luft mit der Temperatur $T_2 = 100 \text{ K}$ gemischt. Die mittlere spezifische Wärmekapazität von Luft im Bereich 0°C bis 300°C beträgt $c_{pm} = 1,019 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$, die Gaskonstante $R_i = 287,2 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$.

Welche Mischungstemperatur stellt sich ein?

Welche Entropieänderung ergibt sich bei isochorer und alternativ bei isobarer Vermischung ?

In welchem Fall ist der Mischungsvorgang reversibel, in welchem irreversibel?

Lösung: $T_m = 200 \text{ K}$, isochor: $S_{\text{nach}} - S_{\text{vor}} = +0,21 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$, isobar: $S_{\text{nach}} - S_{\text{vor}} = +0,29 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$
In beiden Fällen ist der Vorgang irreversibel.

Übungsbeispiel 34

In einem adiabaten Behälter von $V = 2 \text{ m}^3$ befindet sich trockene Luft (ideales Gas) mit einem Druck von 6 bar und $\vartheta = 25^\circ\text{C}$. Über eine elektrische Heizung werden 520 kJ Energie zugeführt. ($R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $\chi = 1,4$).

Berechnen Sie: m , c_v , v , T_2 , p_2 , $w_{t1,2}$, $q_{1,2}$, $s_{1,2}$

Lösung: $m = 14 \text{ kg}$, $v = 0,143 \text{ m}^3/\text{kg}$, $c_v = 717,5 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $T_2 = 349,7 \text{ K}$, $p_2 = 7 \text{ bar}$, $q_{1,2} = 37 \text{ kJ/kg}$, $w_{t1,2} = 14,9 \text{ kJ/kg}$, $s_{1,2} = 114,7 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$

Übungsbeispiel 35

2 m^3 trockene Luft mit 6 bar und 25°C sollen isobar auf $76,65^\circ\text{C}$ erwärmt werden.

($R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $\chi = 1,4$).

Berechnen Sie : m , V_2 , $Q_{1,2}$, $W_{v1,2}$, $s_{1,2}$

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit Beispiel 34 und begründen Sie die Unterschiede!

Lösung: $m = 14 \text{ kg}$, $V_2 = 2,35 \text{ m}^3$, $Q_{1,2} = 728 \text{ kJ}$, $W_{v1,2} = -208,2 \text{ kJ}$, $s_{1,2} = 160,6 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$

Übungsbeispiel 36

In einem Zylinder mit $V_1 = 1 \text{ dm}^3$ befindet sich trockene Luft von 20°C bei 1 bar. Sie wird reversibel durch den Kolben auf $0,1 \text{ dm}^3$ komprimiert, wobei die Temperatur konstant bleibt.

($R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $\chi = 1,4$).

Berechnen Sie: m , v_1 , v_2 , p_2 , $q_{1,2}$, $w_{v1,2}$, $s_{1,2}$

Lösung: $m = 1,19 \text{ g}$, $v_1 = 0,84 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_2 = 0,084 \text{ m}^3/\text{kg}$, $p_2 = 10 \text{ bar}$, $q_{1,2} = -193,6 \text{ kJ/kg}$, $w_{v1,2} = 193,6 \text{ kJ/kg}$, $s_{1,2} = -660,8 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$

Übungsbeispiel 37

1 dm^3 trockene Luft mit $T_1 = 293 \text{ K}$ und $p_1 = 1 \text{ bar}$ ($R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $\chi = 1,4$) wird isentrop auf $V_2 = 0,1 \text{ dm}^3$ verdichtet.

Berechnen Sie: m , v_1 , v_2 , p_2 , T_2 , $w_{v1,2}$, $w_{t1,2}$, $q_{1,2}$, $s_{1,2}$

Lösung: $m = 1,19 \text{ g}$, $v_1 = 0,84 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_2 = 0,084 \text{ m}^3/\text{kg}$, $p_2 = 25,12 \text{ bar}$, $T_2 = 736 \text{ K}$, $w_{v1,2} = 317,85 \text{ kJ/kg}$, $w_{t1,2} = 445 \text{ kJ/kg}$, $q_{1,2} = 0$, $s_{1,2} = 0$

Übungsbeispiel 38

In einem Kolbenverdichter wird 1 m^3 trockene Luft von $T_1 = 93 \text{ K}$ und $p_1 = 1 \text{ bar}$ polytrop reibungsfrei auf ein Endvolumen $V_2 = 0,05 \text{ m}^3$ verdichtet. Über die Zylinderwand wird Wärme abgeführt, so dass sich eine Endtemperatur von 533 K einstellt. ($R_i = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, $\chi = 1,4$).

Berechnen Sie : n , p_2 , $w_{v1,2}$, $w_{t1,2}$, $q_{1,2}$, $s_{1,2}$

Lösung: $n = 1,2$, $p_2 = 36,4$ bar, $w_{v1,2} = 344,4$ kJ/kg, $w_{t1,2} = 413,28$ kJ/kg, $q_{1,2} = -172,2$ kJ/kg, $s_{1,2} = -430,8$ J/kg $^{\circ}$ K

Klausuraufgabe 1

In einem geschlossenen System wird ein ideales Gas vom Zustand 1 einmal isentrop, einmal isotherm auf den Druck p_2 verdichtet.

In welchem Verhältnis stehen die Volumenänderungsarbeit $W_{v1,2}$ und die techn. Arbeit $W_{t1,2}$ jeweils zueinander?

Skizzieren Sie die beiden Zustandsänderungen im p - v - und im T - s -Diagramm. Sind die Arbeiten in den Diagrammen darstellbar?

Klausuraufgabe 2

Eine Gasturbine (offenes System) saugt einen Luftstrom (ideales Gas) von 50 kg/s bei $p_1 = 1$ bar und $\vartheta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ an. Die Turbine soll eine Leistung von 20 MW abgeben. Die Abgase haben eine Temperatur $\vartheta_2 = 450^{\circ}\text{C}$.

$\chi = 1,4$ $c_{pm} = 1,0$ kJ/kgK $M = 29$ kg/kmol $R_i = 287$ J/kgK

Welche Wärmemenge in kJ/s muss der Turbine zugeführt werden?

Unter der Annahme, daß es sich in der Turbine um eine polytrope Zustandsänderung handelt, berechnen Sie:

- den Polytropenexponenten n
- den Austrittsdruck p_2
- die Entropieänderung $S_{1,2}$

Klausuraufgabe 3

In einer Anlage wird Luft (ideales Gas) von $p_1 = 3$ bar und $\vartheta_1 = 100^{\circ}\text{C}$ auf $p_2 = 1$ bar isotherm expandiert. Anschließend erfolgt eine isobare Verdichtung mit Wärmeabfuhr, wobei sich die Lufttemperatur auf $\vartheta_3 = -1^{\circ}\text{C}$ verringert.

$\chi = 1,4$ $c_{pm} = 1,0$ kJ/kgK $M = 29$ kg/kmol $R_i = 287$ J/kgK

- Ermitteln Sie die spezif. Wärmemengen $q_{1,2}$ und $q_{2,3}$. Ist Wärme zu – oder abzuführen?
- die spezif. Entropieänderungen $s_{1,2}$ und $s_{2,3}$
- skizzieren Sie die Zustandänderungen im T - s -Diagramm (einigermaßen maßstabsgetreu!)
- welche Zustandsänderung (isotherm, isochor, isobar, isentrop) wäre notwendig, um von Zustand 3 wieder den Zustand 1 zu erreichen?

Klausuraufgabe 4

Ein mit Ammoniak (ideales Gas) gefüllter Behälter mit einem Volumen $V_1 = 5,11$ Liter steht bei einer Temperatur von $\vartheta_1 = 22^{\circ}\text{C}$ unter einem Überdruck von 3,14 bar. Durch Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur auf $\vartheta_2 = 38,5^{\circ}\text{C}$.

$R_i = 0,4882$ kJ/kgK $c_{pm} = 2,056$ kJ/kgK

- Welche Masse hat die Behälterfüllung?
- Welche Werte haben die thermischen Zustandsgrößen jeweils im Zustand 1 und 2 ?
- Um wie viel hat die innere Energie der Behälterfüllung zugenommen?