Hochschule Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aufgabensammlung

Prozessthermodynamik und Stoffübertragung

Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Technische Thermodynamik

von
Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar
Dr.-Ing. S. Herrmann

Ausgabe: Sommersemester 2019

Fachgebiet Technische Thermodynamik
Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar
Dr.-Ing. S. Herrmann

Aufgabensammlung

Prozessthermodynamik und Stoffübertragung

	Seite
13. Kreisprozesse	13/1
14. Ideale Gasgemische	14/1
15. Feuchte Luft	15/1
16. Stoffübertragung	16/1
17. Thermodynamische Potential- und Fundamentalgleichungen	17/1

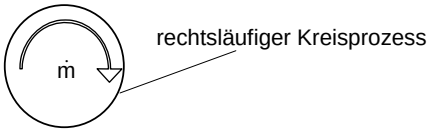
13. Kreisprozesse

Aufgabe 13.1

Bei einem rechtsläufigen Kreisprozess wird dem Arbeitsfluid ein Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$ = 100 kJ/s zugeführt. Die Leistung des Kreisprozesses beträgt P_{KP} = –10 kW.

a) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} ?

b) Welcher Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$ wird vom Arbeitsfluid abgegeben ?



Lösung: a) η_{th} = 0,10

b) $\dot{Q}_{ab}$ = –90 kW

Aufgabe 13.2

Ein Gasturbinenkraftwerk ist durch folgende Parameter gekennzeichnet: p_{min} = 0,1 MPa, p_{max} = 1,5 MPa, ϑ_{min} = 20 °C und ϑ_{max} = 1200 °C. Der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters beträgt 0,82 und der der Turbine 0,87. Die Kreisprozessleistung soll P_{KP} = –5 MW betragen. Näherungsweise darf der Kreisprozess für das Arbeitsfluid Luft berechnet werden, wobei die Luft als ideales Gas mit einem konstanten Mittelwert für die spezifische isobare Wärmekapazität, bestimmt aus der minimalen und maximalen Prozesstemperatur, zu betrachten ist.

(Für die Berechnung von T_{2s} und T_{4s} darf die Gleichung für die Isentrope mit c_p und berechnetem κ = const verwendet werden.)

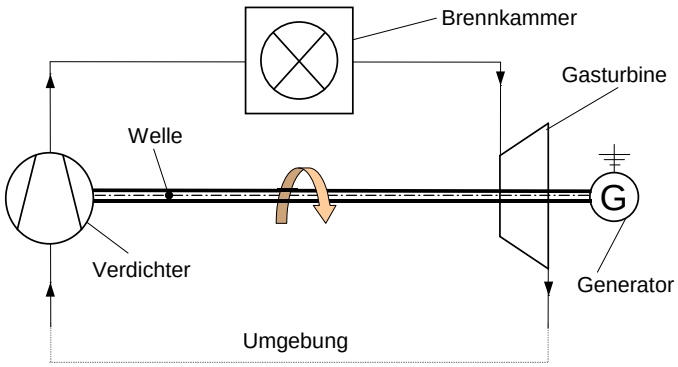
a) Stellen Sie die Zustandsverläufe qualitativ im p,v- und T,s-Diagramm dar und zeichnen Sie das Schaltschema !

b) Berechnen Sie die spezifischen Wärmen q_{zu} und q_{ab}, die spezifische Kreisprozessarbeit w_{KP} sowie den thermischen Wirkungsgrad η_{th} !

c) Welcher Massestrom $\dot{m}$ ist erforderlich ?

d) Ermitteln Sie für den analogen *Carnot*-Prozess den thermischen Wirkungsgrad $\eta_{th}^{C,analog}$ und vergleichen Sie ihn mit dem des realen Prozesses, indem Sie den Kreisprozessgütegrad ν_{th} berechnen !

e) Berechnen Sie außerdem b) bis d) für die noch weitergehende Näherung mit temperaturunabhängigen Festwerten c_p und κ = const für den gesamten Prozess !



Lösung:

b) q_{zu} = 902,54 kJ/kg
q_{ab} = –589,90 kJ/kg
w_{KP} = –312,65 kJ/kg
η_{th} = 0,346

c) $\dot{m}$ = 15,99 kg/s

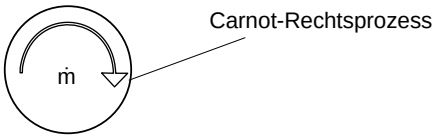
d) $\eta_{th}^{C,analog}$ = 0,491
ν_{th} = 0,705

e) q_{zu} = 766,20 kJ/kg q_{ab} = –491,94 kJ/kg w_{KP} = –274,26 kJ/kg
η_{th} = 0,358 $\dot{m}$ = 18,23 kg/s $\eta_{th}^{C,analog}$ = 0,523 ν_{th} = 0,684

Aufgabe 13.3

Ein theoretischer *Carnot*-Rechtsprozess wird mit Luft $\dot{m}$ = 2 kg/s im idealen Gaszustand (c_p, κ = const) zwischen zwei Energiereservoiren mit den konstanten Temperaturen ϑ_{max} = 300 °C und ϑ_{min} = 20 °C angenommen. Als Enddruck der isothermen Verdichtung und Entspannung soll jeweils 0,7 MPa erreicht werden.

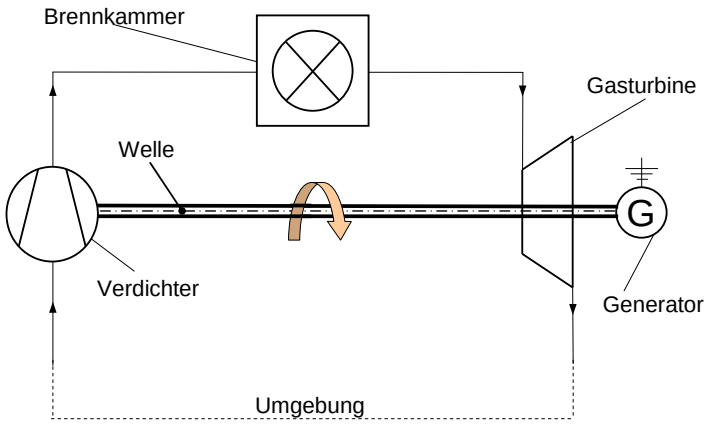
a) Stellen Sie die Zustandsverläufe qualitativ im p,v- und T,s-Diagramm dar !
b) Berechnen Sie die theoretische Kreisprozessarbeitsleistung P_{KP} !
c) Ermitteln Sie den thermischen Wirkungsgrad η_{th} !



Lösung: b) P_{KP} = –377,3 kW
c) η_{th} = 0,489

Aufgabe 13.4

Bei einfachen Gasturbinenanlagen dient der reversible *Joule*-Prozess mit Luft als Vergleichsprozess. Folgende Prozesspunkte sind bekannt: für den Zustand vor der Verdichtung p_1 = 0,1 MPa und ϑ_1 = 20 °C, für den Zustand nach der Verdichtung p_2 = 3 MPa und für den Zustand nach der Brennkammer ϑ_3 = 1500 °C (Luft darf als ideales Gas mit temperaturunabhängigen Festwerten c_p, κ = const im gesamten Kreisprozess berechnet werden.).

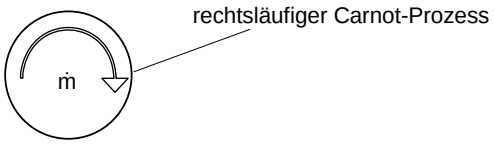


a) Die Zustandsverläufe sind qualitativ im p,v- und T,s-Diagramm darzustellen !
b) Ermitteln Sie die spezifischen Wärmen q_{zu} und q_{ab} !
c) Berechnen Sie die spezifische Kreisprozessarbeit w_{KP} !
d) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} ?
e) Berechnen Sie für den analogen *Carnot*-Prozess den thermischen Wirkungsgrad $\eta_{th}^{C,analog}$ sowie den Kreisprozessgütegrad ν_{th} des *Joule*-Prozesses zu diesem *Carnot*-Prozess !

Lösung: b) q_{zu} = 1003,31 kJ/kg q_{ab} = –379,66 kJ/kg
c) w_{KP} = –623,64 kJ/kg d) η_{th} = 0,622
e) $\eta_{th}^{C,analog}$ = 0,622 ν_{th} = 1

Aufgabe 13.5

Bei einem angenommenen rechtsläufigen *Carnot*-Prozess weist die spezifische Kreisprozessarbeit den Wert $w_{KP} = -50$ kJ/kg auf. Die Wärmezufuhr erfolgt bei $T^m_{qzu} = 800$ K, die Wärmeabfuhr bei $T^m_{qab} = 300$ K.

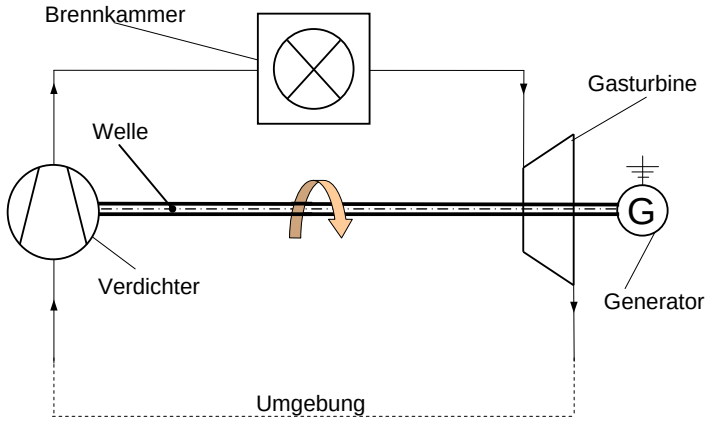


a) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} ?
b) Wie groß ist die spezifische zugeführte Wärme q_{zu} ?

Lösung: a) $\eta_{th} = 0{,}625$ b) $q_{zu} = 80$ kJ/kg

Aufgabe 13.6

Für einen Gasturbinen-*Joule*-Prozess sind nachstehende minimale und maximale Werte der Prozessparameter bekannt:
$p_{min} = 0{,}1$ MPa, $p_{max} = 3{,}5$ MPa, $\vartheta_{min} = 20$ °C und $\vartheta_{max} = 1200$ °C.
Der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters beträgt 0,8 und der der Turbine 0,85. Die Kreisprozessarbeitsleistung beträgt $P_{KP} = -200$ MW.
Näherungsweise darf der gesamte Kreisprozess mit dem Arbeitsfluid Luft (reales Fluid) berechnet werden.



a) Stellen Sie die Zustandsverläufe qualitativ im p,v- und im T,s-Diagramm dar !
b) Berechnen Sie die spezifischen Wärmen q_{zu} und q_{ab} sowie die spezifische Kreisprozessarbeit w_{KP} !
c) Ermitteln Sie den Massestrom $\dot{m}$ des Arbeitsfluids !
d) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} ?
e) Ermitteln Sie für den analogen *Carnot*-Prozess den thermischen Wirkungsgrad $\eta^{C,analog}_{th}$ und vergleichen Sie ihn mit dem des realen Prozesses, indem Sie den Kreisprozessgütegrad ν_{th} berechnen !

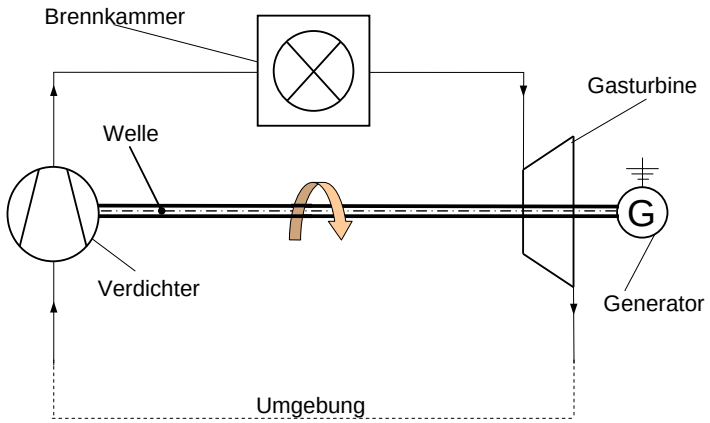
Lösung: b) $q_{zu} = 667{,}64$ kJ/kg $q_{ab} = -461{,}18$ kJ/kg $w_{KP} = -206{,}46$ kJ/kg
c) $\dot{m} = 968{,}71$ kg/s d) $\eta_{th} = 0{,}309$
e) $\eta^{C,analog}_{th} = 0{,}585$ $\nu_{th} = 0{,}529$

Aufgabe 13.7

Ein als reversibel arbeitend angenommenes Gasturbinenkraftwerk besitzt folgende Prozessparameter :

- Zustand vor der Verdichtung: $p_1 = 0{,}1$ MPa und $\vartheta_1 = 20$ °C,
- maximale Prozesstemperatur $\vartheta_{max} = 900$ °C,
- Druckverhältnis $\pi = \frac{p_2}{p_1} = 4{,}5$.

Als Arbeitsmittel für den gesamten Kreisprozess ist Luft im idealen Gaszustand mit temperaturunabhängigen Festwerten c_p, κ = const anzunehmen. Die Leistung der Anlage soll $P_{KP} = -10$ MW betragen.



Zu berechnen sind:

a) der thermische Wirkungsgrad η_{th},

b) der Massestrom $\dot{m}$,

c) der zuzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$,

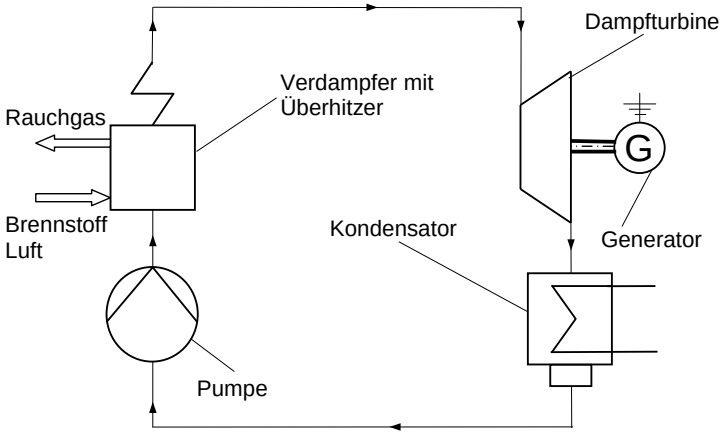
d) die Leistungen des Verdichters P_{tV} und der Turbine P_{tT} !

Lösung: a) $\eta_{th} = 0{,}349$ b) $\dot{m} = 39{,}42$ kg/s c) $\dot{Q}_{zu} = 28{,}63$ MW

d) $P_{tV} = 6{,}23$ MW $P_{tT} = -16{,}23$ MW

Aufgabe 13.8

Das Arbeitsmittel Wasser durchläuft in einem Dampfkraftwerk einen *Clausius-Rankine*-Prozess. Der Verdampferdruck beträgt p_V = 4,0 MPa, während im Kondensator ein Druck von p_K = 10 kPa herrscht. Die Eintrittstemperatur in die Turbine beträgt ϑ_1 = 450°C, wobei das Wasser als siedende Flüssigkeit in die Pumpe eintritt. Der isentrope Wirkungsgrad der Pumpe beträgt 0,8 und der der Turbine 0,85.



a) Liegt am Turbinenaustritt überhitzter Dampf oder Nassdampf vor ? Zeichnen Sie den Kreisprozess qualitativ im T,s- und h,s-Diagramm!

b) Berechnen Sie die zugeführte spezifische Wärme q_{zu}, die abgeführte spezifische Wärme q_{ab} und die spezifische Kreisprozessarbeit w_{KP}!

c) Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} des Prozesses ?

d) Ermitteln Sie die thermodynamischen Mitteltemperaturen T^m_{qzu} und T^m_{qab}, bei denen Wärme zu- bzw. abgeführt wird !

e) Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad $\eta^{C,analog}_{th}$ des analogen *Carnot*-Prozesses zwischen den thermodynamischen Mitteltemperaturen und den Gütegrad des berechneten *Clausius-Rankine*-Prozesses !

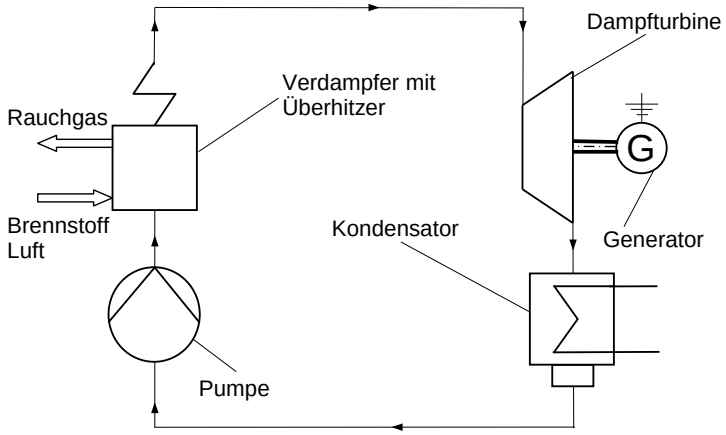
Lösung: b) q_{zu} = 3134,11 kJ/kg q_{ab} = –2175,93 kJ/kg w_{KP} = –958,18 kJ/kg

c) η_{th} = 0,306 d) T^m_{qzu} = 498,59 K T^m_{qab} = 318,96 K

e) $\eta^{C,analog}_{th}$ = 0,360 ν_{th} = 0,85

Aufgabe 13.9

Bei einem *Clausius-Rankine*-Prozess eines Dampfkraftwerkes mit dem Arbeitsmittel Wasser beträgt der Massestrom $\dot{m} = 50$ kg/s, die Heißdampftemperatur $\vartheta_1 = 500$ °C, der Druck im Dampferzeuger 10 MPa und der Druck im Kondensator 5 kPa. Das Wasser tritt als siedende Flüssigkeit in die Pumpe ein. In erster Näherung können Pumpe und Turbine als adiabat und reversibel arbeitend angesehen werden.

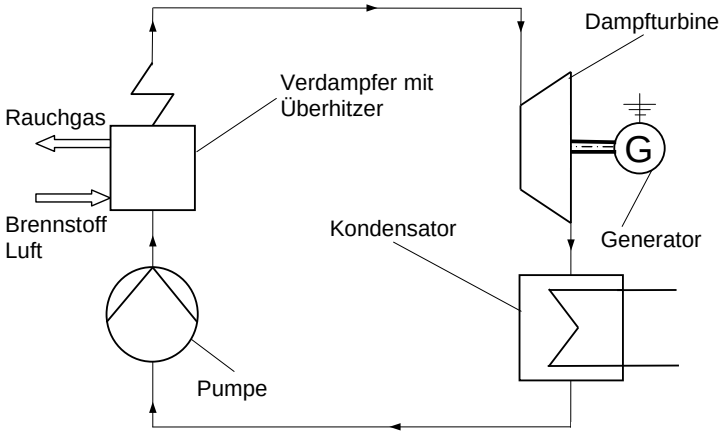


a) Zeichnen Sie den Kreisprozess qualitativ im T,s- und h,s-Diagramm !
Zu berechnen sind:
b) die Speisepumpenleistung P_{tP},
c) der Austrittzustand aus der Turbine, dabei die Dampfzustandsgrößen ϑ_2 und h_2,
und für den Fall, dass Nassdampf vorliegt x_2,
d) die Leistung der Turbine P_{tT},
e) der zugeführte Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$,
f) die spezifische Kreisprozessarbeit w_{KP},
g) der thermische Wirkungsgrad η_{th} unter Verwendung
- der Energieströme,
- der thermodynamischen Mitteltemperaturen bei Wärmezufuhr und -abfuhr.

Lösung: b) $P_{tP} = 503{,}20$ kW c) $x_2 = 0{,}773$ $\vartheta_2 = 32{,}9$ °C $h_2 = 2011{,}58$ kJ/kg
d) $P_{tT} = -68{,}17$ MW e) $\dot{Q}_{zu} = 161{,}36$ MW f) $w_{KP} = -1353{,}4$ kJ/kg
g) $\eta_{th} = 0{,}4194$ (unter Verwendung der Energieströme)
$\eta_{th} = 0{,}4194$ (unter Verwendung der thermodyn. Mitteltemperaturen)

Aufgabe 13.10

In einem mit dem Arbeitsfluid Wasser betriebenen Dampfkraftwerk gibt die Turbine eine effektive Leistung $P_{tT} = -100$ MW ab. Der Dampfzustand am Turbineneintritt ist durch $p_1 = 14{,}0$ MPa und $\vartheta_1 = 550$ °C festgelegt. Im Kondensator herrscht ein Druck $p_2 = 4{,}0$ kPa, wobei eine vollständige Kondensation erfolgt. Der isentrope Wirkungsgrad der Dampfturbine beträgt 0,8. Die Speisepumpenarbeit kann vernachlässigt werden.



a) Stellen Sie den Zustandsverlauf des Arbeitsmittels qualitativ im T,s- und h,s-Diagramm dar!

Berechnen Sie:

b) die zuzuführende spezifische Wärme q_{zu},

c) die im Kondensator abzuführende spezifische Wärme q_{ab},

d) den thermischen Wirkungsgrad η_{th},

e) den Massestrom $\dot{m}$ des Arbeitsfluids,

f) die thermodynamischen Mitteltemperaturen T^m_{qzu} und T^m_{qab} des Arbeitsmittels bei der Wärmezufuhr- und -abfuhr sowie den thermischen Wirkungsgrad des analogen *Carnot*-Prozesses und den Kreisprozessgütegrad !

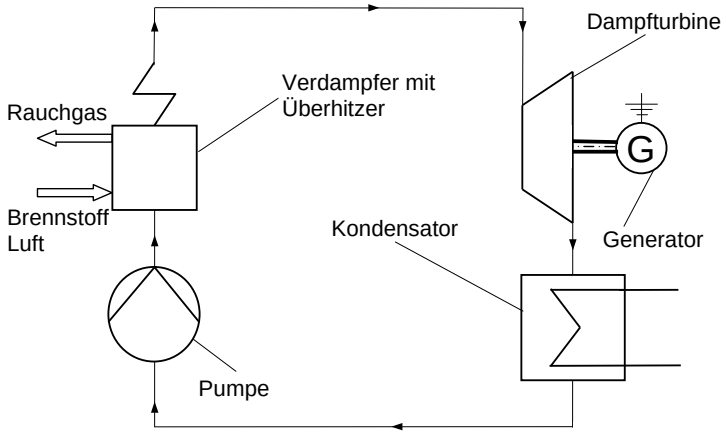
Lösung: b) $q_{zu} = 3339{,}58$ kJ/kg c) $q_{ab} = -2152{,}45$ kJ/kg d) $\eta_{th} = 0{,}355$

e) $\dot{m} = 84{,}24$ kg/s f) $T^m_{qzu} = 543{,}70$ K $T^m_{qab} = 302{,}11$ K

$\eta^{C,ana\,log}_{th} = 0{,}444$ $\nu_{th} = 0{,}80$

Aufgabe 13.11

Ein Heizkraftwerk ist mit einer Dampfturbine ausgerüstet. Die Frischdampfparameter sind durch $p_1 = 8{,}0$ MPa und $\vartheta_1 = 500$ °C festgelegt. Der Druck am Turbinenausgang beträgt $p_2 = 1{,}0$ MPa. Die Turbine hat einen isentropen Wirkungsgrad $\eta_{sT} = 0{,}8$. Im Kondensator wird der Wassermassestrom $\dot{m}_W = 300$ kg/s eines Fernwärmenetzes von $\vartheta_{W1} = 80$ °C auf $\vartheta_{W2} = 150$ °C aufgewärmt, wobei der Dampf vollständig kondensiert. Der Dampferzeuger hat einen Wirkungsgrad $\eta_{DE} = 0{,}83$. Als Brennstoff wird Rohbraunkohle aus der Lausitz verwendet. Die Leistung der Speisepumpe kann vernachlässigt werden (Das Heißwasser des Fernwärmenetzes darf als ideale Flüssigkeit betrachtet werden.).



Zu berechnen sind:

a) die Zustandsgrößen h_2 und s_2,

b) der Massestrom $\dot{m}$,

c) die technische Turbinenleistung P_{tT},

d) der im Dampferzeuger zu übertragende Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$,

e) der Brennstoffmassestrom $\dot{m}_B$.

Lösung: a) $h_2 = 2954{,}32$ kJ/kg $\quad s_2 = 6{,}948$ kJ/(kg·K) b) $\dot{m} = 40{,}696$ kg/s

c) $P_{tT} = -18{,}11$ MW $\quad$ d) $\dot{Q}_{zu} = 107{,}30$ MW $\quad$ e) $\dot{m}_B = 15{,}209$ kg/s

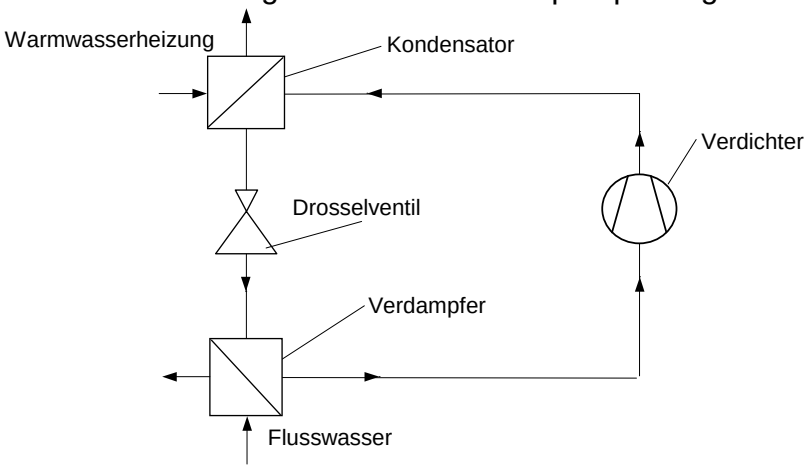
Aufgabe 13.12

Die Heizleistung der Warmwasserheizung eines Gebäudes beträgt $\dot{Q}_H$ = 10 kW, wobei die Vorlauftemperatur ϑ_{H1} = 80 °C beträgt. Diese Heizleistung soll bei gleicher Vorlauftemperatur durch eine Wärmepumpe bereitgestellt werden. Als Wärmereservoir steht Flusswasser mit einer Temperatur $\vartheta_{Fl} = 0\,^{\circ}C$ zur Verfügung. Von der Wärmepumpe ist bekannt, dass sie 60 % der Leistungszahl $\varepsilon_{c,WP}$ eines *Carnot*-Linksprozesses zwischen den Temperaturen $T^m_{qzu} = \vartheta_{Fl}$ und $T^m_{qab} = \vartheta_{H1}$ erreicht (Für die Berechnung darf der Verdichter als adiabat und reversibel arbeitend vorausgesetzt werden.).

a) Welche Leistungszahl ε_{WP} erreicht der Prozess und welche Antriebsleistung P_{KP} ist für die Wärmepumpe erforderlich ?

b) Welcher Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$ wird dem Flusswasser entzogen ?

c) Welche elektrische Leistung P_{el} wäre vergleichsweise erforderlich, wenn eine Widerstandsheizung anstatt der Wärmepumpe eingesetzt würde ?



Lösung:

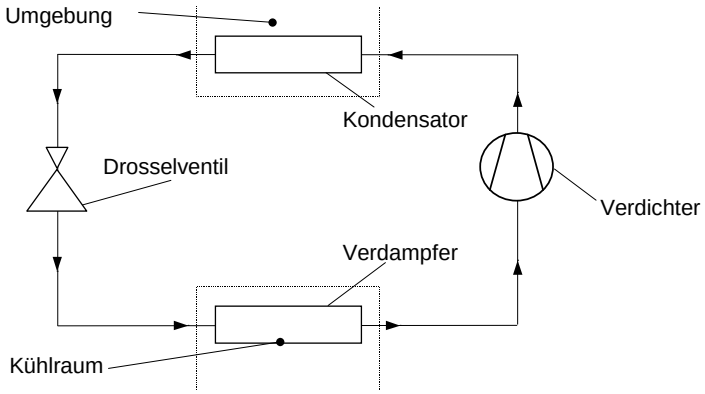
a) ε_{WP} = 2,65
P_{KP} = 3,77 kW

b) $\dot{Q}_{zu}$ = 6,23 kW

c) P_{el} = 10 kW

Aufgabe 13.13

Eine Kompressionskälteanlage erreicht 70 % der Leistungszahl eines zwischen den Temperaturen ϑ^m_{qzu} = –10 °C und ϑ^m_{qab} = 35 °C ablaufenden *Carnot*-Linksprozesses. Aus dem zu kühlenden Raum ist ein Wärmestrom $\dot{Q}_0$ = 55 kW abzuführen.



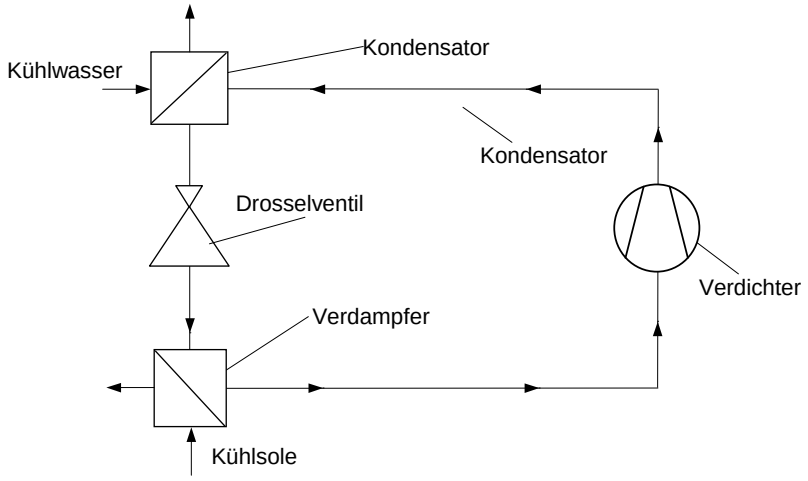
a) Wie groß ist die Leistungszahl ε_{KM} der Anlage ?

b) Welche Antriebsleistung P_{KP} ist erforderlich ?

Lösung: a) ε_{KM} = 4,09 b) P_{KP} = 13,44 kW

Aufgabe 13.14

Eine mit R 134a arbeitende Kälteanlage soll $\dot{m}_S = 1{,}4\ \mathrm{kg/s}$ Kühlsole von $\vartheta_{S1} = 2\ °C$ auf $\vartheta_{S2} = -5\ °C$ abkühlen. Die mittlere spezifische Wärmekapazität der als ideale Flüssigkeit anzusehenden Kühlsole beträgt $c_{pS} = 3{,}6\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$. Der R 134a-Dampf tritt aus dem Verdampfer als gesättigter Dampf mit der Temperatur $\vartheta_1 = -15{,}59\ °C$ aus. Er wird anschließend auf $p_k = 1\ \mathrm{MPa}$ verdichtet, durchströmt danach den Kondensator und wird isobar auf $\vartheta_3 = 15\ °C$ unterkühlt. Der Verdichter besitzt einen isentropen Wirkungsgrad $\eta_{sV} = 0{,}7$ und kann als adiabat angesehen werden. Im Drosselventil erfolgt die Entspannung auf den Verdampferdruck p_V. Der Kondensator wird von Kühlwasser durchströmt, das mit einer Temperatur $\vartheta_{W1} = 10\ °C$ eintritt und ihn mit $\vartheta_{W2} = 16\ °C$ verlässt (Das Kühlwasser darf mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit berechnet werden.).



Darzustellen bzw. zu bestimmen sind:

a) das Schaltbild der Anlage,

b) der Zustandsverlauf im lg p,h-Diagramm mit Kennzeichnung der Zustandspunkte und tabellarischer Übersicht der Zustandsgrößen (p, h, ϑ) an den Zustandspunkten,

c) die Kälteleistung $\dot{Q}_{zu}$ der Anlage,

d) der Massestrom $\dot{m}$ des Kältemittels,

e) die Leistung P_{tV} des Verdichters,

f) die Leistungszahl ε_{KM},

g) der im Kondensator abzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$,

h) der notwendige Kühlwassermassestrom $\dot{m}_W$,

i) der Gütegrad ν_{KM} im Vergleich mit dem analogen *Carnot*-Prozess.

<u>Lösung:</u> b) $h_1 = 389{,}27\ \mathrm{kJ/kg}$ $h_{2s} = 427{,}5\ \mathrm{kJ/kg}$ $h_2 = 443{,}88\ \mathrm{kJ/kg}$
$h_3 = h_4 = 220{,}55\ \mathrm{kJ/kg}$

c) $\dot{Q}_{zu} = 35{,}28\ \mathrm{kW}$ d) $\dot{m} = 0{,}209\ \mathrm{kg/s}$ e) $P_{tV} = 11{,}42\ \mathrm{kW}$

f) $\varepsilon_{KM} = 3{,}089$ g) $\dot{Q}_{ab} = -46{,}70\ \mathrm{kW}$ h) $\dot{m}_w = 1{,}86\ \mathrm{kg/s}$

i) $\nu_{KM} = 0{,}659$

Aufgabe 13.15

Die Kälteleistung einer NH_3-Kälteanlage beträgt $\dot{Q}_{zu}$ = 100 kW. Die Verdampfungstemperatur liegt bei $\vartheta_V = -33{,}59\ ^\circ C$. Der nach der Wärmeaufnahme im Verdampfer trocken gesättigte Dampf wird im Kompressor mit einem Gütegrad $\eta_{sV} = 0{,}88$ (bezogen auf die Isentrope) verdichtet. Die Kondensation erfolgt isobar bei ϑ_K = 30,93 °C. Nach der Kondensation wird das Kältemittel isobar auf ϑ_3 = 10 °C unterkühlt. Im Drosselventil erfolgt die Entspannung auf den Verdampferdruck (Der Kompressor und das Drosselventil können in erster Näherung als adiabat berechnet werden.).

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage !

Weiterhin sind zu bestimmen:

b) Verdampferdruck p_V und Kondensatordruck p_K,

c) die Enthalpien der Zustandspunkte,

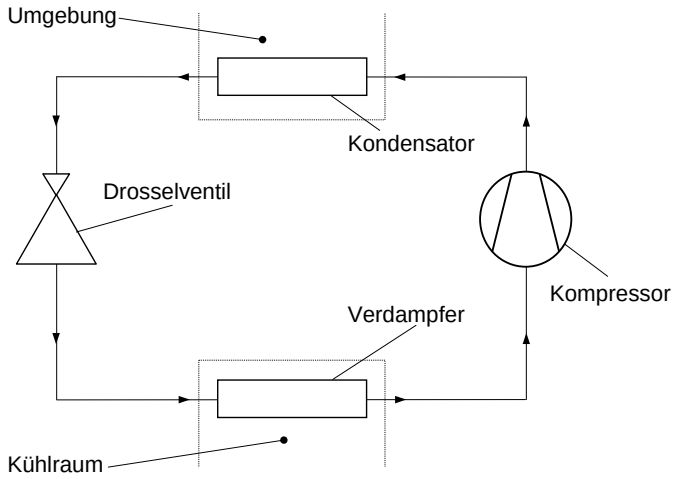
d) die Temperatur ϑ_2 am Verdichteraustritt,

e) der Massestrom $\dot{m}$ des Kältemittels,

f) die Antriebsleistung P_{tV} des Verdichters,

g) der aus dem Kondensator abzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$,

h) die Leistungszahl ε_{KM} !



Lösung: b) p_V =0,1 MPa p_K = 1,20 MPa

c) h_1 = 1417,9 kJ/kg h_{2s} = 1798,98 kJ/kg

h_2 = 1850,94 kJ/kg $h_3 = h_4$ = 246,90 kJ/kg

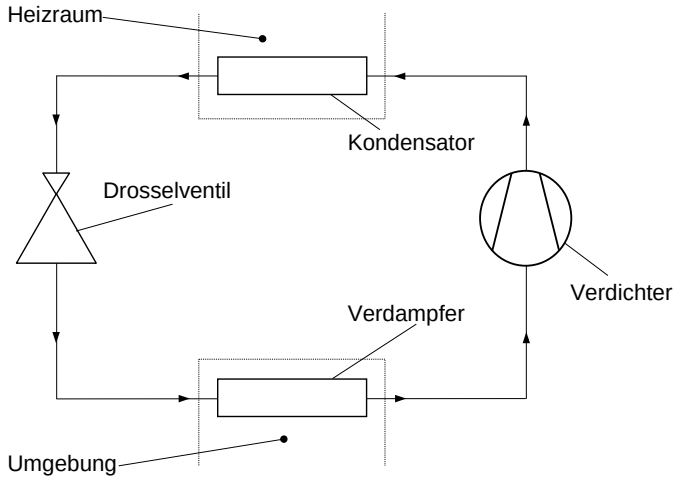
d) ϑ_2 = 169,90°C e) $\dot{m} = 0{,}0854\,kg/s$

f) P_{tV} = 36,98 kW g) $\dot{Q}_{ab}$ = –136,981 kW

h) ε_{KM} = 2,704

Aufgabe 13.16

Eine Wärmepumpe arbeitet mit R 134a nach folgendem Kreisprozess: Trocken gesättigter Dampf mit einer Temperatur $\vartheta_1 = 10{,}39$ °C wird in einem als adiabat anzusehenden Verdichter einem isentropen Wirkungsgrad $\eta_{sV} = 0{,}5$ auf den Druck p_K komprimiert. Im Kondensator wird isobar bei Siedetemperatur $\vartheta_k = 60{,}45$ °C und anschließender Unterkühlung auf $\vartheta_3 = 50$ °C die spezifische Wärme $-q_{ab}$ abgegeben. Das Arbeitsmittel wird anschließend in einem Drosselventil auf p_V entspannt, durchströmt danach den Verdampfer und nimmt hier bei konstantem Druck die spezifische Wärme q_{zu} auf.



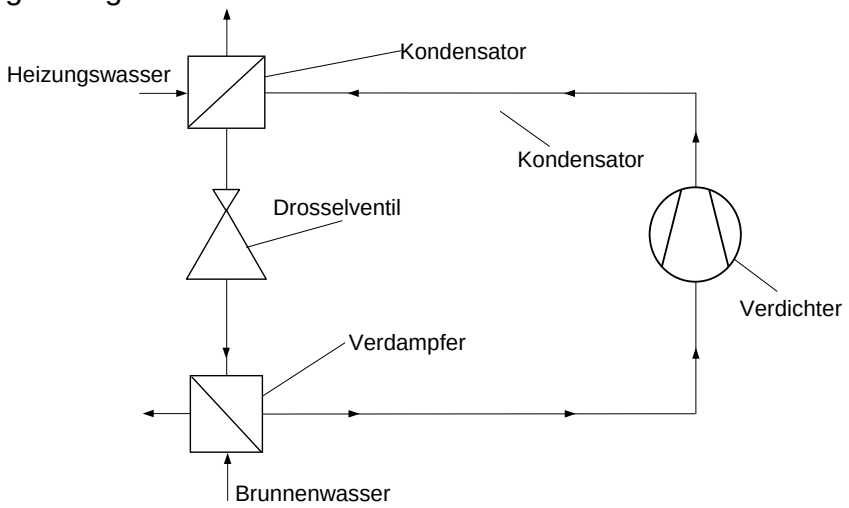
Zu bestimmen sind:

a) die Drücke p_V und p_K im Verdampfer und Kondensator sowie die Enthalpien der einzelnen Zustände,
b) die spezifische technische Arbeit w_{tV} zur Kompression,
c) der Kältemittelmassestrom $\dot{m}$, wenn vom Kondensator ein Wärmestrom $\dot{Q}_{ab} = -29$ kW an den zu beheizenden Raum abgegeben wird,
d) die erforderliche elektrische Leistung P_{el}, wenn die Beheizung des Raumes durch eine Widerstandsheizung anstatt der Wärmepumpe erfolgen würde,
e) der prozentuale Anteil der technischen Leistung zum Antrieb der Wärmepumpe im Vergleich zur elektrischen Leistung der Widerstandsheizung,
f) die Leistungszahl ε_{WP} der Wärmepumpe,
g) der Gütegrad ν_{WP} im Vergleich mit dem analogen *Carnot*-Prozess.

Lösung: a) $p_V = 0{,}42$ MPa $p_K = 1{,}70$ MPa $h_1 = 404{,}53$ kJ/kg
$h_{2s} = 433{,}4$ kJ/kg $h_2 = 462{,}27$ kJ/kg $h_3 = h_4 = 271{,}47$ kJ/kg
b) $w_{tV} = 57{,}74$ kJ/kg c) $\dot{m} = 0{,}152$ kg/s d) $P_{el} = 29$ kW
e) $P_{tV}/P_{el} = 30{,}26$ % f) $\varepsilon_{WP} = 3{,}305$ g) $\nu_{WP} = 0{,}496$

Aufgabe 13.17

Zur Beheizung eines Gebäudes wird über die gesamte Heizperiode gemittelt ein Wärmestrom von $\dot{Q}_H$ = 300 kW benötigt. Die vorhandene Heizanlage mit einem Wirkungsgrad von η_H = 50 % auf der Basis von Braunkohlenbriketts mit einem Heizwert $\Delta_H h_B = 20\ \mathrm{MJ/kg}$ soll durch eine Wärmepumpe ersetzt werden, deren Gütegrad ν_{WP} = 30 % der eines analogen *Carnot*-Prozesses zwischen den im folgenden erläuterten Temperaturen beträgt. Als Energiereservoir steht Brunnenwasser mit einer Temperatur von ϑ_W = 8 °C zur Verfügung, so dass die mittlere Temperatur bei Wärmezufuhr 3 °C beträgt. Die Raumtemperatur soll ϑ_H = 20 °C betragen, so dass die mittlere Temperatur bei Wärmeabfuhr 25 °C beträgt. Die jährliche Betriebsdauer der Heizung beträgt t = 5500 h.



a) Welche Masse Braunkohlenbriketts m_B benötigt die alte Heizanlage pro Jahr ?
b) Welche elektrische Antriebsleistung P_{el} benötigt die Wärmepumpe ?

Lösung: a) m_B = 594 t pro Jahr b) P_{el} = 73,79 kW

14. Ideale Gasgemische

Aufgabe 14.1

Ein Gasgemisch besteht aus den folgenden Massen: m_{N_2} = 2,5 kg; m_{O_2} = 1,75 kg; m_{H_2} = 0,85 kg; m_{CO_2} = 0,2 kg. Der Gesamtdruck beträgt p^* = 755 kPa.
(Das Gemisch kann bei den vorliegenden Parametern als ein ideales Gasgemisch betrachtet werden.)
Zu berechnen sind für die enthaltenen Gase:

a) die Masseanteile ξ_i ,

b) die Molanteile ψ_i ,

c) die Partialdrücke p_i !

Lösung: a) ξ_{N_2} = 0,4717 ξ_{O_2} = 0,3302 ξ_{H_2} = 0,1604 ξ_{CO_2} = 0,03774
b) ψ_{N_2} = 0,1565 ψ_{O_2} = 0,0959 ψ_{H_2} = 0,7396 ψ_{CO_2} = 0,0080
c) p_{N_2} = 118,2 kPa p_{O_2} = 72,4 kPa p_{H_2} = 558,4 kPa p_{CO_2} = 6,0 kPa

Aufgabe 14.2

Für trockene Luft mit einem Gesamtdruck p^* = 100 kPa und der Zusammensetzung ψ_{N_2} = 78,09 %, ψ_{O_2} = 20,95 %, ψ_{Ar} = 0,93 % und ψ_{CO_2} = 0,03 % sind zu berechnen:

a) die molare Masse M^*,

b) die Gaskonstante R^*,

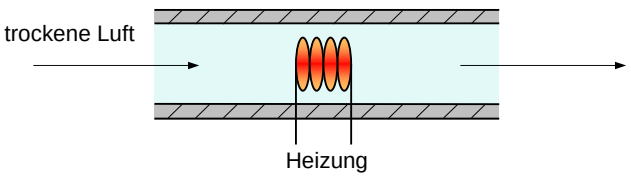
c) die Masseanteile ξ_i der Gemischpartner,

d) die Partialdrücke p_i der Gemischpartner!

Lösung: a) M^* = 28,964 kg/kmol b) R^* = 0,2871 kJ/(kg·K)
c) ξ_{N_2} = 0,7553 ξ_{O_2} = 0,2315 ξ_{Ar} = 0,0128 ξ_{CO_2} = 0,00046
d) p_{N_2} = 78,09 kPa p_{O_2} = 20,95 kPa p_{Ar} = 0,93 kPa p_{CO_2} = 0,03 kPa

Aufgabe 14.3

Trockene Luft mit der Zusammensetzung nach Aufgabe 14.2 hat eine Temperatur ϑ_1 = 0 °C .



a) Berechnen Sie die spezifische isobare Wärmekapazität c^*_{p1} !

b) Ermitteln Sie die spezifische isochore Wärmekapazität c^*_{v1} !

c) Welche spezifische Wärme q_{12} muss bei isobarer Erwärmung auf ϑ_2 = 20 °C zugeführt werden (Näherung: die spezifische isobare Wärmekapazität des Zustandes 1 darf als konstant angenommen werden.) ?

Lösung: a) c^*_{p1} = 1,0037 kJ/(kg·K) b) c^*_{v1} = 0,7167 kJ/(kg·K) c) q_{12} = 20,075 kJ/kg

Aufgabe 14.4

$\dot{V}^* = 76\ m^3/min$ eines idealen Brenngasgemisches mit $\vartheta = 20\ °C$ und $p^* = 91\ kPa$ strömen in ein Reaktionsgefäß. Das Gas hat folgende Zusammensetzung: $\psi_{H_2} = 0{,}48$, $\psi_{CH_4} = 0{,}3$, $\psi_{CO} = 0{,}1$, $\psi_{C_2H_4} = 0{,}06$, $\psi_{CO_2} = 0{,}04$, $\psi_{N_2} = 0{,}02$.
Es sind zu berechnen:

a) die Molmasse M^* des Gemisches,
b) die Masseanteile ξ_i der Gemischpartner,

c) der Massestrom $\dot{m}^*$ des Gemisches !

Lösung: a) $M^* = 12{,}585\ kg/kmol$
b) $\xi_{H_2} = 0{,}0769$ $\xi_{CH_4} = 0{,}3824$ $\xi_{CO} = 0{,}2226$
$\xi_{C_2H_4} = 0{,}1337$ $\xi_{CO_2} = 0{,}1399$ $\xi_{N_2} = 0{,}0445$
c) $\dot{m}^* = 0{,}595\ kg/s$

Aufgabe 14.5

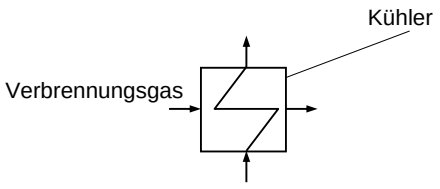
Die Analyse des Verbrennungsgasgemisches einer Anlage ergab: $\psi_{CO_2} = 0{,}118$; $\psi_{CO} = 0{,}012$; $\psi_{O_2} = 0{,}075$; $\psi_{N_2} = 0{,}795$. Es sind für das Modell ideales Gasgemisch zu berechnen:

a) die Molmasse M^*,
b) die Dichte ρ^* bei $\vartheta = 20\ °C$ und $p^* = 0{,}1\ MPa$,
c) die Dichte ρ_i der Einzelgase jeweils im Normzustand !

Lösung: a) $M^* = 30{,}20\ kg/kmol$ b) $\rho^* = 1{,}239\ kg/m^3$ c) $\rho_{CO_2,n} = 1{,}964\ kg/m^3$;
$\rho_{CO,n} = 1{,}250\ kg/m^3$; $\rho_{O_2,n} = 1{,}428\ kg/m^3$; $\rho_{N_2,n} = 1{,}250\ kg/m^3$

Aufgabe 14.6

In einen Kühler strömen $\dot{n}^* = 46\ mol/h$ Verbrennungsgasgemisch (ideales Gasgemisch) mit einer Temperatur $\vartheta_1 = 1300\ °C$ und der Zusammensetzung $\psi_{CO_2} = 0{,}084$, $\psi_{O_2} = 0{,}070$ und $\psi_{N_2} = 0{,}846$. Der abgegebene Wärmestrom beträgt $\dot{Q}_{12} = -0{,}267$ kW.
Näherungsweise darf die spezifische isobare Wärmekapazität bei Eintrittstemperatur für die Berechnung der Zustandsänderung verwendet werden.

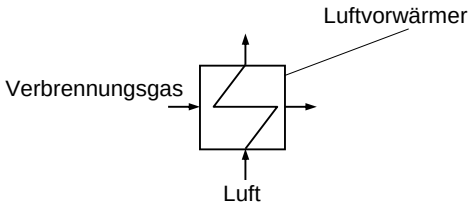


Mit welcher Temperatur ϑ_2 verlässt das Abgasgemisch den Kühler?

Lösung: $\vartheta_2 = 737{,}79\ °C$

Aufgabe 14.7

Ein ideales Verbrennungsgasgemisch einer Dampfkesselanlage mit der Zusammensetzung $\psi_{CO_2} = 0{,}1200$, $\psi_{SO_2} = 0{,}0005$, $\psi_{N_2} = 0{,}8075$, $\psi_{O_2} = 0{,}0500$ und $\psi_{H_2O} = 0{,}0220$ (Wasserdampf) kühlt sich in einem Luftvorwärmer von $\vartheta_1 = 300$ °C auf $\vartheta_2 = 160$ °C ab. Der Massestrom beträgt $\dot{m} = 3$ kg/s.

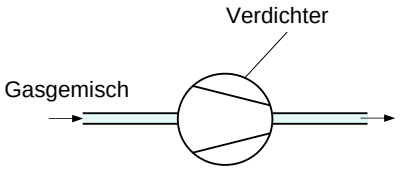


Berechnen Sie den dabei abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$!

Lösung: $\dot{Q}_{12} = -443{,}80$ kW

Aufgabe 14.8

Ein adiabater Verdichter mit einem isentropen Wirkungsgrad $\eta_s = 0{,}7$ komprimiert ein ideales Gasgemisch der Zusammensetzung $\psi_{He} = 0{,}40$, $\psi_{N_2} = 0{,}35$, $\psi_{O_2} = 0{,}25$ vom Zustand $p_1^* = 100$ kPa und $\vartheta_1 = 50$ °C auf den Enddruck $p_2^* = 0{,}6$ MPa.



Zu berechnen sind für die Näherungen c_{pmi}^{ig} und $\kappa_i = \text{const}$:

a) die Austrittstemperatur T_2,
b) die aufzuwendende spezifische technische Arbeit w_{t12},
c) die spezifische Entropieproduktion s_{12}^{irr} bei der Verdichtung
d) der spezifische Exergieverlust e_{V12} für die Umgebungstemperatur $T_u = 273{,}15$ K !

Lösung: a) $T_2 = 684{,}36$ K b) $w_{t12} = 479{,}77$ kJ/kg
c) $s_{12}^{irr} = 0{,}2290$ kJ/(kg·K) d) $e_{V12} = 62{,}54$ kJ/kg

Aufgabe 14.9

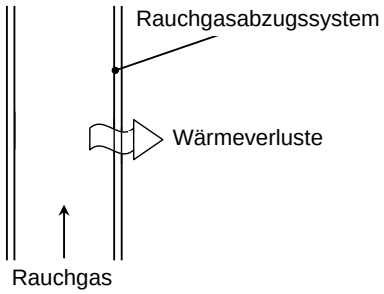
Die als ideal zu betrachtenden Gase N_2, O_2, Ar und CO_2 werden bei konstanter Temperatur und konstantem Druck adiabat gemischt. Das Gemisch hat danach die Zusammensetzung: $\xi_{N_2} = 0{,}7552$, $\xi_{O_2} = 0{,}2314$, $\xi_{Ar} = 0{,}0119$, $\xi_{CO_2} = 0{,}0015$ und darf als ideal angesehen werden.

Berechnen Sie die spezifische irreversible Mischungsentropie Δs_{irr}^* !

Lösung: $\Delta s_{irr}^* = 0{,}1632$ kJ/(kg·K)

Aufgabe 14.10

In ein Rauchgasabzugsystem strömen $\dot{V}_1^* = 300\ m^3/h$ Rauchgas mit der Temperatur $\vartheta_1 = 60\ °C$ stationär ein. Das Rauchgasgemisch besteht aus den Molanteilen $\psi_{N2} = 78\ \%$ Stickstoff und $\psi_{CO2} = 22\ \%$ Kohlendioxid. Auf Grund von Wärmeverlusten verlässt das Rauchgas das Rauchgasabzugsystem mit einer Temperatur $\vartheta_2 = 50\ °C$. Der Druck im Rauchgasabzugsystem beträgt $p^* = 0.1\ MPa$ und kann als konstant angenommen werden.
(Das Rauchgas kann mit guter Genauigkeit als ideales Gasgemisch mit $c_{pi}, \kappa_i = const$ betrachtet werden.)



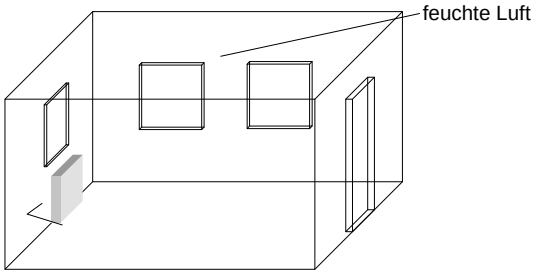
a) Berechnen Sie die molare Masse M^* und die spezifische Gaskonstante R^* des Rauchgasgemisches !
b) Ermitteln Sie die Masseanteile ξ_{N2} des Stickstoffes und ξ_{CO2} des Kohlendioxides im einströmenden Rauchgas !
c) Welche Dichte ρ_1^* hat das eintretende Rauchgasgemisch ?
d) Ermitteln Sie die mittlere spezifische Wärmekapazität c_p^* des Rauchgasgemisches !
e) Berechnen Sie den Massestrom $\dot{m}^*$ des Rauchgasgemisches !
f) Welchen Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$ gibt das Rauchgasgemisch ab ?

Lösung: a) $M^* = 31{,}53\ kg/kmol$ $R^* = 0{,}2637\ kJ/(kg\ K)$
b) $\xi_{N2} = 69{,}29\ \%$ $\xi_{CO2} = 30{,}71\ \%$
c) $\rho_1^* = 1{,}1384\ kg/m^3$ d) $c_p^* = 0{,}9712\ kJ/(kg\ K)$
e) $\dot{m}^* = 0{,}0949\ kg/s$ f) $\dot{Q}_{12} = -921{,}3\ W$

15. Feuchte Luft

Aufgabe 15.1

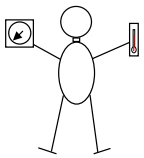
In einem Raum befindet sich feuchte Luft mit ϑ = 20 °C und einem Feuchtigkeitsgehalt x_W = 10 g/kg(L) bei einem Gesamtdruck, der näherungsweise dem Normdruck entspricht. Wie hoch muss die Oberflächentemperatur ϑ_w der Wände mindestens sein, damit sich auf ihnen keine Flüssigkeit bildet?
Lösen Sie die Aufgabe rechnerisch und parallel dazu mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm.



Lösung:
ϑ_w = 14,04 °C

Aufgabe 15.2

Von der Sie umgebenden Luft ist Ihnen die Temperatur ϑ = 20 °C und die relative Luftfeuchte φ = 60% bekannt. Der Gesamtdruck entspricht in erster Näherung dem Normdruck p_n.



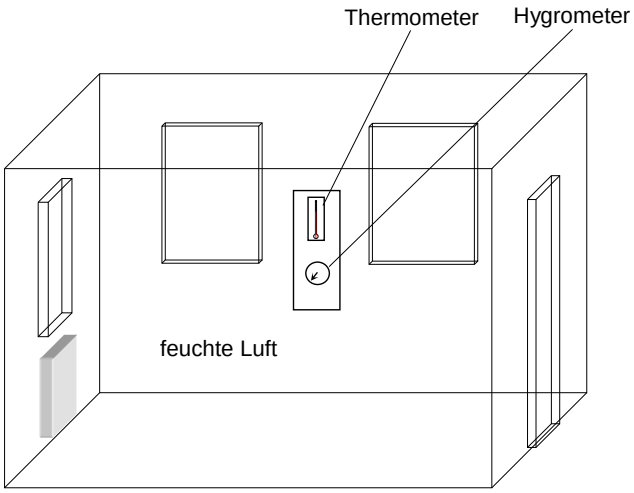
a) Handelt es sich um ungesättigte, gesättigte oder übersättigte Luft ?
b) Bestimmen Sie rechnerisch
- Partialdrücke des Wasserdampfes p_D und der trockenen Luft p_L
- Wassergehalt x_W (absolute Luftfeuchtigkeit)
- Masseanteile des Wasserdampfes ξ_W und der trockenen Luft ξ_L
- luftspezifisches Volumen v_{1+x}, spezifisches Volumen v und Dichte ρ
- luftspezifische Enthalpie h_{1+x} und spezifische Enthalpie h
- luftspezifische innere Energie u_{1+x} und spezifische innere Energie u
- luftspezifische Entropie s_{1+x} und spezifische Entropie s.

c) Bestimmen Sie, soweit möglich, die unter b) berechneten Größen mit Hilfe des h_{1+x},x_W-Diagramms !

Lösung: b) p_D = 1,403 kPa p_L = 99,922 kPa
x_W = 8,737 g/kg(L)
ξ_W = 0,00866 ξ_L = 0,99134
v_{1+x} = 0,8423 m³/kg(L) v = 0,8350 m³/kg ρ = 1,198 kg/m³
h_{1+x} = 42,38 kJ/kg(L) h = 42,01 kJ/kg
u_{1+x} = –42,97 kJ/kg(L) u = –42,60 kJ/kg
s_{1+x} = 0,3151 kJ/(kg(L)·K) s = 0,3123 kJ/(kg·K)

Aufgabe 15.3

Sie messen in einem Raum eine Temperatur ϑ = 18 °C und eine relative Luftfeuchte φ = 80 %. Der Gesamtdruck entspricht in erster Näherung dem Normdruck p_n.



a) Berechnen Sie die Masse m von V = 1 m^3 dieser Luft!
b) Berechnen Sie die Massen von trockener Luft m_L und von Wasserdampf m_W in einem Volumen V = 1 m^3 !
c) Berechnen Sie die Dichte ρ der feuchten Luft sowie die Dichten der sich darin befindlichen trockenen Luft ρ_L und des Wasserdampfes ρ_D !
d) Welche Masse Wasserdampf m_{Ws} kann V = 1 m^3 dieser Luft maximal aufnehmen, ohne dass Nebel entsteht?

Lösung: a) m = 1,205 kg b) m_L = 1,192 kg m_W = 0,0123 kg
c) ρ = 1,205 kg/m^3 ρ_L = 1,192 kg/m^3 ρ_D = 0,0123 kg/m^3
d) m_{Ws} = 0,0154 kg

Aufgabe 15.4

Luft mit einer Temperatur ϑ = 10 °C besitzt einen Wassergehalt x_W = 10 g/kg(L). Als Gesamtdruck p kann mit guter Näherung der Normdruck p_n angenommen werden.
a) Liegt die Luft ungesättigt, gesättigt, als Flüssigkeitsnebel oder Eisnebel vor ?
b) Bestimmen Sie rechnerisch das luftspezifische Volumen v_{1+x} und die luftspezifische Enthalpie h_{1+x} !
c) Bestimmen Sie die unter b) berechneten Größen mit Hilfe des h_{1+x},x_W-Diagramms!

Lösung: a) Flüssigkeitsnebel b) v_{1+x} = 0,812 m^3/kg(L) h_{1+x} = 29,43 kJ/kg(L)

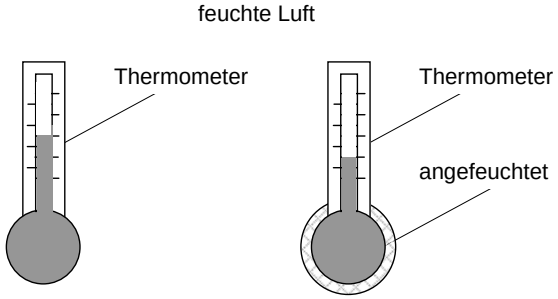
Aufgabe 15.5

Eisnebel mit einer Temperatur $\vartheta = -6$ °C besitzt einen Wassergehalt $x_W = 5$ g/kg(L). Als Gesamtdruck p kann mit guter Näherung der Normdruck p_n angenommen werden.
Berechnen Sie die luftspezifischen Größen Volumen v_{1+x} und Enthalpie h_{1+x} !

Lösung: $v_{1+x} = 0{,}760$ m³/kg(L) $h_{1+x} = -1{,}349$ kJ/kg(L)

Aufgabe 15.6

Zur Ermittlung der Luftfeuchtigkeit werden mit einem gewöhnlichen Thermometer die Lufttemperatur $\vartheta = 24$ °C und mit einem angefeuchteten Thermometer die Feuchtkugeltemperatur $\vartheta_\varphi = 19$ °C gemessen. Der Luftdruck entspricht dem Normdruck.

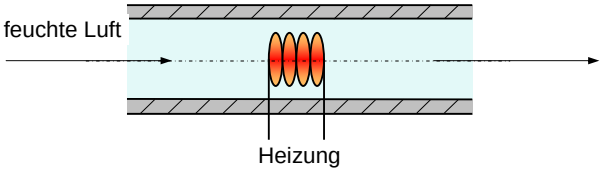


a) Berechnen Sie die absolute Luftfeuchtigkeit x_W, die relative Luftfeuchtigkeit φ, den Wasserdampfpartialdruck p_D, die luftmassenbezogenen Größen Volumen v_{1+x} und Enthalpie h_{1+x} sowie die Dichte ρ der feuchten Luft !
b) Ermitteln Sie die unter a) gesuchten Größen (außer Dichte) mit Hilfe des h_{1+x},x_W-Diagramms !

Lösung: $x_W = 11{,}7$ g/kg(L) $\varphi = 0{,}626$ $p_D = 1{,}87$ kPa $v_{1+x} = 0{,}858$ m³/kg(L)
$h_{1+x} = 54{,}01$ kJ/kg(L) $\rho = 1{,}179$ kg/m³

Aufgabe 15.7

Der Massestrom $\dot{m} = 20$ kg/h feuchte Luft mit $\vartheta_1 = 10$ °C und $\varphi_1 = 90$ % wird auf $\vartheta_2 = 40$°C erwärmt. Es herrscht der Normdruck p_n.

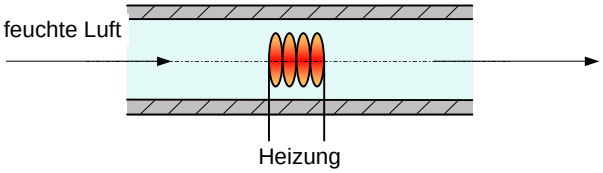


Es sind zu berechnen und parallel dazu mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm zu ermitteln:
a) die Endfeuchte φ_2 der Luft
b) der zuzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$!

Lösung: a) $\varphi_2 = 0{,}150$ b) $\dot{Q}_{12} = 0{,}169$ kW

Aufgabe 15.8

Feuchte Luft von $\vartheta_1 = 12°C$ und $\varphi_1 = 0{,}8$ wird isobar auf $\vartheta_2 = 20°C$ erwärmt. Es herrscht der Normdruck p_n.



Mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm sind zu bestimmen und parallel dazu zu berechnen:

a) der Feuchtigkeitsgehalt x_{W2}

b) die relative Feuchte φ_2

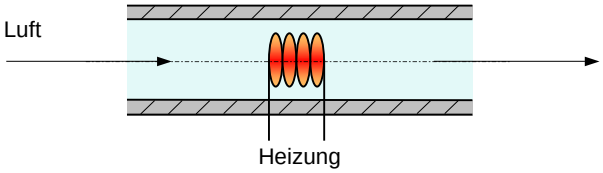
c) das spezifische Volumen v_2

d) die zuzuführende spezifische Wärme q_{12} !

Lösung: a) $x_{W2} = 6{,}97$g/kg(L) b) $\varphi_2 = 0{,}48$ c) $v_{1+x,2} = 0{,}834$ m³/kg
d) $q_{12} = 8{,}18$ kJ/kg

Aufgabe 15.9

$\dot{V}_1 = 100$ m³/h feuchte Luft wird von $\vartheta_1 = 10$ °C und $\varphi_1 = 0{,}6$ isobar auf $\vartheta_2 = 40°C$ erwärmt. Näherungsweise kann angenommen werden, dass die Luft unter dem Normdruck steht.



Es sind grafisch mit einem h_{1+x},x_W-Diagramm und rechnerisch zu ermitteln:

a) die relative Feuchte φ_2 der Luft

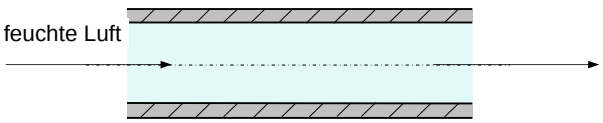
b) der zuzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$

c) die Partialdampfdrücke p_{D1} und p_{D2} des Wasserdampfes !

Lösung: a) $\varphi_2 = 0{,}09979$ b) $\dot{Q}_{12} = 3781$ kJ/h c)$p_{D2} = p_{D1} = 0{,}7369$ kPa

Aufgabe 15.10

Durch eine Rohrleitung strömt feuchte Luft mit $\vartheta = 40°C$ und $x_W = 30$ g/kg(L) bei einem Gesamtdruck p = 220 kPa. Der Massestrom der darin enthaltenen trockenen Luft beträgt $\dot{m}_L = 10$ kg/s.



a) In welchem Zustand liegt die feuchte Luft vor? Begründen Sie Ihre Aussage !

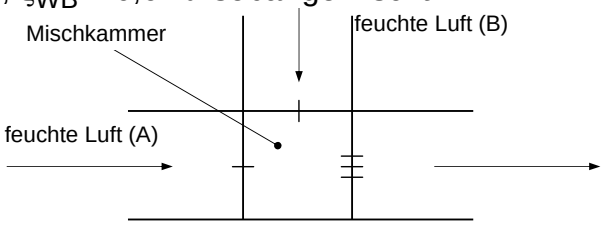
b) Ermitteln Sie den Volumenstrom der feuchten Luft $\dot{V}$!

c) Berechnen Sie den Volumenstrom $\dot{V}_L$ der darin enthaltenen trockenen Luft !

Lösung: a) Flüssigkeitsnebel b) $\dot{V} = 4{,}23$ m³/s c) $\dot{V}_L = 4{,}087$ m³/s

Aufgabe 15.11

Ein Massestrom $\dot{m}_A = 2$ kg/s feuchte Luft mit $\vartheta_A = 30$ °C und $\xi_{WA} = 0{,}4$ % enthaltenem Wasserdampf wird bei $p = p_n = \text{const}$ mit $\dot{m}_B = 8$ kg/s feuchter Luft von $\vartheta_B = 20$°C, $\xi_{WB} = 0{,}6$ % isobar gemischt.



Es sind zu berechnen und parallel dazu mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm zu ermitteln:

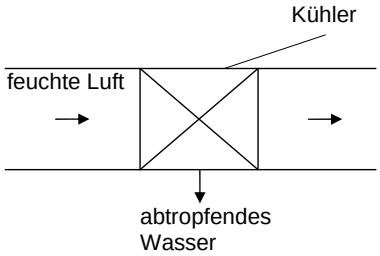
a) der Feuchtigkeitsgehalt x_{W2} des Gemisches,

b) die Temperatur ϑ_2 des Gemisches !

Lösung: a) $x_{W2} = 5{,}6$ g/kg(L) b) $\vartheta_2 = 22{,}0$ °C

Aufgabe 15.12

In einem Kühler wird ein Massestrom $\dot{m}_1 = 30$ kg/h feuchte Luft mit $x_{W1} = 12$ g/kg(L) bei $p = p_n$ von $\vartheta_1 = 40$ °C auf $\vartheta_2 = 2$ °C isobar abgekühlt, wobei am Austritt gesättigte feuchte Luft vorliegt. Es kann angenommen werden, dass das abtropfende Wasser die gleiche Temperatur wie die austretende feuchte Luft besitzt.



Bestimmen Sie rechnerisch und parallel dazu mit einem h_{1+x},x_W - Diagramm:

a) die relative Feuchte φ_1 im Anfangszustand,

b) die Taupunkttemperatur $\vartheta_{\tau 1}$ des Eintrittszustands,

c) den Massestrom $\dot{m}_{W12}$ des dabei kondensierenden Wassers,

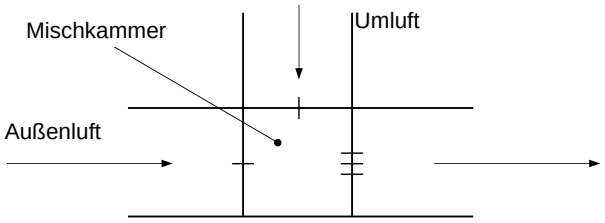
d) den abzuführenden Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$!

Lösung: a) $\varphi_1 = 0{,}260$ b) $\vartheta_{1\tau 1} = 16{,}83$ °C

c) $\dot{m}_{W12} = -0{,}226$ kg/h d) $\dot{Q}_{12} = -0{,}480$ kW

Aufgabe 15.13

In der Mischkammer einer Klimaanlage werden die Masseströme $\dot{m}_A$ (Außenluft $\varphi_A = 0{,}5$; $\vartheta_A = 5$ °C) und $\dot{m}_U$ (Umluft $\varphi_U = 0{,}7$; $\vartheta_U = 23$ °C) bei einem Druck $p = p_n$ isobar gemischt. Das Verhältnis der Trockenluftmassenströme beträgt $\dot{m}_{LA} / \dot{m}_{LU} = 2{,}5$.



a) Mit einem h_{1+x},x_W-Diagramm und parallel dazu rechnerisch sind die Zustandsgrößen ϑ_2 und φ_2 der Mischluft zu bestimmen!

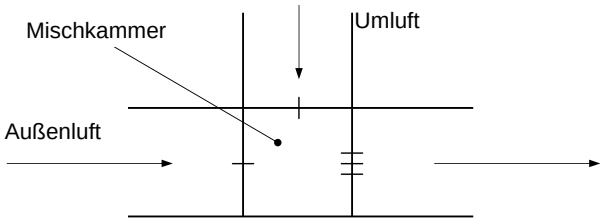
b) Wie groß sind die Masseströme $\dot{m}_A$ und $\dot{m}_U$, wenn $\dot{m}_2 = 3000$ kg/h Mischluft benötigt wird?

Lösung: a) $\vartheta_2 = 10{,}26$ °C $\varphi_2 = 0{,}703$

b) $\dot{m}_A = 2137{,}0$ kg/h $\dot{m}_U = 863{,}0$ kg/h

Aufgabe 15.14

In einer Mischkammer werden $\dot{V}_U = 3000$ m³/h Umluft von $\vartheta_U = 20$ °C und $\varphi_U = 0{,}4$ mit $\dot{V}_A = 7000$ m³/h Außenluft von $\vartheta_A = 5$ °C und $\varphi_A = 0{,}7$ bei $p = p_n$ gemischt.

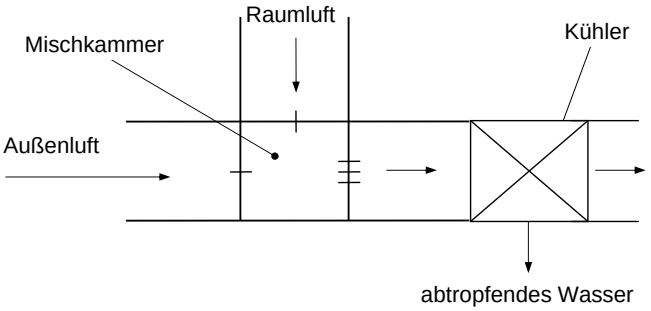


Es ist mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm der Zustand des Gemisches (φ_2, x_{W2}, ϑ_2, $h_{1+x,2}$, ξ_{W2}, ψ_{W2}) sowie die zugehörige Taupunkttemperatur $\vartheta_{\tau 2}$ und die Feuchtkugeltemperatur $\vartheta_{\varphi 2}$ zu bestimmen !

Lösung: $\varphi_2 = 0{,}614$ $x_{W2} = 4{,}4$ g/kg(L) $\vartheta_2 = 9{,}3$°C $h_{1+x,2} = 20{,}4$ kJ/kg(L)
$\xi_{W2} = 0{,}00434$ $\psi_{W2} = 0{,}00698$ $\vartheta_{\tau 2} = 2{,}0$ °C $\vartheta_{\varphi 2} = 6{,}1$ °C

Aufgabe 15.15

$\dot{V}_A$ = 3200 m³/h Außenluft von ϑ_A = 8 °C und φ_A = 0,5 wird in einer Teilklimaanlage mit $\dot{V}_U$ = 8400 m³/h Raumluft von ϑ_U = 22 °C und φ_U = 0,7 bei p = p_n isobar zum Zustand 2 gemischt und anschließend auf ϑ_3 = 10 °C abgekühlt.

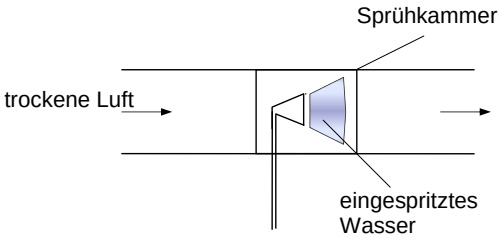


a) Mit einem h_{1+x},x_W-Diagramm ist der Zustand des Gemisches (x_{W2}, ϑ_2, $h_{1+x,2}$) vor der Kühlung zu bestimmen !
b) Wie groß ist der im Kühler abgeführte Wassermassestrom $\dot{m}_{W23}$?
c) Berechnen Sie den im Kühler abzuführenden Wärmestrom $\dot{Q}_{23}$!

Lösung: a) x_{W2} = 9,3 g/kg(L) ϑ_2 = 18 °C $h_{1+x,2}$ = 41,9 kJ/kg(L)
b) $\dot{m}_{W23}$ = –6,19 g/s c) $\dot{Q}_{23}$ = –46,74 kW

Aufgabe 15.16

In trockene Luft von ϑ = 35 °C wird bei p = p_n Wasser mit einer Temperatur von 20°C eingespritzt. Das eingespritzte Wasser verdunstet vollständig.

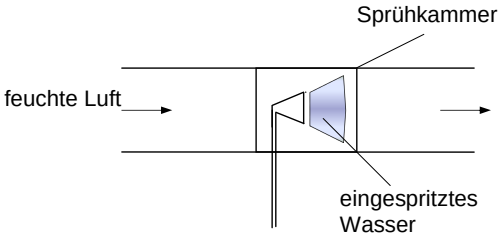


Am Ausgang liegt gesättigte feuchte Luft vor. Mit einem h_{1+x},x_W-Diagramm sind zu bestimmen:
a) die Endtemperatur der Luft ϑ_2 ,
b) die je kg trockene Luft aufgenommene Wassermasse $\dot{m}_{W12}$ / $\dot{m}_L$.

Lösung: a) ϑ_2 = 12,5 °C b) $\dot{m}_{W12}$ / $\dot{m}_L$ = 9,0 g/kg(L)

Aufgabe 15.17

Feuchte Luft von ϑ_A = 36 °C und $x_{WA} = 0{,}15 \cdot x_{Ws}$ soll durch Einspritzen von zerstäubtem Wasser mit einer Temperatur ϑ_B = 10°C bei p = p_n isobar abgekühlt werden.



Bestimmen Sie mit dem h_{1+x},x_W-Diagramm:

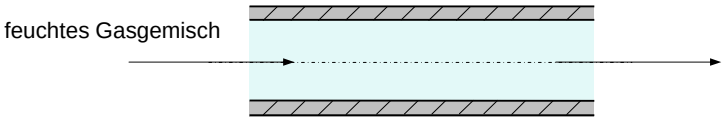
a) die Endtemperatur ϑ_2 der Luft, wenn kein Nebel auftreten darf

b) die je kg trockene Luft erforderliche Masse Wasser m_{W12} / m_L!

Lösung: a) ϑ_2 = 18,4 °C b) m_{W12} / m_L = 7,46 g/kg(L)

Aufgabe 15.18

Ein feuchtes Gasgemisch besteht aus dem trockenen Gasgemisch der Aufgabe 14.1 mit den Massen: m_{N_2} = 2,5 kg; m_{O_2} = 1,75 kg; m_{H_2} = 0,85 kg; m_{CO_2} = 0,2 kg und Wasserdampf. Die Temperatur beträgt ϑ = 100 °C und der Wassergehalt x_W = 10 g/kg(G), wobei das feuchte Gasgemisch noch ungesättigt ist. Der Gesamtdruck beträgt p = 755 kPa.



a) Berechnen Sie die Gaskonstante R_G und die spezifische isobare Wärmekapazität c_{pG} des trockenen Gasgemisches, wobei die Berechnung als ideales Gasgemisch erfolgen darf.

b) Welches gas-spezifische Volumen v_{1+x} besitzt das feuchte Gasgemisch ?

c) Ermitteln Sie die gas-spezifische Enthalpie h_{1+x} des feuchten Gasgemisches !

Lösung: a) R_G = 0,89436 kJ/(kg K) c_{pG} = 3,1365 (kJ/kg K)

b) v_{1+x} = 0,4443 m^3/kg(G) c) h_{1+x} = 340,52 kJ/kg(G)

Aufgabe 15.19

Durch die Verbrennungsrechnung für 1kg Brennstoff einer Rohbraunkohle wird die Zusammensetzung des feuchten Rauchgasgemisches wie folgt bestimmt: m_{N_2} = 3,473 kg; m_{O_2} = 0,175 kg; m_{H_2O} = 0,707 kg; m_{CO_2} = 1,116 kg und m_{SO_2} = 0,004 kg. Das feuchte Rauchgasgemisch hat eine Temperatur von 140 °C. Nach Abkühlung auf 25 °C soll angenommen werden, dass am Austritt gesättigtes feuchtes Gasgemisch vorliegt und dass das auskondensierte Wasser die gleiche Temperatur wie das gesättigte feuchte Gasgemisch besitzt. Der Druck des Rauchgases entspricht dem Umgebungsdruck von 1 bar und kann als konstant angenommen werden.

a) Bestimmen Sie die Masseanteile der Gemischpartner des trockenen Gasgemisches und die spezifische Gaskonstante des trockenen Gasgemisches. Ermitteln Sie den Wassergehalt des feuchten Rauchgasgemisches vor der Abkühlung !
b) Berechnen Sie die Taupunkttemperatur des feuchten Rauchgasgemisches vor der Abkühlung !
c) Ermitteln Sie die mittlere spezifische Wärmekapazität des trockenen Gasgemisches, die gas-spezifische Enthalpie h_{1+x} und die spezifische Enthalpie h für die Abgastemperatur von 140 °C !
d) Ermitteln Sie die mittlere spezifische Wärmekapazität des trockenen Gasgemisches, die gas-spezifische Enthalpie h_{1+x} und die Enthalpie h nach Abkühlung auf 25 °C !
e) Welche spezifische Wärme wird je kg feuchtes Gasgemisch bei der Abkühlung von 140 °C auf 25 °C abgegeben ?
f) Zusatzaufgabe: Bestimmen Sie die Masseanteile des gesättigten feuchten Gasgemisches nach der Abkühlung auf 25 °C, nachdem das auskondensierte Wasser abgeschieden wurde ! Vergleichen Sie die Werte mit den Masseanteilen im Ausgangszustand von 140 °C !

Lösung: a) $\xi^{tr}_{CO_2} = 0{,}23406$ kg/kg(G) $\xi^{tr}_{O_2} = 0{,}03670$ kg/kg(G)

$\xi^{tr}_{SO_2} = 0{,}00084$ kg/kg(G) $\xi^{tr}_{N_2} = 0{,}72840$ kg/kg(G)

R_G = 0,27006 kJ/(kg*K) x_W = 0,14828 kg/kg(G)

b) ϑ_τ = 60,293 °C

c) c_{pG} = 1,00075 kJ/(kg*K) h_{1+x} = 549,565 kJ/kg(G) h = 478,599 kJ/kg

d) c_{pG} = 0,98575 kJ/(kg*K) h_{1+x} = 86,966 kJ/kg(G) h = 75,736 kJ/kg

e) q_{12} = −402,863 kJ/kg

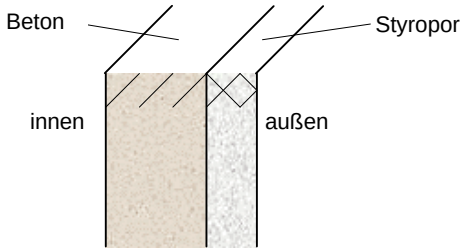
f)

Gesättigtes feuchtes Gasgemisch	Ausgangszustand
$\xi^{s}_{CO_2} = 0{,}22966$ kg/kg	$\xi_{CO_2} = 0{,}20384$ kg/kg
$\xi^{s}_{H_2O} = 0{,}01880$ kg/kg	$\xi_{H_2O} = 0{,}12913$ kg/kg
$\xi^{s}_{SO_2} = 0{,}00082$ kg/kg	$\xi_{SO_2} = 0{,}00073$ kg/kg
$\xi^{s}_{O_2} = 0{,}03601$ kg/kg	$\xi_{O_2} = 0{,}03196$ kg/kg
$\xi^{s}_{N_2} = 0{,}71471$ kg/kg	$\xi_{N_2} = 0{,}63463$ kg/kg

16. Stoffübertragung

Aufgabe 16.1

Eine als eben anzusehende Außenwand der Fläche A = 20 m^2 besteht aus einer d_B = 10 cm dicken Betonschicht und einer außen vorgelagerten Wärmedämmung der Dicke d_S = 5 cm aus Styropor. Innen herrscht eine Temperatur ϑ_i = 20 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von φ_i = 0,7. Außen werden ϑ_a = 5 °C und φ_a = 0,3 gemessen. Der Verputz außen und innen sowie die Stoffübergangswiderstände an der Außen- und Innenwand dürfen vernachlässigt werden. In erster Näherung können als mittlere Temperaturen 20 °C für die Betonschicht und 10 °C für die Styroporschicht verwendet werden. Der Luftdruck innen und außen entspricht dem Normdruck.



a) Welcher Massestrom $\dot{m}_W$ Wasserdampf diffundiert durch die Wand?

b) Berechnen Sie die Massestromdichte $\hat{\dot{m}}_W$ des Wasserdampfes!

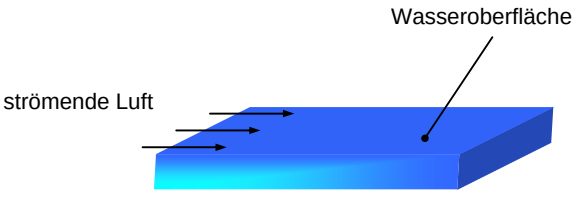
c) Berechnen Sie außerdem den Molstrom $\dot{n}_W$ und die Molstromdichte $\hat{\dot{n}}_W$!

Lösung: a) $\dot{m}_W$ = 1,37 g/h b) $\hat{\dot{m}}_W$ = 0,0685 g/(m^2 h)

c) $\dot{n}_W$ = 0,0759 mol/h $\hat{\dot{n}}_W$ = 0,0038 mol/(m^2 h)

Aufgabe 16.2

Luft strömt mit einer Geschwindigkeit c = 5 m/s über eine Wasserfläche der Größe 5 m x 5 m. Die mittlere Temperatur der Luft beträgt ϑ_L = 25 °C, die relative Luftfeuchte φ = 0,4 und der Luftdruck p = 1,01325 bar. Das Wasser hat eine Oberflächentemperatur ϑ_0 = 18 °C.



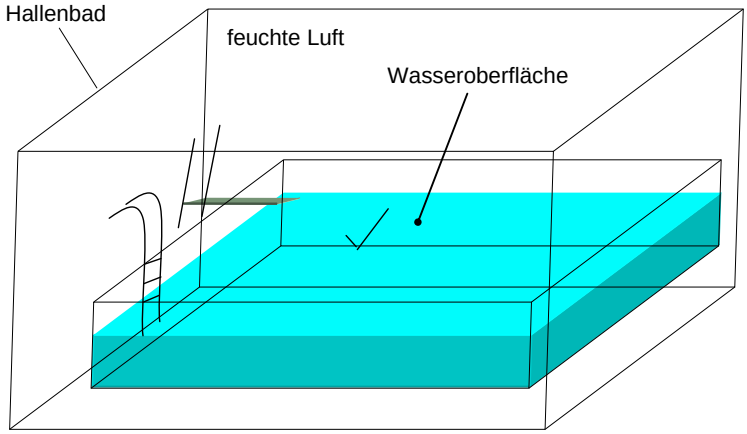
a) Berechnen Sie den Stoffübergangskoeffizienten β_{WL} für Wasserdampf zwischen der Wasseroberfläche und der Luft über die Sherwood-Zahl !

b) Welcher Massestrom Wasserdampf $\dot{m}_W$ verdunstet ?

Lösung: a) β_{WL} = 0,0136 m/s b) $\dot{m}_W$ = 2,00 g/s

Aufgabe 16.3

An der freien Wasseroberfläche eines Hallenbades von 500 m^2 mit einer Temperatur von ϑ_0 = 25 °C verdunstet Wasser. Die Luft im Hallenbad hat eine relative Feuchte φ = 0,8 bei einer Temperatur von 28 °C und kann als ruhend angenommen werden. Als Luftdruck kann mit guter Näherung der Normdruck angenommen werden.

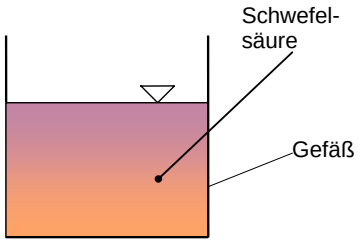


Wie groß ist der verdunstende Wassermassestrom $\dot{m}_W$?

Lösung: $\dot{m}_W$ = 35,67 kg/h

Aufgabe 16.4

Feuchter Luft mit φ = 0,9 und ϑ = 25 °C sollen $\dot{m}_W$ = 0,5 kg/h Wasser entzogen werden. Hierfür wird die Luft über Gefäße geführt, die bis zu einer Entfernung von δ = 10 cm vom oberen Rand mit Schwefelsäure gefüllt sind. Da die Schwefelsäure Wasserdampf absorbiert, darf der Partialdampfdruck des Wasserdampfes an der Oberfläche der Schwefelsäure näherungsweise zu Null angenommen werden. Der Luftdruck entspricht näherungsweise dem Normdruck.

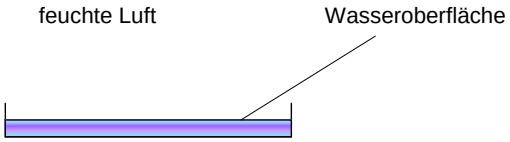


Es ist die erforderliche Fläche der Gefäße zu berechnen !

Lösung: A = 27,69 m^2

Aufgabe 16.5

Luft mit ϑ_F = 20 °C befindet sich über einer Wasserfläche mit der Oberflächentemperatur ϑ_0 = 15 °C. Bekannt sind der Partialdampfdruck des Wasserdampfes in der Luft p_{DF} = 800 Pa und der Wärmeübergangskoeffizient α = 21,4 W/(m^2·K). Der Luftdruck entspricht dem Normaldruck.

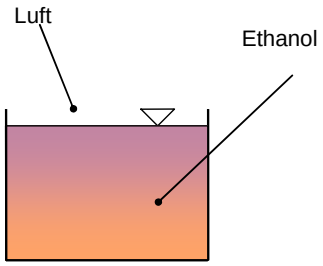


Es sind die Massestromdichte des verdunsteten Wasserdampfes $\hat{\dot{m}}_W$ und die Wärmestromdichte $\hat{\dot{q}}$ an der Oberfläche durch Verdunstung und Konvektion zu berechnen (Näherungsweise kann der Stoffübergangskoeffizient ausgehend vom Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden, wobei für die Dichte und für die spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft die Werte für trockene Luft verwendet werden dürfen.) !

Lösung: $\hat{\dot{m}}_W$ = 0,429 kg/(m^2·h) $\hat{\dot{q}}$ = 186,9 W/m^2

Aufgabe 16.6

In einem offenen Gefäß befindet sich flüssiges Ethanol. Die freie Oberfläche beträgt A = 4,5 m^2. Die Konzentrationsdifferenz in der Grenzschicht an der Oberfläche beträgt Δc_F = 0,2 kmol/m^3. Die Grenzschichtdicke zwischen dem Ethanol und der Luft wurde zu δ = 0,15 mm ermittelt.



Der Stoffmengenstrom des Ethanols $\dot{n}_F$ ist zu berechnen!

Lösung: $\dot{n}_F$ = 243,6 kmol/h

17. Thermodynamische Potential- und Fundamentalgleichungen

Aufgabe 17.1

Sie stehen vor der Aufgabe, mit einer gegebenen Fundamentalgleichung $f = f(T,v)$ für Kohlendioxid die folgenden thermodynamischen Funktionen berechnen zu müssen: $p = p(T,v)$, $u = u(T,v)$, $h = h(T,v)$, $s = s(T,v)$ und $c_V = c_V(T,v)$. Stellen Sie hierfür die Berechnungsgleichungen der gesuchten Größen in Abhängigkeit von $f = f(T,v)$ auf!

Aufgabe 17.2

Ihnen steht eine Fundamentalgleichung für die freie Enthalpie $g = g(p,T)$ zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von überhitztem Wasserdampf zur Verfügung. Sie benötigen in Ihrer Prozessberechnung jedoch die funktionalen Abhängigkeiten $v = v(p,T)$, $h = h(p,T)$, $s = s(p,T)$ und $c_p = c_p(p,T)$. Bilden Sie die Gleichungen für diese Größen ausgehend von der Fundamentalgleichung $g = g(p,T)$!

Aufgabe 17.3

Zur Lösung eines Gleichungssystems einer Prozessmodellierung mit dem Gradientenverfahren benötigen Sie den Differentialquotienten $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v$ für Ammoniak. Hierfür können Sie die Fundamentalgleichung $f = f(T,v)$ verwenden. Stellen Sie eine Gleichung zur Ermittlung des Differentialquotienten mit der Fundamentalgleichung $f = f(T,v)$ und deren Ableitungen mit der allgemeinen Vorgehensweise zur Ermittlung von thermodynamischen Differentialquotienten auf!

Aufgabe 17.4

In einer instationären Prozessberechnung benötigen Sie den Differentialquotienten $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_v$ für Wasserdampf. Hierfür können Sie die Fundamentalgleichung $g = g(p,T)$ der Industrie-Formulation für Wasser und Wasserdampf verwenden. Erstellen Sie eine Gleichung zur Ermittlung des Differentialquotienten mit der Fundamentalgleichung $g = g(p,T)$ und deren Ableitungen mit der Methode der Verwendung von Standard-Differentialquotienten!

Aufgabe 17.5

Sie benötigen schnell einen Wert für den Differentialquotienten $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_v$ für Wasserdampf bei einem Druck von 200 bar und einer Temperatur von 500 °C. Berechnen Sie den Wert des Differentialquotienten, indem Sie Werte für die Standard-Diffentialquotienten aus der Wasserdampftafel "International Steam Tables" (2008) entnehmen.

Lösung: $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_v = 0{,}06441 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}$