Hochschule Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aufgabensammlung

Technische Thermodynamik und Wärmeübertragung

Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Technische Thermodynamik

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

Ausgabe: Sommersemester 2018

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

Aufgabensammlung

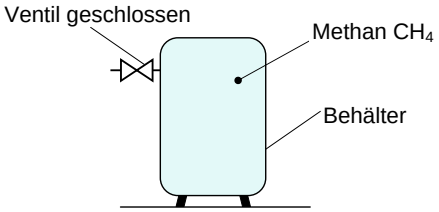
Technische Thermodynamik und Wärmeübertragung

		Seite
1.	Thermodynamische Zustandsgrößen	1/1
2.	Massebilanzen	2/1
3.	Energiebilanz − I. Hauptsatz der Thermodynamik	3/1
4.	Entropiebilanz − II. Hauptsatz der Thermodynamik	4/1
5.	Exergiebilanz − Technische Arbeitsfähigkeit	5/1
6.	Reale Fluide	6/1
7.	Einfache technische Prozesse	7/1
8.	Wärmeleitung	8/1
9.	Wärmedurchgang	9/1
10.	Konvektiver Wärmeübergang	10/1
11.	Wärmestrahlung	11/1
12.	Rekuperatoren (Wärmetauscher)	12/1

1. Thermodynamische Zustandsgrößen

Aufgabe 1.1

In einem geschlossenen Behälter mit dem Volumen $V = 8\ m^3$ befindet sich Methan (CH_4) mit einer Masse m = 7 kg.



Es sind zu berechnen:
a) die Dichte ρ,
b) das spezifische Volumen v,
c) das molare Volumen $\bar{v}$.
Lösung: a) $\rho = 0{,}875\ kg/m^3$ b) $v = 1{,}143\ m^3/kg$ c) $\bar{v} = 18{,}335\ m^3/kmol$

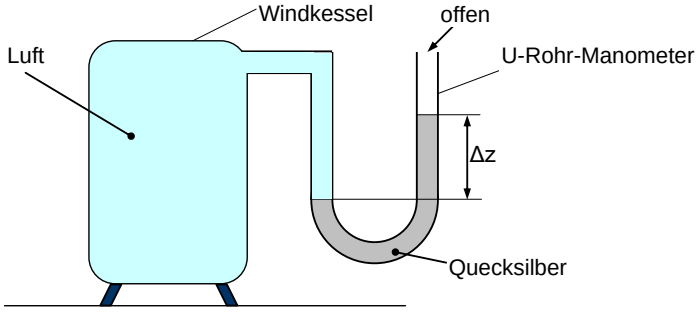
Aufgabe 1.2

Welche Masse m haben n = 10 kmol Stickstoff und welches Volumen V im Normzustand, wobei der Stickstoff als ideales Gas betrachtet werden kann ?

Lösung: $m = 280{,}13\ kg$, $V = 224{,}14\ m_n^3$

Aufgabe 1.3

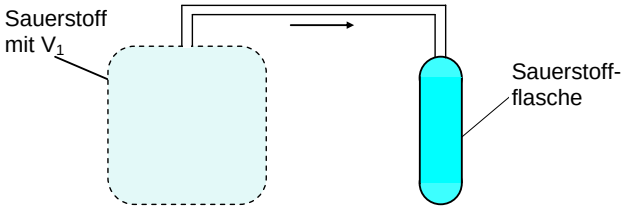
Ein Windkessel mit dem Volumen $V = 10\ m^3$ enthält die Masse $m = 20\ kg$ Luft mit einer Temperatur $\vartheta = 27\ °C$. Der Druck im Windkessel wird mit einem U-Rohr-Manometer gemessen, das mit Quecksilber gefüllt ist. Der äußere Luftdruck beträgt $p_u = 1\ bar$. Die Temperatur des Quecksilbers im U-Rohr-Manometer entspricht der Temperatur der Umgebung und beträgt 10 °C.



Welche Höhendifferenz Δz wird am Manometer abgelesen? (Die Luft kann mit guter Näherung als ideales Gas betrachtet werden.)
Lösung: $\Delta z = 0{,}544\ m$

Aufgabe 1.4

Sauerstoff, der bei einem Druck von $p_1 = 100$ kPa und einer Temperatur $\vartheta_1 = 18$ °C das Volumen $V_1 = 1$ m^3 einnimmt, soll von einer Sauerstoffflasche aufgenommen werden.

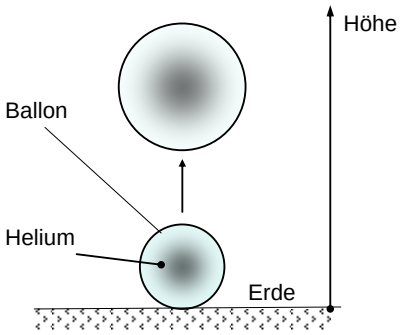


Wie groß ist das Volumen V_2 der Flasche zu bemessen, wenn in ihr der Druck $p_2 = 10$ MPa und die Temperatur $\vartheta_2 = 27$ °C betragen sollen ?
(Der Sauerstoff kann näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden.)

Lösung: $V_2 = 0{,}01031$ m^3

Aufgabe 1.5

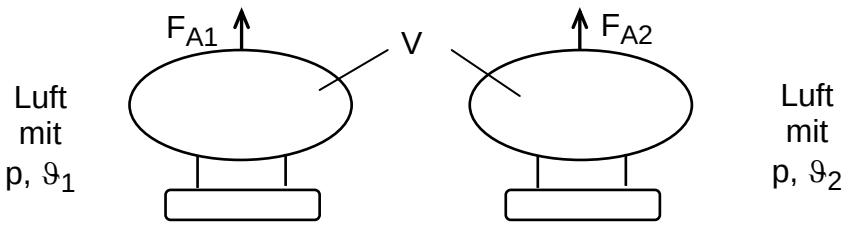
Ein dehnbarer Ballon wird auf der Erde mit der Masse m = 50 kg Helium gefüllt, so dass der Druck $p_1 = 1$ bar und die Temperatur $\vartheta_1 = 15$ °C beträgt.



Wie groß ist die Volumenänderung $\Delta V = V_2 - V_1$, wenn das Gas im Ballon in größerer Höhe einen Druck von $p_2 = 80$ kPa und eine Temperatur von $\vartheta_2 = -30$ °C annimmt? (Helium kann mit guter Näherung als ideales Gas angenommen werden.)
Lösung: $\Delta V = 16{,}396$ m^3

Aufgabe 1.6

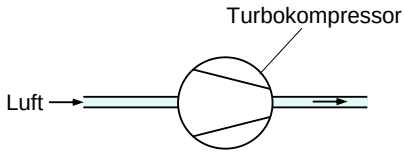
Ein Luftschiff mit einem konstanten Volumen von V = 200000 m^3 gelangt bei einem gleichbleibendem Druck von p = 90 kPa von einem Gebiet mit einer Lufttemperatur $\vartheta_1 = 10$ °C plötzlich in ein Gebiet mit der Lufttemperatur $\vartheta_2 = 15$ °C. Es kann angenommen werden, dass sowohl der Druck als auch die Temperatur im Luftschiff konstant bleiben. Die atmosphärische Luft darf als ideales Gas betrachtet werden.



Wie ändert sich die resultierende Auftriebskraft $\Delta F_A = F_{A2} - F_{A1}$ des Luftschiffes ?
Lösung: $\Delta F_A = -37{,}68$ kN

Aufgabe 1.7

Ein stationär arbeitender Turbokompressor saugt einen Volumenstrom $\dot{V}_1 = 120\ m^3/h$ Luft an und komprimiert sie auf $\dot{V}_2 = 26\ m^3/h$, wobei sich der Druck von $p_1 = 0{,}1$ MPa auf $p_2 = 9$ bar erhöht.

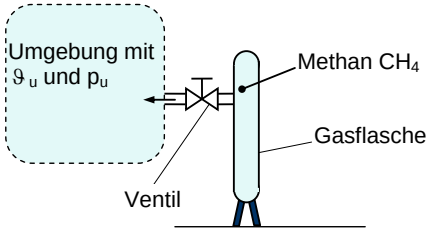


Wie groß ist die Temperatur ϑ_2 der komprimierten Luft, wenn die Ansaugtemperatur $\vartheta_1 = 17$ °C beträgt (Die Luft kann als ideales Gas betrachtet werden.) ?

Lösung: $\vartheta_2 = 292{,}64$ °C

Aufgabe 1.8

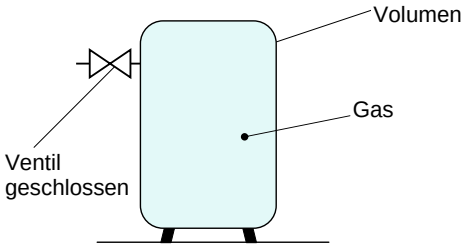
In einer Gasflasche befindet sich Methan (CH_4) mit einer Masse $m_1 = 0{,}5$ kg bei einer Temperatur $\vartheta_1 = 200$ °C und einem Druck $p_1 = 1$ MPa. Man öffnet an der Gasflasche ein Ventil und lässt das Methan ausströmen.



Wie groß ist die in der Gasflasche verbleibende Gasmasse m_2, wenn nach Beendigung des Ausströmvorganges der Zustand in der Flasche gleich dem Umgebungszustand ($\vartheta_u = 27$ °C, $p_u = 1$ bar) ist?
(Methan kann bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas betrachtet werden.)
Lösung: $m_2 = 78{,}8$ g

Aufgabe 1.9

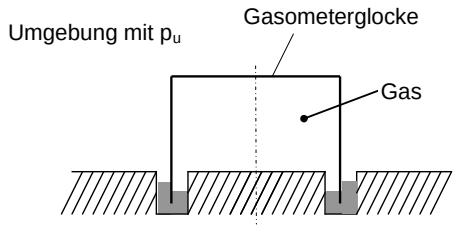
Wie groß ist die spezifische Gaskonstante R eines unbekannten Gases, wenn die Masse $m = 1{,}5$ kg dieses Gases bei einem Druck $p = 1{,}1$ bar und einer Temperatur $\vartheta = 150$ °C das Volumen $V = 1{,}711\ m^3$ einnimmt?
(Das Gas kann mit guter Näherung als ideales Gas betrachtet werden.)



Lösung: $R = 0{,}2965$ kJ/(kg·K)

Aufgabe 1.10

Eine Gasometerglocke fasst das Volumen V = 30000 m^3 Gas [R = 0,68 kJ/(kg·K)] bei einer Temperatur von ϑ = 20 °C. Die Masse der Gasometerglocke ist so bemessen, dass in der Glocke ein Überdruck von $\Delta p_{üb}$ = 3 kPa herrscht. Der Umgebungsdruck beträgt p_u = 100,8 kPa. Die Gasometerglocke hat einen Durchmesser von d = 40 m. Das Gas kann als ideales Gas angesehen werden.

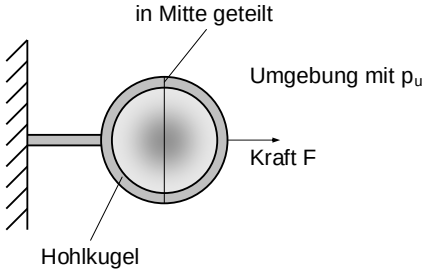


a) Welche Gasmasse m befindet sich unter der Gasometerglocke ?
b) Wie groß ist die Masse m_{Gl} der Gasometerglocke?

Lösung: a) m = 15621 kg b) m_{Gl} = 384424 kg

Aufgabe 1.11

Eine in der Mitte geteilte Hohlkugel mit einem mittleren Durchmesser von d = 1,0 m wird bei einem äußeren Luftdruck von p_u = 100 kPa auf ein 90 %-iges Vakuum evakuiert.

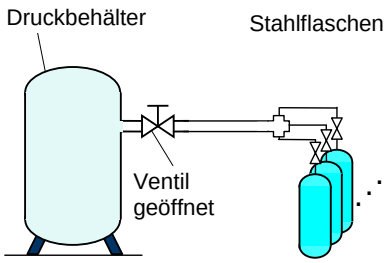


Wie groß muss die Kraft F mindestens sein, um die Kugelhälften voneinander lösen zu können?

Lösung: F = 70,69 kN

Aufgabe 1.12

Ein Druckbehälter von V_{Beh} = 8 m^3 enthält Sauerstoff, der als ideales Gas angesehen werden kann, mit einem Druck von p_1 = 22 MPa.

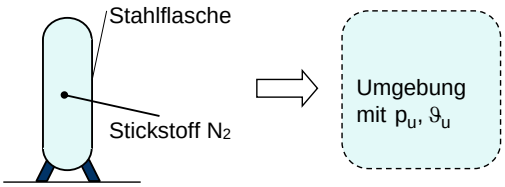


Wie viel Stahlflaschen i von je V_{Fl} = 0,1 m^3 mit einem Druck von p_2 = 15 MPa lassen sich aus dem Druckbehälter isotherm ohne Hilfsenergie abfüllen, wobei der Druck p_2 am Ende sowohl in den Stahlflaschen als auch im Druckbehälter herrscht ?

Lösung: i = 37

Aufgabe 1.13

In einer Stahlflasche mit dem Volumen $V_1 = 40\ l$ befindet sich Stickstoff, der als ideales Gas angesehen werden darf, bei $p_1 = 15{,}2$ MPa und $\vartheta_1 = 12$ °C.

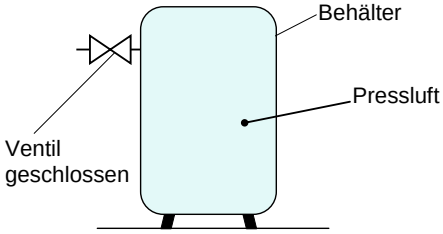


Welches Volumen V_2 würde der Stickstoff bei Umgebungsparametern $\vartheta_u = 20$ °C und $p_u = 99{,}32$ kPa einnehmen ?

Lösung: $V_2 = 6{,}293\ m^3$

Aufgabe 1.14

In einem geschlossenen Behälter befindet sich Pressluft mit $p = 4{,}8$ MPa und $\vartheta = 12$ °C. Die Luft kann mit guter Näherung als trocken angesehen werden.



a) Ermitteln Sie die Dichte, das spezifische Volumen und die spezifische isobare Wärmekapazität, wobei Luft bei den vorliegenden Parametern als reales Fluid zu betrachten ist !
b) Ermitteln Sie die gleichen Eigenschaften, indem Sie annehmen, dass Luft als ideales Gas berechnet werden kann und diskutieren Sie die Abweichungen !
c) Berechnen Sie den Realgasfaktor z_{real} und schätzen Sie ein, ob Luft im vorliegenden Zustand als ideales Gas berechnet werden darf !

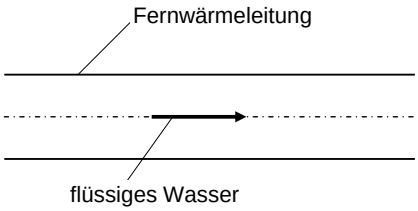
Lösung: a) $\rho = 59{,}381\ kg/m^3$ $v = 0{,}01684\ m^3/kg$ $c_p = 1{,}0926\ kJ/(kg \cdot K)$

b) $\rho^{ig} = 58{,}632\ kg/m^3$ $v^{ig} = 0{,}017056\ m^3/kg$ $c_p^{ig} = 1{,}0043\ kJ/(kg \cdot K)$

c) $z_{real} = 0{,}9874$

Aufgabe 1.15

Flüssiges Wasser hat in einer Fernwärmeleitung den Druck p = 21,5 bar und die Temperatur ϑ = 150 °C.



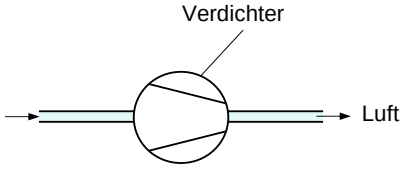
a) Ermitteln Sie die Dichte und die spezifische isobare Wärmekapazität, wobei Wasser mit guter Genauigkeit als inkompressibel angesehen werden kann !
b) Vergleichen Sie diese Werte mit denen aus der Wasserdampftafel !

Lösung: a) ρ^{if} = 917,01 kg/m^3 c_p^{if} = 4,3103 kJ/(kg·K)

b) ρ = 917,95 kg/m^3 c_p = 4,3048 kJ/(kg·K)

Aufgabe 1.16

Luft verlässt einen Verdichter mit ϑ = 312 °C und p = 1 MPa.



Ermitteln Sie unter Annahme, dass die Luft bei dem vorliegenden Druck als ideales Gas und trocken betrachtet werden kann:
a) die spezifische isobare Wärmekapazität c_p,
b) die mittlere spezifische isobare Wärmekapazität $c_p\Big|_{T_0}^{T}$,
c) die spezifische isochore Wärmekapazität c_v,
d) die spezifische Enthalpie h,
e) die spezifische innere Energie u .
f) Überprüfen Sie durch Berechnung des Realgasfaktors z_{real} die Vereinfachung "Ideales Gas". Entnehmen Sie das dafür benötigte tatsächliche spez. Volumen der Luft bei den vorliegenden Parametern der Tab. 6 der Stoffwertsammlung !

Lösung: a) c_p^{ig} = 1,0477 kJ/(kg·K) b) $c_p\Big|_{T_0}^{T}$ = 1,0203 kJ/(kg·K)

c) c_v^{ig} = 0,7606 kJ/(kg·K)

d) h^{ig} = 318,38 kJ/kg

e) u^{ig} = 150,38 kJ/kg

f) z_{real} = 1,0037

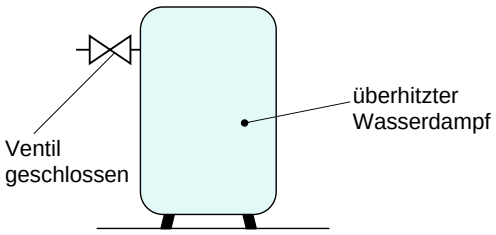
Aufgabe 1.17

Überprüfen Sie durch Berechnung des Realgasfaktors z_{real}, welche der folgenden Zustandspunkte von überhitztem Wasserdampf näherungsweise mit der Zustandsgleichung für ideale Gase berechnet werden können :

für p = 0,001 MPa ϑ = 100 °C und ϑ = 600 °C,
für p = 0,010 MPa ϑ = 100 °C und ϑ = 600 °C,
für p = 1,000 MPa ϑ = 200 °C und ϑ = 600 °C,
für p = 10,00 MPa ϑ = 350 °C und ϑ = 600 °C,
für p = 20,00 MPa ϑ = 400 °C und ϑ = 600 °C .

Entnehmen Sie die benötigten Daten der Wasserdampftafel.

Berechnen Sie anschließend für diese Punkte das spezifische Volumen mit der Zustandsgleichung für ideale Gase und ermitteln Sie die dabei gemachten relativen Fehler zu den Werten der Wasserdampftafel !

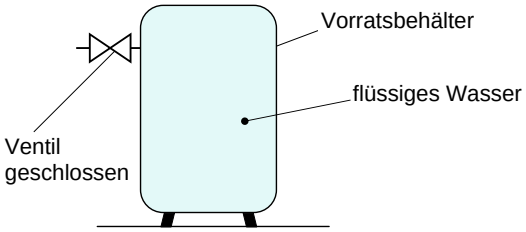


Lösung:

p in MPa	v in m^3/kg Werte aus WDT		z_{real}		v in m^3/kg Werte aus ZGL für IG		Relativer Fehler zu Werten aus WDT	
	für 100°C für 100°C für 200°C für 350°C für 400°C	für 600°C	für 100°C für 100°C für 200°C für 350°C für 400°C	für 600°C	für 100°C für 100°C für 200°C für 350°C für 400°C	für 600°C	für 100°C für 100°C für 200°C für 350°C für 400°C	für 600°C
0,001	172,193	402,980	0,99984	0,99999	172,2199	402,985	0,016%	0,001%
0,01	17,1967	40,2963	0,99853	0,99995	17,22199	40,2985	0,1471%	0,0054%
1	0,2060	0,4011	0,94334	0,99533	0,218373	0,402985	6,006%	0,470%
10	0,0224	0,0384	0,77885	0,95289	0,02876	0,040298	28,394%	4,944%
20	0,0099	0,0182	0,63731	0,90245	0,015534	0,020149	56,909%	10,805%

Aufgabe 1.18

Ermitteln Sie :
a) die spezifische isobare Wärmekapazität c_p,
b) die spezifische Enthalpie h,
c) die spezifische innere Energie u
von flüssigem Wasser in einem Vorratsbehälter bei ϑ = 30 °C und p = 0,2 MPa.
Das Wasser kann bei vorliegendem Druck mit guter Näherung als inkompressible (ideale) Flüssigkeit berechnet werden.
Vergleichen Sie die ermittelten Werte mit denen aus der Wasserdampftafel !

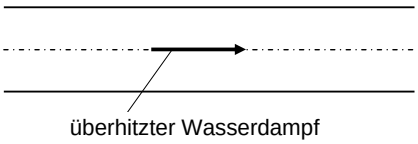


Lösung: a) c_p^{if} = 4,1803 kJ/(kg·K) b) h^{if} = 125,75 kJ/kg c) u^{if} = 125,55 kJ/kg

c_p = 4,1798 kJ/(kg·K) h = 125,92 kJ/kg u = 125,72 kJ/kg

Aufgabe 1.19

Ermitteln Sie die spezifische Enthalpie, das spezifische Volumen, die Dichte sowie die spezifische Entropie von überhitztem Wasserdampf am Turbineneintritt. Gemessen werden p = 163 bar und ϑ = 535 °C. Wasserdampf muss bei den vorliegenden Parametern als reales Fluid behandelt werden. Verwenden Sie deshalb zur Lösung die Wasserdampftafel.



Lösung: h = 3394,64 kJ/kg

v = 0,02035 m^3/kg

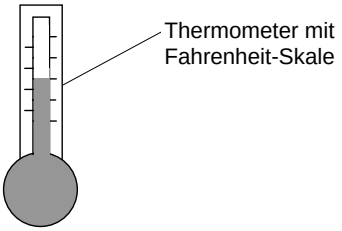
ρ = 49,15 kg/m^3

s = 6,4203 kJ/(kg·K)

Aufgabe 1.20

Sie sind in den USA zu Gast und fühlen sich nicht wohl. Sicherheitshalber messen Sie Ihre Körpertemperatur. Bedauerlicherweise hat das Fieberthermometer eine *Fahrenheit*-Skale. Damit Sie Ihre Krankheit einschätzen können, müssen Sie die gemessene Temperatur ϑ_F = 102,7 °F in °C umrechnen.

Geben Sie außerdem die Temperatur in K an !
Fertigen Sie des weiteren eine Tabelle mit *Fahrenheit*-Temperaturen 0 °F, 5 °F, 10 °F bis 115 °F und den zugehörigen *Celsius*-Temperaturen an !



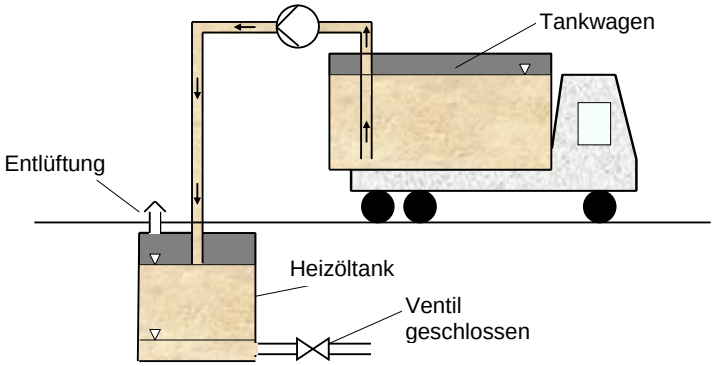
Lösung:

ϑ = 39,28 °C T = 312,43 K

2. Massebilanz

Aufgabe 2.1

In einem Heizöltank, dessen maximale Füllmasse $m_2 = 12000$ kg beträgt, befindet sich zum Zeitpunkt $t_1 = 0$ eine Restmasse $m_1 = 800$ kg. Aus einem Kesselwagen wird ein konstanter Massestrom $\dot{m}_{zu} = 14$ kg/s in den Heizöltank gepumpt. Eine Entnahme findet während des Füllvorganges nicht statt.

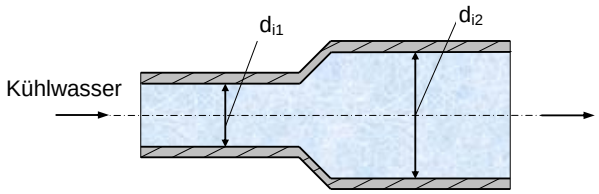


Berechnen Sie die Zeitdauer $\Delta t = t_2 - t_1$, in der der Heizöltank vollständig gefüllt wird !

Lösung: $\Delta t = 800$ s = 13,3 min

Aufgabe 2.2

Ein sich vom Innendurchmesser $d_{i1} = 0{,}04$ m auf den Innendurchmesser $d_{i2} = 0{,}05$ m erweiterndes Rohr wird stationär von Kühlwasser mit einer konstanten Temperatur $\vartheta = 80$ °C durchströmt. Im Eintrittsquerschnitt wurde eine mittlere Geschwindigkeit $c_1 = 0{,}8$ m/s gemessen. (Das Kühlwasser kann mit guter Näherung als inkompressibel angesehen werden.)



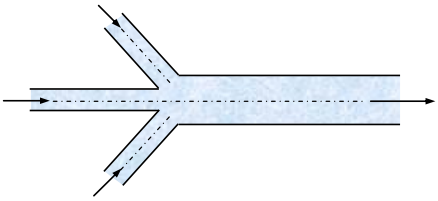
a) Ermitteln Sie den Massestrom $\dot{m}$.

b) Wie groß ist die Strömungsgeschwindigkeit c_2 am Austritt ?

Lösung: a) $\dot{m} = 0{,}977$ kg/s b) $c_2 = 0{,}512$ m/s

Aufgabe 2.3

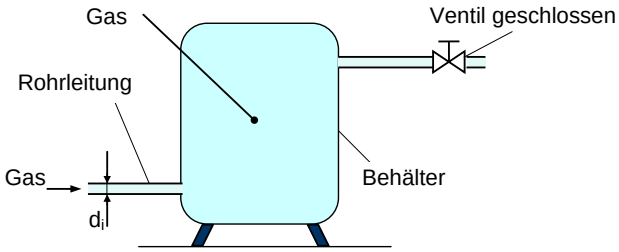
Einer Sammelleitung strömen aus drei Betriebsteilen die stationären Schmutzwasserströme $\dot{V}_{1A} = 370\,m^3/h$ mit 50 °C, $\dot{V}_{1B} = 64\,m^3/h$ mit 40 °C und $\dot{m}_{1C}$ = 175 kg/s zu.
(Für das Schmutzwasser können in erster Näherung die Stoffwerte von reinem Wasser verwendet werden. Wasser darf bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel angesehen werden.)
Berechnen Sie den aus der Sammelleitung austretenden Massestrom $\dot{m}_2$.



Lösung: $\dot{m}_2$ = 294 kg/s

Aufgabe 2.4

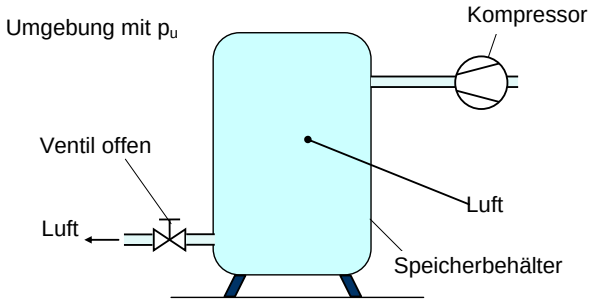
In einem Behälter mit einem Volumen von V = 5 m^3 befinden sich m_1 = 1,5 kg Gas. Durch eine Rohrleitung mit einem Innendurchmesser d_i = 50 mm wird ein konstanter Massestrom $\dot{m}_{zu}$ weiteres Gas mit der Dichte $\rho_{zu} = 2\,kg/m^3$ zugeführt.
Es ist die Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$ bis zur Füllung des Behälters zu berechnen, wenn die mittlere Geschwindigkeit des Gases in der Rohrleitung c_{zu} = 2,55 m/s beträgt und die Dichte des Gases am Ende im gefüllten Speicher den Wert ρ_2 = 1,27 g/dm^3 nicht überschreitet.



Lösung: Δt = 484,3 s = 8,07 min

Aufgabe 2.5

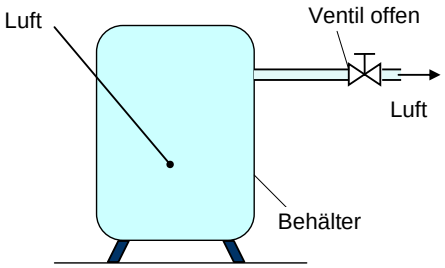
In einem Speicherbehälter mit dem Volumen V = 5 m^3 befindet sich Luft bei konstanter Temperatur ϑ = 20 °C und einem Überdruck von $\Delta p_{üb1}$ = 1 MPa. Der Umgebungsdruck beträgt p_u = 102 kPa. Luft darf bei den vorliegenden Zuständen als ideales Gas betrachtet werden. Welcher konstante Massestrom $\dot{m}_{ab}$ wurde dem Behälter entnommen, wenn sich der Kompressor nach Δt = 180 min einschaltet? Der Einschaltdruck des Kompressors liegt bei p_2 = 400 kPa.



Lösung: $\dot{m}_{ab}$ = 13,9 kg/h

Aufgabe 2.6

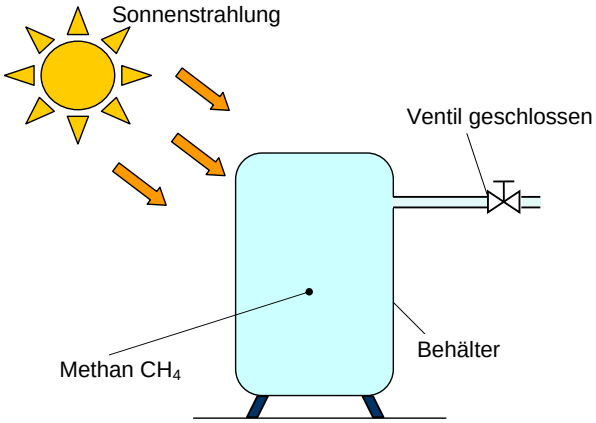
Ein Behälter mit dem Volumen $V = 20\ m^3$ enthält Druckluft mit der Temperatur $\vartheta_1 = 23\ °C$ und einem Überdruck $\Delta p_{üb1} = 8$ bar. Durch Verbrauch wird soviel Luft entnommen, dass der Druck auf $p_2 = 300$ kPa und die Temperatur auf $\vartheta_2 = 0\ °C$ absinken. Der barometrische Luftdruck beträgt $p_u = 0{,}1$ MPa. Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden.



Welche Luftmasse $\Delta m = m_2 - m_1$ wurde entnommen?
Lösung: $\Delta m = -135{,}19$ kg

Aufgabe 2.7

Die höchste Temperatur in einem Methan-Gasbehälter im Sommer beträgt $\vartheta_1 = 42\ °C$, die niedrigste im Winter $\vartheta_2 = -30\ °C$.

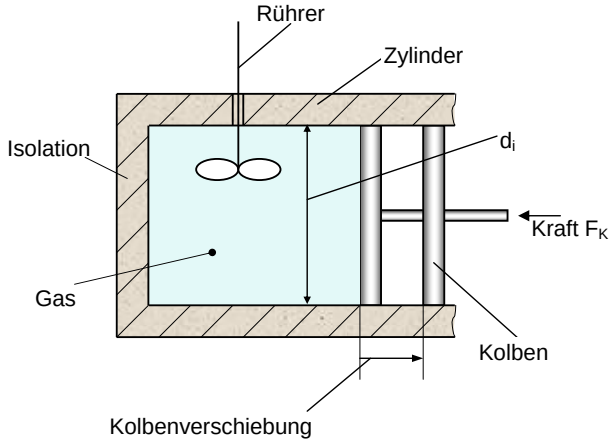


Welche Masse $\Delta m = m_2 - m_1$ kann der Behälter im Winter mehr aufnehmen als im Sommer, wenn sein Volumen $V = 2000\ m^3$ und der Druck $p = 104$ kPa sowohl im Sommer als auch im Winter beträgt? Methan darf bei den vorliegenden Parametern mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.
Lösung: $\Delta m = 377{,}1$ kg

3. Energiebilanz − I. Hauptsatz der Thermodynamik

Aufgabe 3.1

In einem gut isolierten Zylinder befindet sich ein Gas, auf das ein reibungsfrei beweglicher Kolben mit einer konstanten äußeren Kraft F_K = 1,25 kN wirkt. Der Kolben wird um 0,4 m nach außen verschoben. Der Innendurchmesser d_i des Zylinders beträgt 10 cm. Über einen Rührer wird dem Gas außerdem eine Wellenarbeit W_{W12} = 2,5 kJ zugeführt. Der Umgebungsdruck entspricht näherungsweise dem Normdruck.



a) Berechnen Sie die äußere Nutzarbeit am Kolben W_{N12}, wird sie zu- oder abgeführt ?

b) Ermitteln Sie die Volumenänderungsarbeit W_{V12} !

c) Wie groß ist die Änderung der inneren Energie des Gases $U_2 - U_1$?

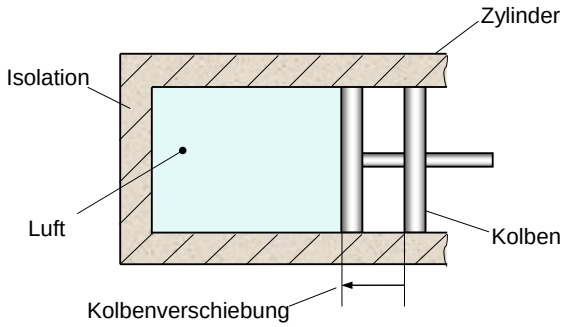
Lösung: a) W_{N12} = –0,5 kJ (abgeführt) b) W_{V12} = –0,818 kJ

c) $U_2 - U_1$ = 1,682 kJ

Aufgabe 3.2

In einem gut isolierten Zylinder mit reibungsfreiem Kolben befindet sich Luft mit einer Temperatur von ϑ_1 = 20 °C. Durch Zufuhr einer Volumenänderungsarbeit steigt die Temperatur der Luft auf ϑ_2 = 120 °C.

Die Luft kann mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.

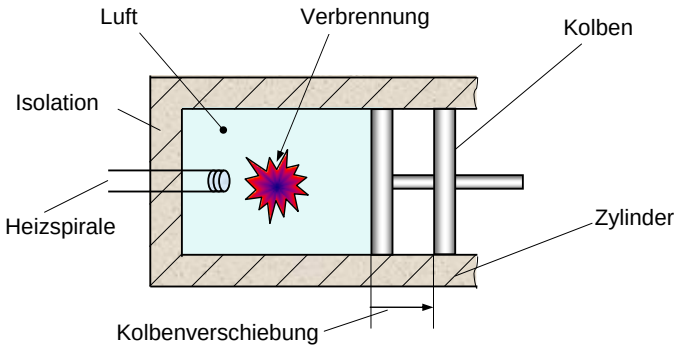


Wie groß ist die der Luft zugeführte spezifische Volumenänderungsarbeit w_{v12} ?

Lösung: w_{v12} = 72,10 kJ/kg

Aufgabe 3.3

In einem gut isolierten Zylinder befindet sich Luft. Durch Verbrennung in der eingeschlossenen Luft wird die Wärme Q_{12} = 10 kJ zugeführt. Gleichzeitig wird durch Volumenvergrößerung eine Volumenänderungsarbeit W_{v12} = –16 kJ abgeführt. Zusätzlich wird im Zylinder in der Zeitspanne Δt = 180 s eine Heizspirale mit einer Leistung P_{el12} = 200 W betrieben.



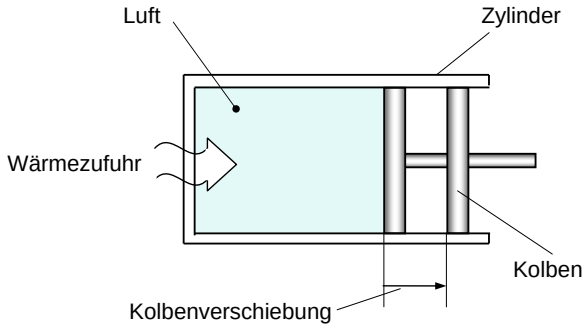
a) Berechnen Sie die durch die Heizung zugeführte elektrische Arbeit W_{el12} !

b) Wie groß ist die Änderung der inneren Energie $U_2–U_1$ der Luft ?

Lösung: a) W_{el12} = 36 kJ b) $U_2–U_1$ = 30 kJ

Aufgabe 3.4

Der Zylinder einer Kolbenmaschine ist mit Luft gefüllt. Über die Zylinderwände wird eine Wärme Q_{12} = 243,1 kJ zugeführt, so dass sich die Luft um ΔT = 100 K erwärmt. Gleichzeitig dehnt sich die Luft unter Druckänderung aus. Dabei wird eine Volumenänderungsarbeit W_{V12} = –200 kJ abgeführt. Die Luft kann mit guter Näherung als ideales Gas mit c_v, κ = const berechnet werden.

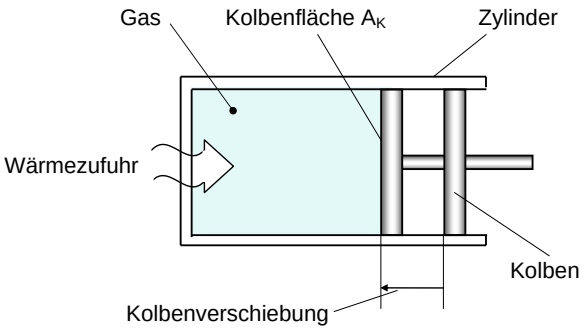


Welche Luftmasse m befindet sich im Zylinder ?

Lösung: m = 600,5 g

Aufgabe 3.5

Einem mit Gas gefüllten Zylinder wird die Wärme $Q_{12} = 14{,}8$ kJ zugeführt. Die Änderung der inneren Energie beträgt dabei $U_2 - U_1 = 21{,}3$ kJ. Der Kolben mit einer Fläche von $A_K = 700\ cm^2$ verringert das Innenvolumen, indem er um 50 cm reibungsfrei verschoben wird. Der barometrische Luftdruck ist mit $p_u = 100$ kPa bekannt.



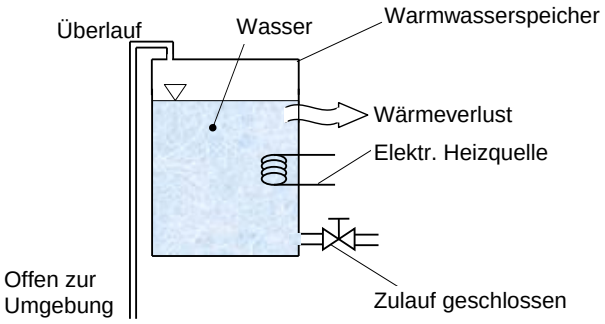
a) Wie groß ist die Volumenänderungsarbeit W_{V12} ?

b) Welche äußere Nutzarbeit W_{N12} ist an der Kolbenstange zuzuführen ?

Lösung: a) $W_{V12} = 6{,}5$ kJ b) $W_{N12} = 3{,}0$ kJ

Aufgabe 3.6

In einem Warmwasserspeicher steht das enthaltene Wasser unter Umgebungsdruck, der als konstant angenommen werden kann. Im Speicher befinden sich $V_1 = 80$ l Wasser mit einer Anfangstemperatur $\vartheta_1 = 15$ °C, das als ideale Flüssigkeit angesehen werden kann.



In welcher Zeit Δt wird das Wasser auf $\vartheta_2 = 70$ °C erwärmt, wenn

a) eine elektrische Heizquelle mit einer Leistung $P_{el} = 3200$ W bei Vernachlässigung der Wärmeverluste zur Verfügung steht ?

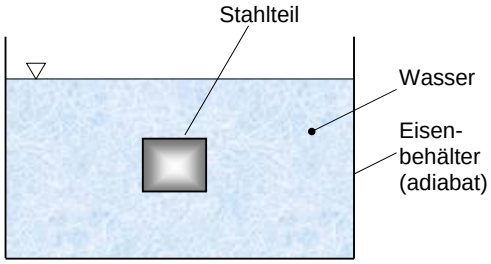
b) nur $\eta = 97$ % der angegebenen Heizleistung von $P_{el} = 3200$ W aufgrund von Wärmeverlusten zur Erwärmung genutzt werden können ?

Lösung: a) $\Delta t = 5745$ s = 95,76 min

b) $\Delta t = 5923$ s = 98,72 min

Aufgabe 3.7

Ein Stahlteil mit einer Masse m_{St} = 6,5 kg und einer Temperatur ϑ_{St1} = 1000 °C wird in einem adiabaten, mit Wasser gefülltem Eisenbehälter bei p = const abgekühlt. Die Masse des Wassers beträgt m_W = 10 kg und die des Behälters m_B = 2 kg. Die Anfangstemperaturen von Wasser und Behälter betragen $\vartheta_{1W} = \vartheta_{1B}$ = 10 °C. Nach dem Eintauchen des Stahlteils stellt sich nach vollständigem Temperaturausgleich eine Temperatur von ϑ_2 = 80 °C ein. Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten sind für Wasser c_{pW} = 4,19 kJ/(kg·K) und für den Behälter c_{pB} = 0,456 kJ/(kg·K). Beim Eintauchen tritt keine Wasserverdampfung auf.

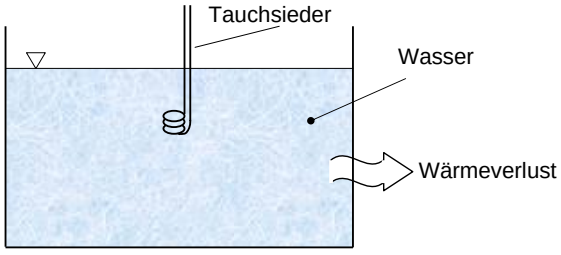


Wie groß ist die mittlere spezifische isobare Wärmekapazität des Stahlteils c_{pSt} im Temperaturbereich zwischen ϑ = 80 °C und ϑ = 1000 °C ?

Lösung: c_{pSt} = 0,501 kJ/(kg·K)

Aufgabe 3.8

V_1 = 1 l Wasser wird mit einem Tauchsieder bei konstantem Druck von ϑ_1 = 10 °C auf ϑ_2 = 100 °C erwärmt. Infolge des Wärmeverlustes an die Umgebung werden zur Erwärmung des Wassers nur η = 80 % der elektrischen Leistung P_{el} des Tauchsieders genutzt. Das Wasser kann mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit behandelt werden.



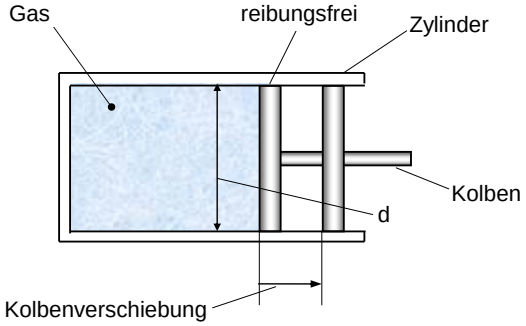
a) Welche elektrische Leistung P_{el} muss der Tauchsieder haben, wenn das Wasser in einer Zeit von Δt = 15 min erwärmt werden soll ?

b) In welcher Zeit Δt läuft diese Erwärmung bei gleichem Wirkungsgrad ab, wenn ein Tauchsieder mit einer elektrischen Leistung P_{el} = 1000 W verwendet wird ?

Lösung: a) P_{el} = 523,5 W b) Δt = 471 s = 7,853 min

Aufgabe 3.9

In einem Zylinder mit einem reibungsfrei beweglichen Kolben (Durchmesser d = 0,6 m) befindet sich ein Gas mit einem konstanten Druck p = 0,5 MPa. Durch eine Wärmezuführung von Q_{12} = 300 kJ erfolgt eine Volumenvergrößerung, so dass sich der Kolben um 0,5 m nach außen verschiebt.



a) Welche Volumenänderungsarbeit W_{V12} wird vom Gas geleistet ?

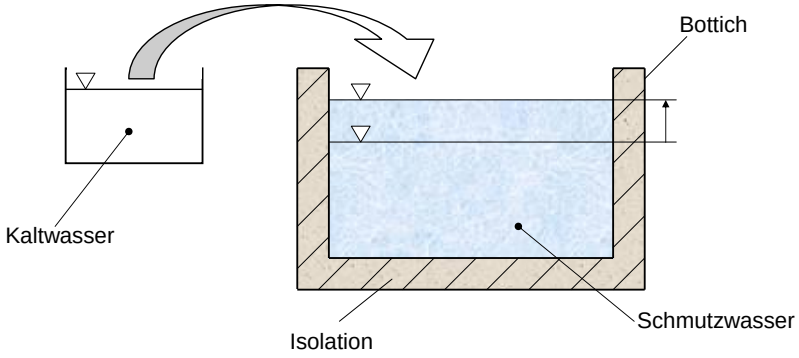
b) Wie groß ist die Änderung der inneren Energie $U_2 - U_1$?

Lösung: a) W_{V12} = –70,69 kJ b) $U_2 - U_1$ = 229,31 kJ

Aufgabe 3.10

In einem unter konstantem Atmosphärendruck stehenden, gut isolierten Bottich befinden sich 120 l Schmutzwasser mit einer Temperatur ϑ_{1S} = 95 °C. Um die Temperatur auf den für die Einleitung in das Abwassersystem geforderten Wert ϑ_2 = 60 °C zu bringen, muss kaltes Wasser beigemischt werden. Das zur Verfügung stehende kalte Wasser besitzt eine Temperatur ϑ_{1W} = 12 °C.

(Für das Schmutzwasser können in erster Näherung die Stoffwerte von reinem Wasser verwendet werden. Wasser darf bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel angesehen werden.)



a) Wieviel Liter kaltes Wasser müssen beigemischt werden (Berechnung über Enthalpien) ?

b) Führen Sie die Berechnung von a) mit konstanten Werten für c_{pm} und ρ_m, ermittelt bei der Mischungstemperatur 60 °C durch !

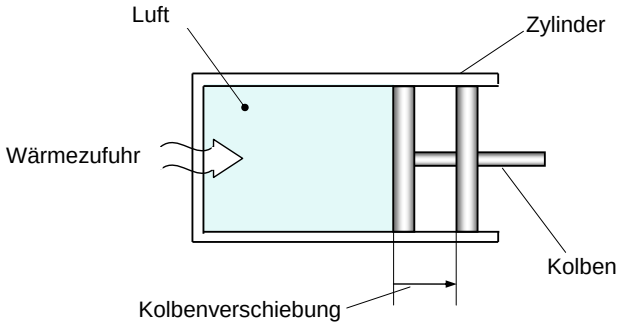
c) Welcher relative Fehler in % wird bei b) im Vergleich zu a) begangen ?

Lösung: a) V_{1W} = 84,5 l b) V_{1W} = 87,5 l (für Näherung c_{pm}, ρ_m = const)

c) $\dfrac{V_{1W}(c_{pm},\rho_m = \text{const}) - V_{1W}}{V_{1W}} \cdot 100\,\% = +3{,}6\,\%$

Aufgabe 3.11

Luft mit $V_1 = 0{,}5\ m^3$ und $\vartheta_1 = 20\ °C$ leistet bei konstantem Druck $p = 0{,}3\ MPa$ in einem Zylinder eine Volumenänderungsarbeit $W_{V12} = -30\ kJ$. Außerdem wird Wärme zugeführt. (Die Luft darf mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.)



Es sind zu ermitteln:

a) die Masse m der Luft,

b) das Volumen V_2 der Luft am Ende des Vorgangs,

c) die Endtemperatur ϑ_2,

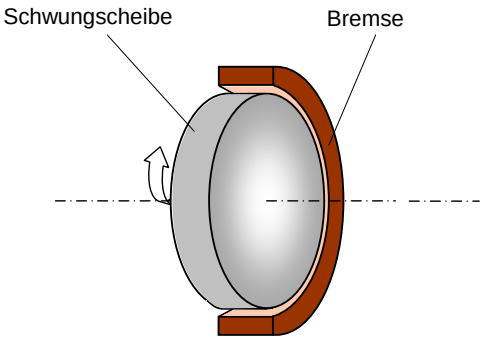
d) die zuzuführende Wärme Q_{12}.

Lösung: a) $m = 1{,}782\ kg$ b) $V_2 = 0{,}6\ m^3$

c) $\vartheta_2 = 78{,}63\ °C$ d) $Q_{12} = 105{,}16\ kJ$

Aufgabe 3.12

Eine mit unbekannter Drehzahl n rotierende Schwungscheibe wird durch Bremsen zum Stillstand gebracht. Ein Anteil von 30 % der kinetischen Energie der Scheibe führt dabei zur Erhöhung der Energie der Bremsteile. Die Masse der Bremsteile beträgt $m = 12\ kg$. Die mittlere spezifische Wärmekapazität der Bremsteile wird mit $c_{pm} = 0{,}5024\ kJ/(kg \cdot K)$ angegeben. Die Schwungscheibe besitzt ein Massenträgheitsmoment $\Theta = 1465{,}8\ J \cdot s^2$.

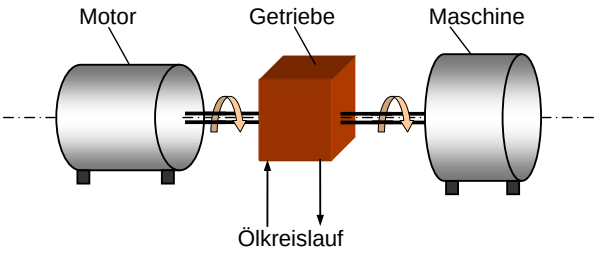


Wie hoch war die Drehzahl der Schwungscheibe vor dem Bremsvorgang, wenn beim Bremsen die Temperatur der Bremsteile im Durchschnitt um $\Delta\vartheta = 400\ K$ steigt ?

Lösung: $n = 16{,}668\ s^{-1}$

Aufgabe 3.13

Einem Getriebe wird von einem Motor die Leistung 250 kW zugeführt. An das Getriebe ist eine Maschine angeschlossen. Zur Kühlung werden durch das Getriebe beim stationären Betrieb stündlich 1000 kg Öl gepumpt, das sich dabei um $\Delta\vartheta = 20$ K erwärmt. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des Öls beträgt $c_{pm} = 1{,}675$ kJ/(kg·K). Die Geschwindigkeit des Öls ist an Ein- und Austrittsöffnung des Getriebes näherungsweise gleich. Die beiden Öffnungen liegen auf gleicher Höhe. Das Getriebe kann als ideal wärmeisoliert und das Öl mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit angesehen werden.



a) Erstellen Sie eine Prinzipskizze und tragen Sie die gegebenen und gesuchten Größen an !

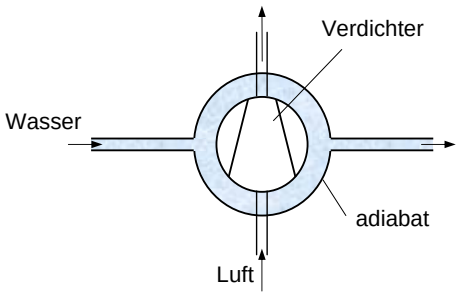
b) Welche Leistung P_G steht an der Getriebeabtriebswelle zum Antrieb der Maschine zur Verfügung ?

c) Wie groß ist der Getriebewirkungsgrad η_G ?

Lösung: b) $P_G = -240{,}69$ kW c) $\eta_G = 0{,}963$

Aufgabe 3.14

In einem stationär arbeitenden, nach außen adiabaten Kompressor mit Wasserkühlung wird Luft verdichtet. Dabei erhöht sich der Enthalpiestrom der Luft um $\dot{H}_{2L} - \dot{H}_{1L} = 17 \cdot 10^4$ kJ/h und der Enthalpiestrom des zur Kühlung dienenden Wassers um $\dot{H}_{2W} - \dot{H}_{1W} = 1 \cdot 10^4$ kJ/h. Die Änderungen der kinetischen und potentiellen Energien des Luft- und Wasserstromes können vernachlässigt werden.

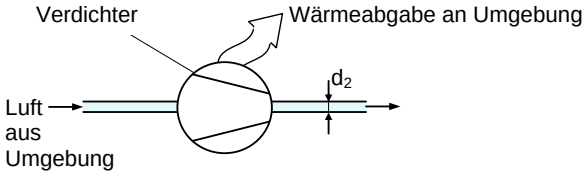


Welche technische Antriebsleistung P_{t12} besitzt der Kompressor ?

Lösung: $P_{t12} = 50$ kW

Aufgabe 3.15

Ein stationär arbeitender Kompressor verdichtet $\dot{m} = 1$ kg/s Luft aus der Umgebung mit $\vartheta_1 = 10$ °C auf $p_2 = 0{,}4$ MPa und $\vartheta_2 = 120$ °C, wobei durch Kühlung außerdem der Wärmestrom $\dot{Q}_{12} = -5$ kW an die Umgebung abgegeben wird. Die Luft verlässt den Verdichter in einer Rohrleitung mit dem Durchmesser $d_2 = 0{,}16$ m . Die Eintrittsgeschwindigkeit c_1 kann gegenüber der Austrittsgeschwindigkeit c_2 vernachlässigt werden. Die Luft kann bei den vorliegenden Parametern mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.



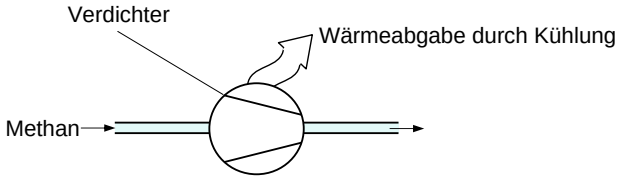
a) Mit welcher Geschwindigkeit c_2 strömt die Luft aus dem Verdichter ?

b) Welche Antriebsleistung P_{t12}^{st} besitzt der Verdichter ?

Lösung: a) $c_2 = 14{,}03$ m/s b) $P_{t12}^{st} = 115{,}95$ kW

Aufgabe 3.16

In einem stationär arbeitenden, gekühlten Kompressor tritt $\dot{m} = 10$ kg/s Methan mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit $c_1 = 170$ m/s und der Temperatur $\vartheta_1 = 20$ °C ein. Am Austritt wurde der Zustand des Methans mit $c_2 = 100$ m/s und $\vartheta_2 = 100$ °C bestimmt. Außerdem wird durch die Kühlung eine spezifische Wärme $q_{12} = -10$ kJ/kg abgeführt. Das Methan kann mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.



a) Wie groß ist die Antriebsleistung P_{t12}^{st} des Kompressors ?

b) Ermitteln Sie die Antriebsleistung P_{t12} ohne Berücksichtigung der Änderung der kinetischen Energie !

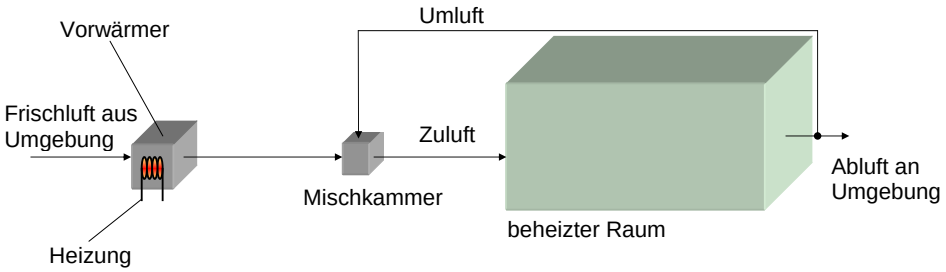
c) Welcher relative Fehler in % wird dabei begangen ?

Lösung: a) $P_{t12}^{st} = 1861{,}6$ kW b) $P_{t12} = 1956{,}1$ kW (ohne $\Delta\dot{E}_{kin}$)

c) $$\frac{P_{t12} - P_{t12}^{st}}{P_{t12}^{st}} \cdot 100\% = +\,5{,}08\ \%$$

Aufgabe 3.17

In einer stationär arbeitenden Luftheizungsanlage (vgl. Bild) wird der Umgebung ein Frischluftstrom $\dot{m}_F$ entnommen und im Vorwärmer auf die Temperatur ϑ_V aufgeheizt. Diesem Frischluftstrom wird dann isobar in der Mischkammer der Umluftstrom $\dot{m}_U$ mit der Temperatur $\vartheta_U = 22\ °C$ zugemischt. In den zu beheizenden Raum strömt der Zuluftstrom $\dot{m}_Z$ mit der Mischtemperatur $\vartheta_Z = 30\ °C$. Die Änderungen der kinetischen Energie der Luftströme können vernachlässigt werden.
(Die Luft kann als ideales Gas mit konstanter spezifischer Wärmekapazität, näherungsweise bei ϑ_Z ermittelt, berechnet werden.)



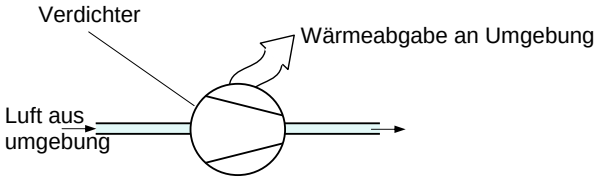
a) Wie groß ist das Verhältnis der Massenströme der Umluft zur Frischluft $\dot{m}_U/\dot{m}_F$, wenn die Temperatur $\vartheta_V = 100\ °C$ beträgt ?

b) Auf welche Temperatur ϑ_V muss die Frischluft vorgewärmt werden, wenn aus hygienischen Gründen gefordert wird, dass der Zuluftstrom $\dot{m}_Z$ zu 50 % aus Frischluft besteht?

Lösung: a) $\dot{m}_U / \dot{m}_F = 8{,}75$ b) $\vartheta_V = 38\ °C$

Aufgabe 3.18

Ein Kompressor verdichtet stationär $\dot{V}_1 = 800\ m^3/h$ Luft mit $v_1 = 0{,}80\ m^3/kg$. Die spezifische Enthalpie der Luft steigt dabei um $\Delta h = 60\ kJ/kg$. An die Umgebung werden $q_{12} = -40\ kJ/kg$ abgeführt. Die Änderung der kinetischen Energie des Luftstromes kann vernachlässigt werden.

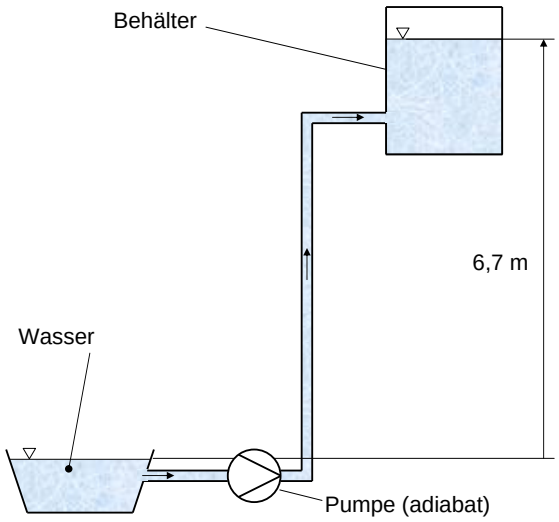


Welche Antriebsleistung P_{t12} hat der Kompressor ?

Lösung: $P_{t12} = 27{,}78\ kW$

Aufgabe 3.19

Eine als adiabat anzusehende Pumpe fördert aus einem Behälter $\dot{m}$ = 2 kg/s Wasser mit einer mittleren Temperatur von 20 °C in einen um 6,7 m höher gelegenen Behälter in stationärer Betriebsweise. Aufgrund innerer Reibung in der Pumpe erwärmt sich das Wasser dabei um 0,1 K. Die Änderung der kinetischen Energie des Wasserstromes kann vernachlässigt werden. Das Wasser darf mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit mit c_{pm} = const, ermittelt bei der mittleren Temperatur, betrachtet werden.

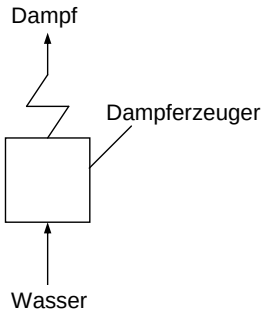


Wie groß ist die Leistung P_{t12}^{st} der Pumpe ?

Lösung: P_{t12}^{st} = 0,968 kW

Aufgabe 3.20

In einen bei konstantem Druck p = 160 bar stationär arbeitenden Dampferzeuger wird ein Wasserstrom $\dot{m}$ = 70 t/h mit der Temperatur ϑ_1 = 50 °C eingespeist. Die Temperatur des austretenden Dampfes beträgt ϑ_2 = 540 °C. Kinetische und potentielle Energieänderungen können vernachlässigt werden. (Lösen Sie die Aufgabe mit der Wasserdampftafel.)

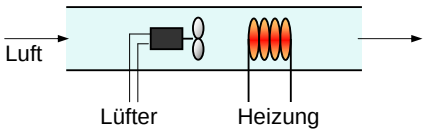


Welcher Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$ ist dem Wasser zuzuführen ?

Lösung: $\dot{Q}_{12}$ = 62,009 MW

Aufgabe 3.21

Ein stationär arbeitender Heizlüfter besitzt eine Heizleistung von $\dot{Q}_{12} = 2$ kW und eine Lüfterleistung $P_{t12} = 200$ W.

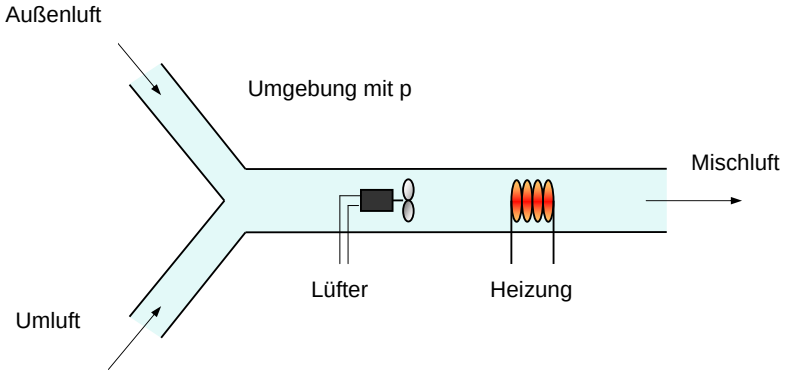


Welchen Luftmassestrom $\dot{m}$ mit einer Eintrittstemperatur von $\vartheta_1 = 10$ °C kann der Heizlüfter auf $\vartheta_2 = 40$ °C erwärmen ? Die Änderung der kinetischen Energie kann auf Grund der geringen Austrittsgeschwindigkeit vernachlässigt werden (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern mit guter Genauigkeit als ideales Gas berechnet werden.).

Lösung: $\dot{m} = 262{,}72$ kg/h

Aufgabe 3.22

In einem Lüftungssystem werden $\dot{V}_{1A} = 300$ m³/h kalte Außenluft mit einer Temperatur $\vartheta_{1A} = -10$ °C mit $\dot{m}_{1U} = 200$ kg/h Umluft der Temperatur $\vartheta_{1U} = 35$ °C bei einem Druck $p = 0{,}11$ MPa stationär gemischt. Die Mischluft wird anschließend von einem Lüfter mit einer Leistung $P_t = 1$ kW durch einen Elektroheizer gefördert und verlässt diesen mit einer Temperatur $\vartheta_2 = 40$ °C (Die Luft kann mit guter Genauigkeit als ideales Gas betrachtet werden.).



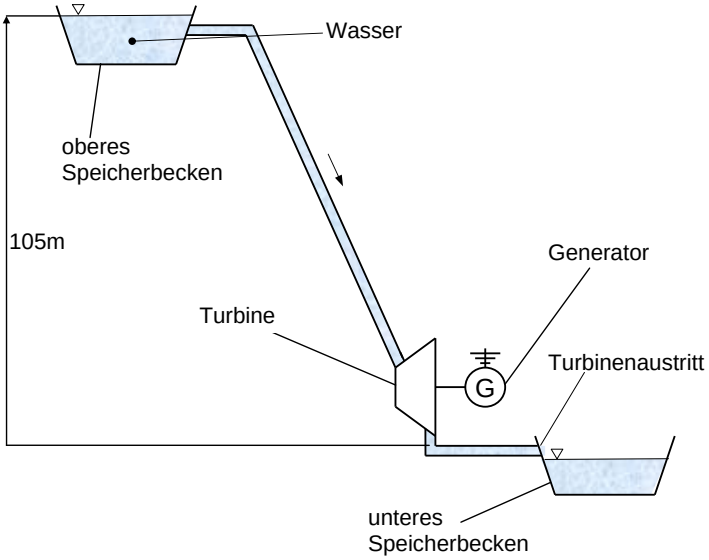
a) Welcher Massestrom $\dot{m}_2$ Luft wird durch den Elektroheizer gefördert ?

b) Welche Leistung $\dot{W}_{el}$ besitzt der Elektroheizer ?

Lösung: a) $\dot{m}_2 = 0{,}1769$ kg/s b) $\dot{W}_{el} = 5{,}373$ kW

Aufgabe 3.23

Die Turbine eines Wasserkraftwerkes wird stationär von $\dot{m} = 10^4$ kg/s Wasser mit einer mittleren Temperatur von 12 °C durchströmt. Die Wasseroberfläche im Speicherbecken liegt 105 m über dem Turbinenaustritt und bleibt während des Betriebes der Turbine näherungsweise unverändert. Während die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Speicherbecken vernachlässigbar klein ist, beträgt sie am Turbinenaustritt $c_2 = 5$ m/s. Die Temperatur des aus der Turbine austretenden Wassers ist auf Grund innerer Reibung in der Turbine um 0,1 K höher als die Temperatur des eintretenden Wassers im Speicherbecken. Das Wasser kann mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit mit $c_{pm} = \text{const}$, ermittelt bei der mittleren Temperatur, berechnet und die Turbine als adiabat betrachtet werden.



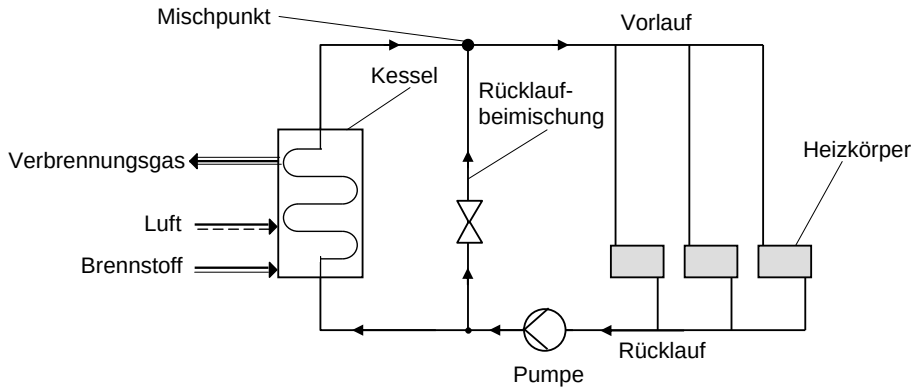
a) Wie groß ist die Leistung P_{t12}^{st} der Turbine ?

b) Welche Turbinenleistung P_{t12}^{st} ergibt sich, wenn die Temperaturänderung ΔT des Wassers in der Berechnung nicht berücksichtigt wird ?

Lösung: a) $P_{t12}^{st} = -5{,}979$ MW b) $P_{t12}^{st} = -10{,}172$ MW (ohne ΔT)

Aufgabe 3.24

Die Rücklaufbeimischung einer Heizungsanlage ist so eingestellt, dass dem aus dem Kessel kommenden $\dot{m}_{1K} = 430$ kg/h Wasser mit einer Temperatur $\vartheta_{1K} = 85$ °C Rücklaufwasser $\dot{m}_{1R} = 120$ kg/h mit einer Temperatur $\vartheta_{1R} = 55$ °C stationär beigemischt wird. Das Wasser mit der unbekannten Mischungstemperatur ϑ_2 bildet den Vorlauf der Heizungsanlage. Dabei kann der Verlustwärmestrom der Rücklaufbeimischung im Vergleich zu den Energieströmen der Fluidströme vernachlässigt werden. (Das Wasser ist bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel anzusehen.)

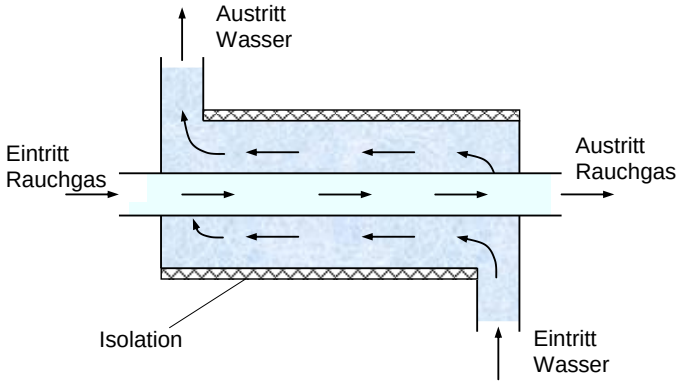


a) Wieviel kg/s gemischtes Vorlaufwasser stehen zur Verfügung?
b) Berechnen Sie die spezifische Enthalpie h_2 des Vorlaufwassers !
c) Ermitteln Sie die Mischungstemperatur ϑ_2 !

Lösung: a) $\dot{m}_2 = 0{,}1528$ kg/s b) $h_2 = 328{,}52$ kJ/kg c) $\vartheta_2 = 78{,}47$ °C

Aufgabe 3.25

In einem nach außen gut wärmeisolierten Wärmeübertrager soll Wasser mit einer Eintrittstemperatur $\vartheta_{1W} = 70$ °C um 40 K mit Hilfe von Rauchgas stationär erwärmt werden. Das Rauchgas besitzt einen Massestrom $\dot{m}_R = 1100$ kg/h und kühlt sich dabei von $\vartheta_{1R} = 550$ °C auf $\vartheta_{2R} = 300$ °C ab. (Das Rauchgas darf mit guter Näherung als ideales Gas mit $c_{pR} = 1{,}3$ kJ/(kg K) = const und das Wasser als ideale Flüssigkeit berechnet werden.)

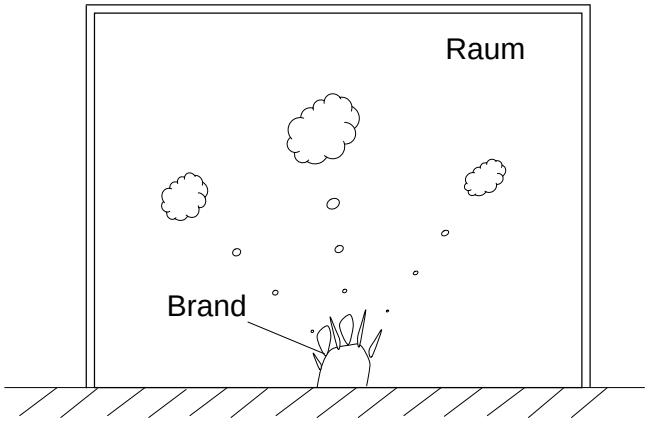


a) Welcher Massestrom Wasser $\dot{m}_W$ kann erwärmt werden ?
b) Welcher Wärmestrom $|\dot{Q}_{12}|$ wird vom Rauchgas an das Wasser übertragen ?

Lösung: a) $\dot{m}_W = 0{,}590$ kg/s b) $|\dot{Q}_{12}| = 99{,}31$ kW

Aufgabe 3.26

In einem geschlossenen Raum mit der Grundfläche von 40 m^2 und der Höhe von 4 m befindet sich vor Ausbruch eines Brandes Luft mit einer Temperatur ϑ_1 = 10 °C. Nach einer Zeit von 10 min nach dem Brandausbruch beträgt die Temperatur im Raum bereits ϑ_2 = 40 °C. Der Druck der Raumluft beträgt 1 bar und kann als konstant bleibend angesehen werden.
(Für die folgenden Berechnungen kann näherungsweise der Anteil Rauchgas in der Luft vernachlässigt werden. Die durch die Fugen der Türen und Fenster nach außen strömende Masse Luft darf ebenfalls vernachlässigt werden. Die Luft kann mit guter Näherung als ideales Gas mit c_p, κ = const berechnet werden.)

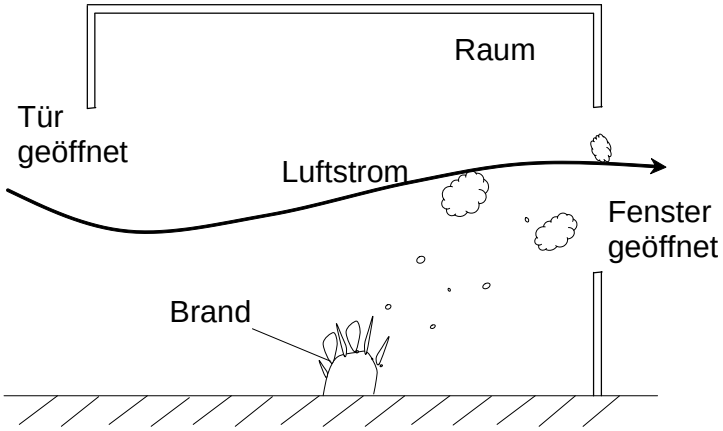


a) Welche Masse Luft m_1 befindet sich vor Ausbruch des Brandes im Raum ?
b) Welche Wärme Q_{12} führte der Brand der Raumluft zu ?
c) Wie hoch war dabei der zugeführte mittlere Wärmestrom $\dot{Q}_{12}$?
d) Welche Raumlufttemperatur ϑ_2 wird nach einer Zeit von Δt = 15 min erreicht.
e) Wie hoch war dabei der durch den Brand insgesamt zugeführte mittlere Wärmestrom $\dot{Q}_B$, wenn von $\dot{Q}_B$ nur 70 % der Raumluft zugeführt wurden und der verbleibende Anteil zu einer Erwärmung der Wände und des Fußbodens im Raum führte ?

Lösung: a) m_1 = 196,82 kg b) Q_{12} = 5933,25 kJ c) $\dot{Q}_{12}$ = 9,89 kW
d) ϑ_2 = 55,0 °C e) $\dot{Q}_B$ = 14,13 kW

Aufgabe 3.27

Durch einen Raum mit einem Brand strömt Luft mit einer Eintrittstemperatur von $\vartheta_1 = 20$ °C. Das Volumen des Raumes beträgt 60 m^3. Durch den Brand wird der durchströmenden Luft ein Wärmestrom von $\dot{Q}_{12} = 5$ kW zugeführt, so dass sie den Raum mit einer Temperatur von $\vartheta_2 = 50$ °C verlässt. Im betrachteten Zeitraum kann der Vorgang als stationär angenommen werden. Die Luft ist mit guter Genauigkeit als ideales Gas berechenbar. Der Luftdruck im Raum beträgt 0,1 MPa und kann als konstant angenommen werden.



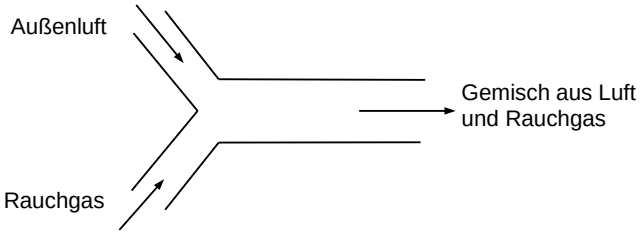
a) Ermitteln Sie den Massestrom $\dot{m}$ der Luft, der den Raum durchströmt und den Wärmestrom aufnimmt !

b) Welcher Volumenstrom $\dot{V}_1$ gelangt in den Raum, welcher stündlichen Luftwechselzahl λ entspricht er ?

Lösung: a) $\dot{m} = 596{,}78$ kg/h b) $\dot{V}_1 = 502{,}27$ m^3/h $\lambda = 8{,}37$ 1/h

Aufgabe 3.28

In einem Rauchabzugsystem werden $\dot{V}_{1L} = 300$ m^3/h kalte Außenluft mit einer Temperatur $\vartheta_{1L} = -10$ °C mit $\dot{V}_{1R} = 800$ m^3/h Rauchgas der Temperatur $\vartheta_{1R} = 60$ °C bei einem konstanten Druck $p = 0{,}1$ MPa stationär gemischt. Die Wärmeabgabe des Rauchabzugsystems an die Umgebung kann vernachlässigt werden.
(In erster Näherung dürfen die Eigenschaften des Rauchgases wie die von Luft berechnet werden. Die Luft ist mit guter Genauigkeit als ideales Gas berechenbar.).



a) Welcher Massestrom $\dot{m}_2$ des Gemisches aus Luft und Rauchgas verlässt das Rauchabzugsystem ?

b) Ermitteln Sie die Austrittstemperatur des Gemisches ϑ_2 !

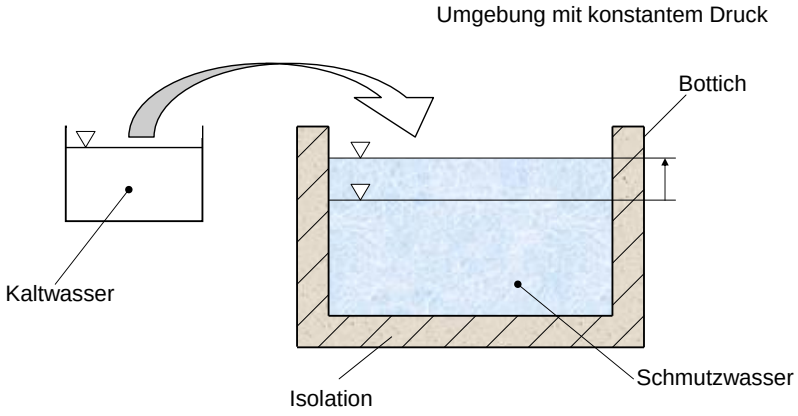
Lösung: a) $\dot{m}_2 = 1233{,}49$ kg/h

b) $\vartheta_2 = 37{,}49$ °C

4. Entropiebilanz − II. Hauptsatz der Thermodynamik

Aufgabe 4.1

Gemäß Aufgabe 3.10 befinden sich 120 l Schmutzwasser mit einer Temperatur ϑ_{1S} = 95 °C in einem unter konstantem Umgebungsdruck stehenden, gut isolierten Behälter. Um die Temperatur auf den für die Einleitung in das Abwassersystem geforderten Wert ϑ_2 = 60 °C zu bringen, muss kaltes Wasser beigemischt werden. Das zur Verfügung stehende kalte Wasser besitzt eine Temperatur ϑ_{1W} = 12 °C.
(Für das Schmutzwasser können in erster Näherung die Stoffwerte von reinem Wasser verwendet werden. Wasser darf bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel angesehen werden.)
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der folgenden Teilaufgaben die Ergebnisse der Aufgabe 3.10 .



a) Berechnen Sie die Entropieproduktion S_{12}^{irr} über die Ermittlung der s_T^{if}-Werte !

b) Berechnen Sie die Entropieproduktion S_{12}^{irr} mit konstanten Werten für c_{pm} und ρ_m, wobei diese bei der Mischungstemperatur 60 °C zu ermitteln sind!

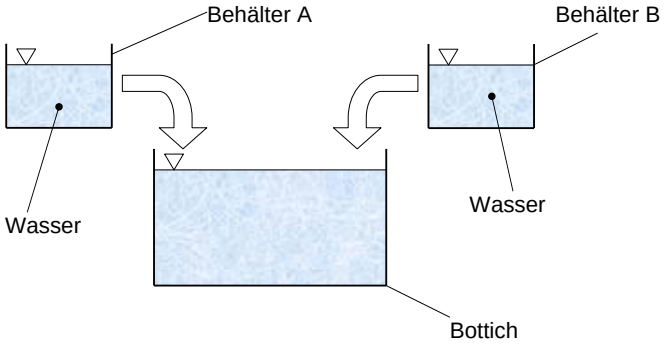
c) Welcher relative Fehler in % wird bei b) im Vergleich zu a) begangen ?

Lösung: a) S_{12}^{irr} = 6,583 kJ/K b) S_{12}^{irr} = 6,684 kJ/K (für c_{pm}, ρ_m = const)

c) $$\frac{S_{12}^{irr}(c_{pm},\rho_m = const) - S_{12}^{irr}}{S_{12}^{irr}} \cdot 100\,\% = +1{,}5\,\%$$

Aufgabe 4.2

m_{1A} = 30 kg Wasser mit einer Temperatur ϑ_{1A} = 90 °C wird bei konstantem Druck mit m_{1B} = 20 kg Wasser von ϑ_{1B} = 15°C gemischt. Das Wasser darf als inkompressibel berechnet werden.



Unter der Annahme, dass bei diesem Mischungsvorgang keine Energie die Systemgrenze überschreitet, sind zu bestimmen:

a) die Mischungsenthalpie h_2

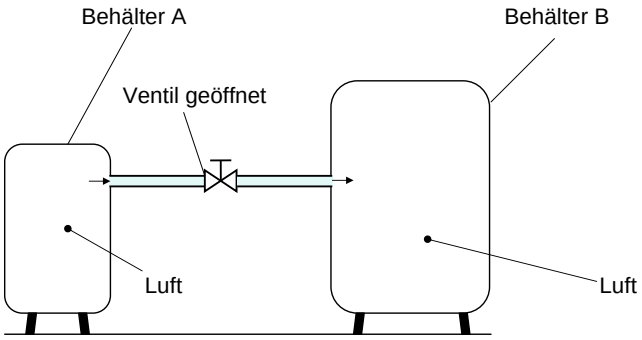
b) die Mischungstemperatur ϑ_2

c) die dabei auftretende Entropieproduktion S_{12}^{irr} !

Lösung: a) = 251,37 kJ/kg b) ϑ_2 = 60,05 °C c) S_{12}^{irr} = 1,325 kJ/K

Aufgabe 4.3

Luft strömt aus dem Behälter A mit dem Volumen V_A = 2 m^3 in einen Behälter B mit dem Volumen V_B = 5 m^3 bis zum Druckausgleich über. Beim Überströmen findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Der Anfangsdruck im Behälter A betrug p_{1A} = 1,5 MPa, während im Behälter B ein Anfangsdruck p_{1B} = 0,1 MPa herrschte. Vor und nach dem Überströmvorgang beträgt die Temperatur der Luft ϑ = 10 °C. (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas berechnet werden.)



Wie groß sind:

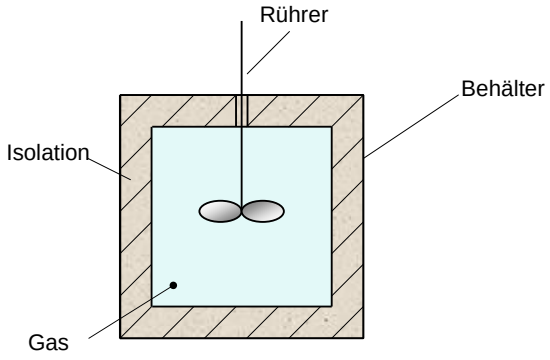
a) der Ausgleichsdruck p_2

b) die Entropieproduktion S_{12}^{irr} ?

Lösung: a) p_2 = 0,5 MPa b) S_{12}^{irr} = 8,798 kJ/K

Aufgabe 4.4

In einem als adiabat anzusehenden geschlossenen Behälter mit starren Wänden befindet sich m = 2 kg Gas mit der Temperatur ϑ_1 = 30 °C. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des als ideal anzusehenden Gases beträgt c_{vm} = 0,80 kJ/(kg·K). Mit einem Rührwerk wird eine Dissipationsarbeit W_{diss12} = 10 kJ zugeführt.



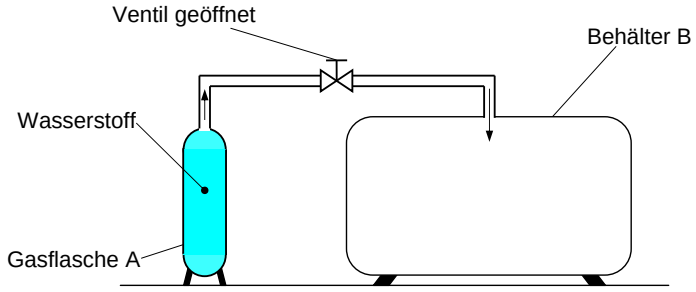
a) Welche Temperatur ϑ_2 stellt sich ein ?

b) Wie groß ist die Entropieproduktion S_{12}^{irr} bei diesem Vorgang ?

Lösung: a) ϑ_2 = 36,25 °C b) S_{12}^{irr} = 0,0327 kJ/K

Aufgabe 4.5

In einer Gasflasche von V_A = 0,04 m^3 befindet sich Wasserstoff mit p_{1A} = 15 MPa und ϑ_{1A} = 20 °C. Die Flasche wird mit einem evakuierten Behälter von V_B = 50 m^3 verbunden. Bei dem Überströmvorgang findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt und die Temperatur bleibt konstant. (Der Wasserstoff kann mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.)

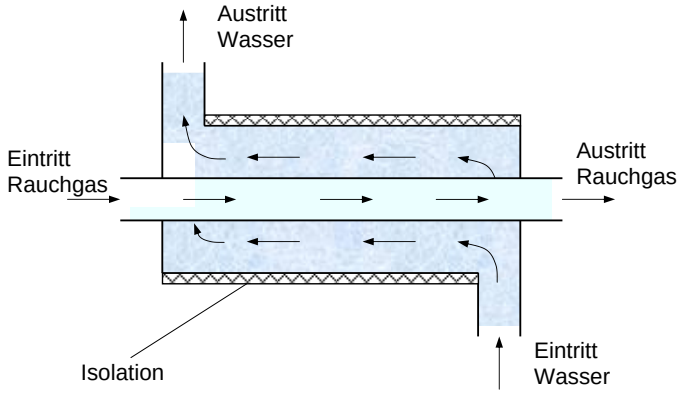


Wie groß ist die Entropieproduktion S_{12}^{irr} bei diesem Überströmvorgang ?

Lösung: S_{12}^{irr} = 14,60 kJ/K

Aufgabe 4.6

Gemäß Aufgabe 3.25 soll in einem nach außen gut wärmeisolierten Wärmeübertrager Wasser mit einer Eintrittstemperatur ϑ_{1W} = 70 °C um 40 K mit Hilfe von Rauchgas erwärmt werden. Das Rauchgas besitzt einen Massestrom $\dot{m}_R$ = 1100 kg/h und kühlt sich dabei von ϑ_{1R} = 550 °C auf ϑ_{2R} = 300 °C ab. (Das Rauchgas darf mit guter Näherung als ideales Gas mit c_{pR} = 1,3 kJ/(kg K) = const und das Wasser als ideale Flüssigkeit berechnet werden.)
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der Aufgabe die Ergebnisse der Aufgabe 3.25 .

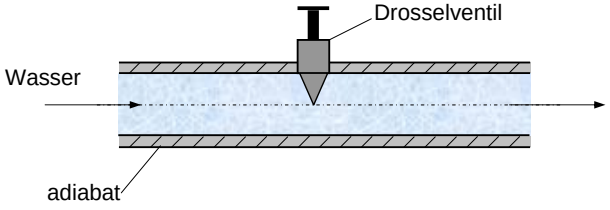


Berechnen Sie den auftretenden Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$, wobei die Änderungen der Drücke des Rauchgases und des Wassers vernachlässigt werden können!

Lösung: $\dot{S}_{12}^{irr}$ = 0,130 kW/K

Aufgabe 4.7

Ein als inkompressibel anzusehender Wassermassestrom $\dot{m}$ = 30 kg/min strömt durch ein Drosselventil. Der Druck p_1 = 0,5 MPa der Flüssigkeit wird dabei auf p_2 = 0,2 MPa gedrosselt, wobei die Temperatur ϑ = 22 °C konstant bleibt. Das Drosselventil kann mit guter Näherung als adiabat angesehen werden.

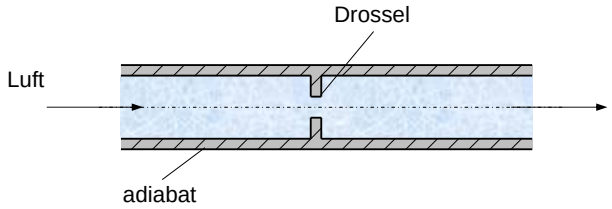


Bestimmen Sie den im Drosselventil auftretenden Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$!

Lösung: $\dot{S}_{12}^{irr}$ = 0,0342 W/K

Aufgabe 4.8

Ein Luftstrom $\dot{V}_1 = 1\ m^3/min$ (ideales Gas) wird bei konstanter Temperatur $\vartheta = 20\ °C$ von $p_1 = 0{,}2\ MPa$ auf $p_2 = 0{,}1\ MPa$ gedrosselt. Das Drosselventil kann mit guter Genauigkeit als adiabat angesehen werden.

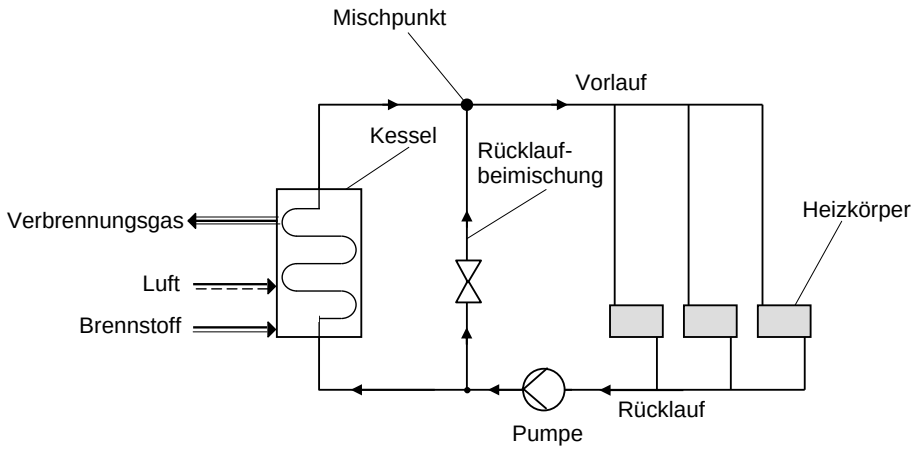


Wie groß ist der dabei auftretende Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$?

Lösung: $\dot{S}_{12}^{irr} = 7{,}88\ W/K$

Aufgabe 4.9

Gemäß Aufgabe 3.24 ist die Rücklaufbeimischung einer Heizungsanlage so eingestellt, dass dem aus dem Kessel kommenden $\dot{m}_{1K} = 430\ kg/h$ Wasser mit einer Temperatur $\vartheta_{1K} = 85°C$ Rücklaufwasser $\dot{m}_{1R} = 120\ kg/h$ mit einer Temperatur $\vartheta_{1R} = 55\ °C$ beigemischt wird. Das Wasser mit der unbekannten Mischungstemperatur ϑ_2 bildet den Vorlauf der Heizungsanlage. Dabei kann der Verlustwärmestrom der Rücklaufbeimischung im Vergleich zu den Energieströmen der Fluidströme vernachlässigt werden. Desweiteren kann die Mischung als isobar angesehen werden. (Das Wasser ist bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel berechenbar.)
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der Aufgabe die Ergebnisse der Aufgabe 3.24 .



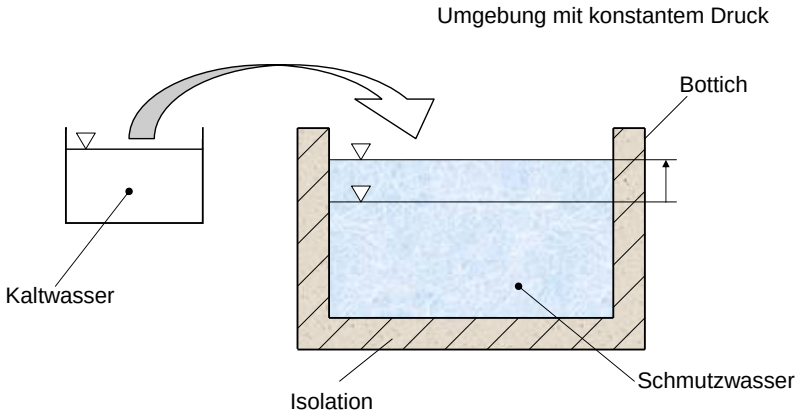
Ermitteln Sie den in der Rücklaufbeimischung auftretenden Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$!

Lösung: $\dot{S}_{12}^{irr} = 0{,}4011\ W/K$

5. Exergiebilanz − Technische Arbeitsfähigkeit

Aufgabe 5.1

Gemäß Aufgabe 3.10 befinden sich 120 l Schmutzwasser mit einer Temperatur ϑ_{1S} = 95 °C in einem unter konstantem Umgebungsdruck stehenden, gut isolierten Behälter. Um die Temperatur auf den für die Einleitung in das Abwassersystem geforderten Wert ϑ_2 = 60 °C zu bringen, muss kaltes Wasser beigemischt werden. Das zur Verfügung stehende kalte Wasser besitzt eine Temperatur ϑ_{1W} = 12 °C.
(Für das Schmutzwasser können in erster Näherung die Stoffwerte von reinem Wasser verwendet werden. Wasser darf bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel angesehen werden.)
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der folgenden Teilaufgaben die Ergebnisse der Aufgabe 3.10 .



a) Berechnen Sie die Exergieverluste E_{v12} bei einer Umgebungstemperatur ϑ_u = 0 °C über die Exergiebilanz!

b) Berechnen Sie die Exergieverluste E_{v12} mit konstanten Werten für c_{pm} und ρ_m, ermittelt bei der Mischungstemperatur 60 °C !

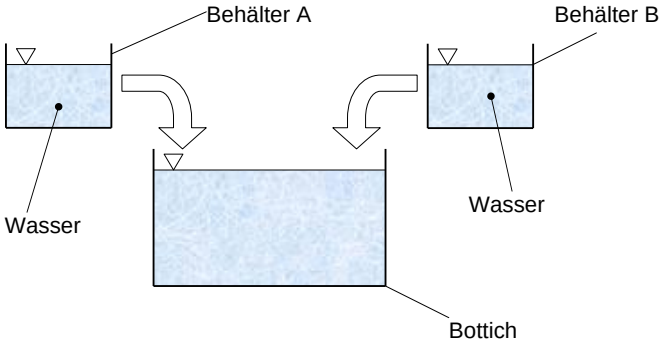
c) Welcher relative Fehler in % wird bei b) im Vergleich zu a) begangen ?

Lösung: a) E_{v12} = 1798,2 kJ b) E_{v12} = 1825,8 kJ (für c_{pm}, ρ_m = const)

c) $$\frac{E_{v12}(c_{pm},\rho_m = \text{const}) - E_{v12}}{E_{v12}} \cdot 100\,\% = +1{,}5\,\%$$

Aufgabe 5.2

Gemäß Aufgabe 4.2 wird m_{1A} = 30 kg Wasser mit einer Temperatur ϑ_{1A} = 90 °C bei konstantem Druck mit m_{1B} = 20 kg Wasser von ϑ_{1B} = 15 °C gemischt. Das Wasser darf als inkompressibel mit einer konstanten spezifischen Wärmekapazität c_{pm} = 4,185 kJ/(kg·K) berechnet werden.

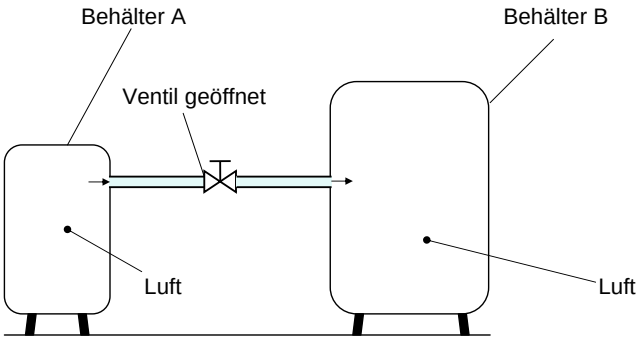


Unter der Annahme, dass bei diesem Mischungsvorgang keine Energie die Systemgrenze überschreitet, ist der Exergieverlust E_{v12} bei einer Umgebungstemperatur ϑ_u = 0 °C mit Hilfe der Exergiebilanz zu bestimmen !

Lösung: E_{v12} = 360,7 kJ

Aufgabe 5.3

Gemäß Aufgabe 4.3 strömt Luft aus dem Behälter A mit dem Volumen V_A = 2 m^3 in einen Behälter B mit dem Volumen V_B = 5 m^3 bis zum Druckausgleich über. Der Anfangsdruck im Behälter A betrug p_{1A} = 1,5 MPa, während im Behälter B ein Anfangsdruck p_{1B} = 0,1 MPa herrschte. Vor und nach dem Überströmvorgang beträgt die Temperatur der Luft ϑ = 10 °C. (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas berechnet werden.)

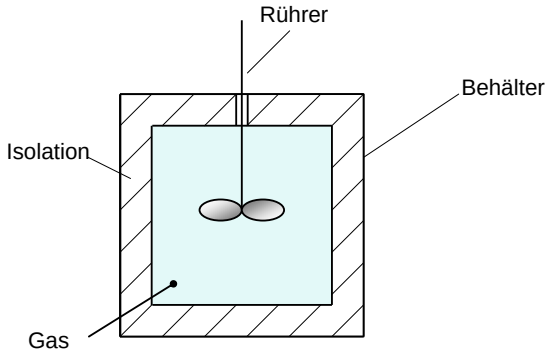


Berechnen Sie den Exergieverlust E_{v12} bei einer Umgebungstemperatur von ϑ_u = 10 °C und einem Umgebungsdruck von p_u = 0,101325 MPa, indem Sie die Exergiebilanz aufstellen.

Lösung: E_{v12} = 2491,1 kJ

Aufgabe 5.4

Gemäß Aufgabe 4.4 befindet sich in einem adiabaten Behälter mit starren Wänden m = 2 kg Gas mit der Temperatur ϑ_1 = 30 °C. Die mittlere spezifische Wärmekapazität des als ideal anzusehenden Gases beträgt c_{vm} = 0,80 kJ/(kg·K). Mit einem Rührwerk wird eine Dissipationsarbeit W_{diss12} = 10 kJ zugeführt.

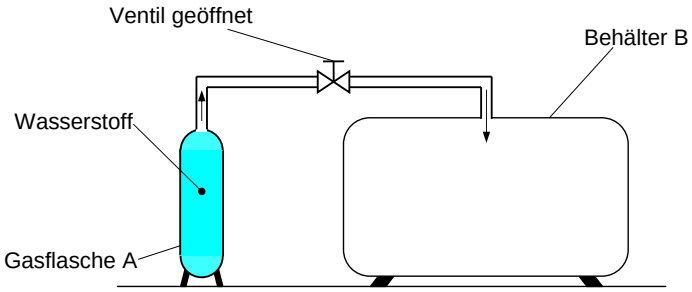


Berechnen Sie den Exergieverlust E_{v12} bei einer Umgebungstemperatur von ϑ_u = 15 °C über die Exergiebilanz !

Lösung: E_{v12} = 9,409 kJ

Aufgabe 5.5

Gemäß Aufgabe 4.5 befindet sich in einer Gasflasche von V_A = 0,04 m^3 Wasserstoff mit p_{1A} = 15 MPa und ϑ_{1A} = 20 °C. Die Flasche wird mit einem evakuierten Behälter von V_B = 50 m^3 verbunden. Bei dem Überströmvorgang findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt und die Temperatur bleibt konstant. (Der Wasserstoff kann mit guter Näherung als ideales Gas berechnet werden.)

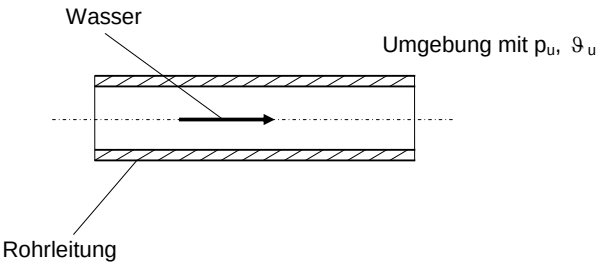


Ermitteln Sie den Exergieverlust E_{v12} mittels Exergiebilanz, wenn eine Umgebungstemperatur T_u = 300 K zugrunde gelegt wird ?

Lösung: E_{v12} = 4,38 MJ

Aufgabe 5.6

In einer Rohrleitung strömt $\dot{V} = 10$ l/s Wasser mit einer Temperatur von $\vartheta = 100$ °C und einem Druck von 5 bar. Die Umgebungstemperatur beträgt $\vartheta_u = 20$ °C und der Umgebungsdruck $p_u = 0{,}1$ MPa Das Wasser darf mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit berechnet werden.

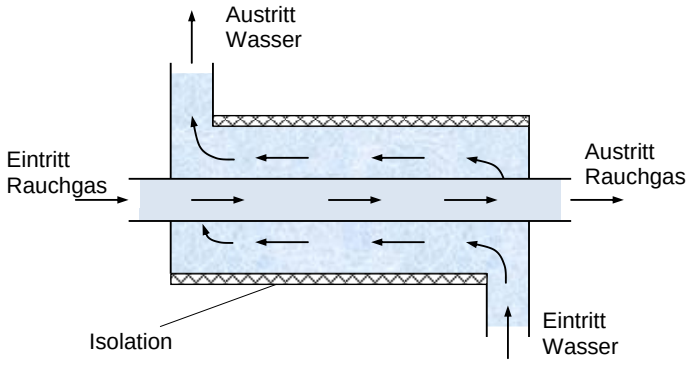


a) Berechnen Sie die spezifische Exergie e sowie die technische Arbeitsfähigkeit $\dot{E}$ (Exergiestrom) des Wassers, die einem offenen System entnommen werden kann!
b) Ermitteln Sie zum Vergleich die spezifische Enthalpie h und den Enthalpiestrom $\dot{H}$ des Wassers bezogen auf den Umgebungszustand Bezugszustand $T_o=T_u$, $h_o=h_u$!
c) Welcher prozentuale Anteil dieser Enthalpie ist Exergie und welcher Anergie?

Lösung: a) e = 39,044 kJ/kg $\dot{E}$ = 374,18 kW
b) h = 335,18 kJ/kg $\dot{H}$ = 3212,20 kW
c) 11,6 % Exergie 88,4 % Anergie

Aufgabe 5.7

Gemäß Aufgabe 3.25 soll in einem nach außen gut wärmeisolierten Wärmeübertrager Wasser mit einer Eintrittstemperatur $\vartheta_{1W} = 70$ °C um 40 K mit Hilfe von Rauchgas erwärmt werden. Das Rauchgas besitzt einen Massestrom $\dot{m}_R = 1100$ kg/h und kühlt sich dabei von $\vartheta_{1R} = 550$ °C auf $\vartheta_{2R} = 300$ °C ab. (Das Rauchgas darf mit guter Näherung als ideales Gas mit $c_{pR} = 1{,}3$ kJ/(kg K) = const und das Wasser als ideale Flüssigkeit berechnet werden.)
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der Aufgabe die Ergebnisse der Aufgabe 3.25.

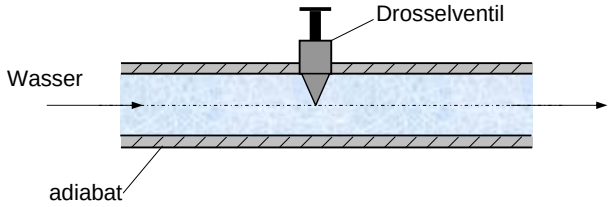


Berechnen Sie den Exergieverluststrom $\dot{E}_{v12}$, indem Sie die Exergiestrombilanz aufstellen, wobei die Änderungen der Drücke des Rauchgases und Wassers vernachlässigt werden können. Die Umgebungstemperatur beträgt $\vartheta_u = 0$ °C.

Lösung: $\dot{E}_{v12} = 35{,}443$ kW

Aufgabe 5.8

Gemäß Aufgabe 4.7 strömt ein als inkompressibel anzusehender Wassermassestrom $\dot{m}$ = 30 kg/min durch ein Drosselventil. Der Druck p_1 = 0,5 MPa der Flüssigkeit wird dabei auf p_2 = 0,2 MPa gedrosselt, wobei die Temperatur ϑ = 22 °C konstant bleibt. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeit in der Rohrleitung vor und nach dem Ventil sind näherungsweise gleich groß. Ein- und Austritt befinden sich auf gleicher Höhe. Das Drosselventil kann mit guter Näherung als adiabat angesehen werden. Die Umgebungstemperatur beträgt T_u = 300 K.

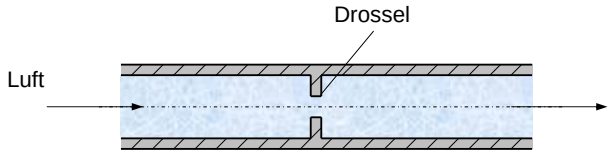


Berechnen Sie den Exergieverluststrom $\dot{E}_{v12}$!

Lösung: $\dot{E}_{v12}$ = 10,25 W

Aufgabe 5.9

Gemäß Aufgabe 4.8 wird ein Luftstrom $\dot{V}_1$ = 1 m^3/min (ideales Gas) bei konstanter Temperatur ϑ = 20 °C von p_1 = 0,2 MPa auf p_2 = 0,1 MPa gedrosselt.
Hinweis: Nutzen Sie für die Lösung der Aufgabe die Ergebnisse der Aufgabe 4.8.

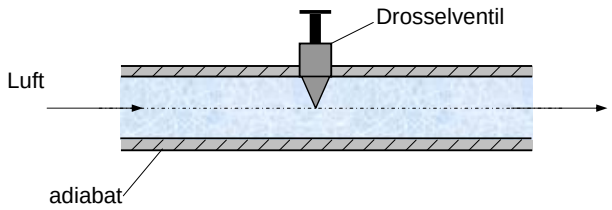


Berechnen Sie den Exergieverluststrom $\dot{E}_{v12}$ bei einer Umgebungstemperatur ϑ_u = 0 °C !

Lösung: $\dot{E}_{v12}$ = 2,153 kW

Aufgabe 5.10

Luft (ideales Gas) mit einer Temperatur ϑ = 150 °C und einem Druck p_1 = 1,0 MPa wird in einem Drosselventil bei konstanter Temperatur auf den Druck p_2 = 0,5 MPa gedrosselt. Der Wärmeverlust des Drosselventils an die Umgebung kann vernachlässigt werden. Die Umgebungstemperatur beträgt ϑ_u = 20 °C.

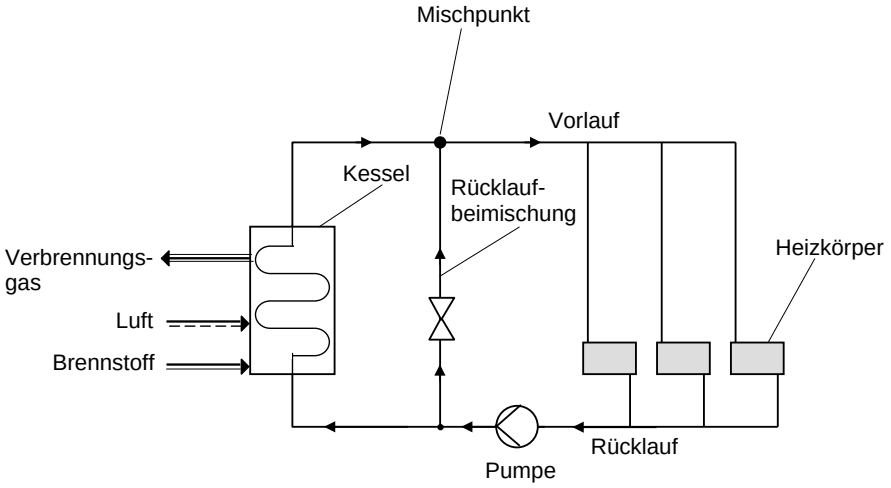


Wie groß ist der spezifische Exergieverlust e_{v12} der Drosselung ?

Lösung: e_{v12} = 58,34 kJ/kg

Aufgabe 5.11

Gemäß Aufgabe 3.24 ist die Rücklaufbeimischung einer Heizungsanlage so eingestellt, dass dem aus dem Kessel kommenden $\dot{m}_{1K} = 430$ kg/h Wasser mit einer Temperatur $\vartheta_{1K} = 85$ °C Rücklaufwasser $\dot{m}_{1R} = 120$ kg/h mit einer Temperatur $\vartheta_{1R} = 55$ °C stationär beigemischt wird. Das Wasser mit der unbekannten Mischungstemperatur ϑ_2 bildet den Vorlauf der Heizungsanlage. Dabei kann der Verlustwärmestrom der Rücklaufbeimischung im Vergleich zu den Energieströmen der Fluidströme vernachlässigt werden. Die Umgebungstemperatur beträgt 0 °C. (Das Wasser ist bei den vorliegenden Parametern als inkompressibel anzusehen.)



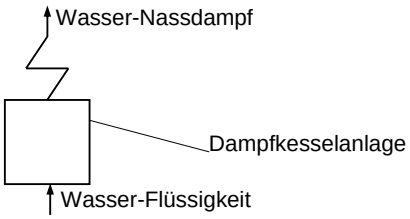
Ermitteln Sie den dabei auftretenden Exergieverluststrom !

Lösung: a) $\dot{E}_{v12} = 109{,}56$ W

6. Reale Fluide

Aufgabe 6.1

Eine Dampfkesselanlage erzeugt $\dot{m} = 8$ t/h Wasser-Nassdampf vom Zustand $x = 0{,}94$ und $p = 2$ MPa.

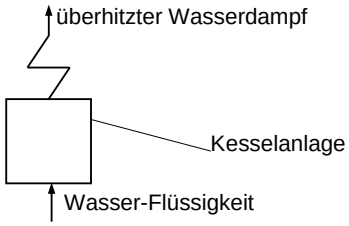


Mit der Wasserdampftafel und parallel mit dem h,s-Diagramm sind zu bestimmen:
a) die Temperatur ϑ
b) das spezifische Volumen v
c) die spezifische Enthalpie h
d) die spezifische Entropie s
e) die spezifische innere Energie u
f) der Massestrom $\dot{m}'$ der enthaltenen siedenden Flüssigkeit.

Lösung: a) $\vartheta = 212{,}38$ °C b) $v = 0{,}09368$ m^3/kg
c) $h = 2685{,}00$ kJ/kg d) $s = 6{,}1056$ kJ/(kg·K)
e) $u = 2497{,}65$ kJ/kg f) $\dot{m}' = 0{,}4800$ t/h

Aufgabe 6.2

In einer Kesselanlage wird überhitzter Wasserdampf mit einem Druck $p = 500$ kPa und einer Temperatur $\vartheta = 400$ °C erzeugt.

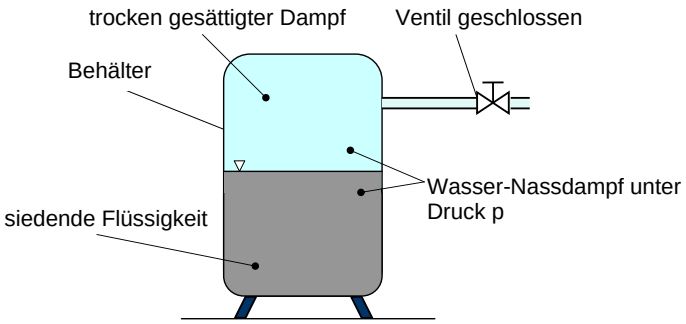


Mit der Wasserdampftafel und parallel mit dem h,s-Diagramm sind zu bestimmen:
a) das spezifische Volumen v
b) die spezifische Enthalpie h
c) die spezifische Entropie s
d) die spezifische innere Energie u.

Lösung: a) $v = 0{,}6173$ m^3/kg b) $h = 3272{,}29$ kJ/kg
c) $s = 7{,}7954$ kJ/(kg·K) d) $u = 2963{,}64$ kJ/kg

Aufgabe 6.3

In einem Behälter von V = 2 m^3 befinden sich m = 1000 kg Wasser-Nassdampf mit einem Druck von p = 12 MPa.

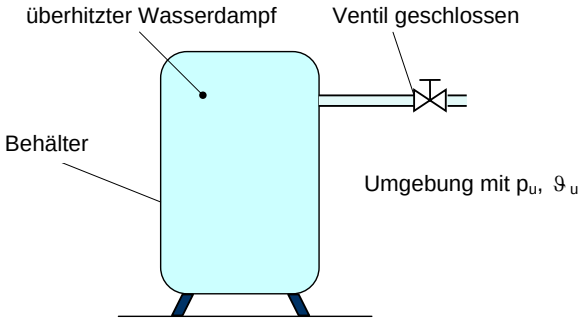


Es sind zu berechnen:
a) der Dampfanteil x
b) die Masse m'' des trocken gesättigten Dampfes
c) die Masse m' der siedenden Flüssigkeit
d) die Enthalpie H' der siedenden Flüssigkeit
e) die Enthalpie H'' des trocken gesättigten Dampfes.

Lösung: a) x = 0,0372 b) m'' = 37,17 kg c) m' = 962,8 kg
d) H' = 1435,89 MJ e) H'' = 99,829 MJ

Aufgabe 6.4

Ein Dampfkessel enthält m = 2 kg überhitzten Wasserdampf von p = 1,5 MPa und ϑ = 250 °C.

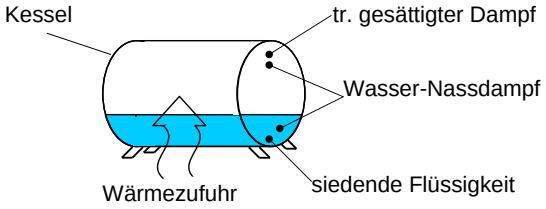


Mit Hilfe der Wasserdampftafel ist die Exergie E (der Enthalpie) des Dampfes bei Überführung in den Umgebungszustand in einem offenen System zu bestimmen! Veranschaulichen Sie sich den Zustandspunkt im h,s-Diagramm. Der Umgebungszustand beträgt pu = 0,1 MPa, ϑ_u = 20 °C.

Lösung: E = 1919,02 kJ

Aufgabe 6.5

Einem mit m = 1000 kg Wasser-Nassdampf unter p_1 = 1 MPa gefülltem Kessel, dessen Wände als starr angenommen werden können, mit einem Volumen V = 2 m^3 wird Wärme zugeführt. Der Enddruck beträgt p_2 = 1,5 MPa.



a) Liegt am Ende Flüssigkeit, Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie Ihre Entscheidung !
b) Stellen Sie die Zustandsänderung im p,v-Diagramm dar !
c) Wie groß sind die Temperaturen, Dampfanteile und die spezifischen Enthalpien im Anfangs- und im Endzustand ?
d) Berechnen Sie die zugeführte Wärme Q_{12} !

Lösung: a) Nassdampf

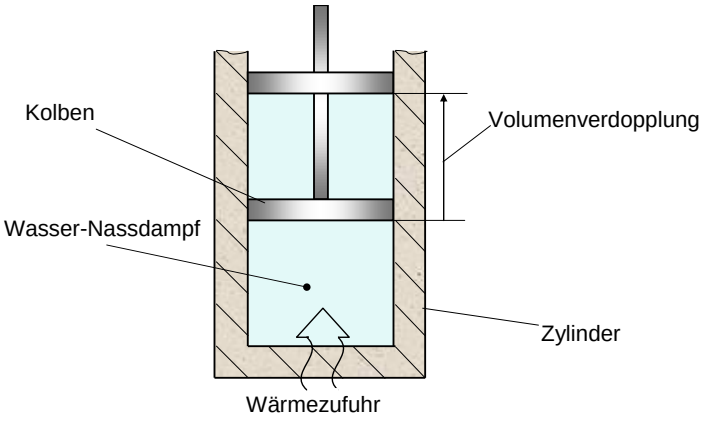
c) x_1 = 0,004517 h_1 = 771,78 kJ/kg ϑ_1 = 179,886 °C

x_2 = 0,00648 h_2 = 857,33 kJ/kg ϑ_2 = 198,295 °C

d) Q_{12} = 85,55 MJ

Aufgabe 6.6

Einer konstanten Masse Wasser-Nassdampf mit p = 1 MPa und x_1 = 0,49 wird bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so dass sich sein Volumen verdoppelt.



a) Liegt nach der Wärmezufuhr Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie Ihre Entscheidung und stellen Sie die Zustandsänderungen im p,v- und im T,s-Diagramm dar!
b) Ermitteln Sie die Temperatur ϑ_2 und im Fall von Nassdampf den Dampfanteil x_2 !
c) Wie groß ist die zugeführte spezifische Wärme q_{12} ?
d) Lösen Sie die Teilaufgaben a), b) und c) für den Fall, dass sich das Volumen vervierfacht !

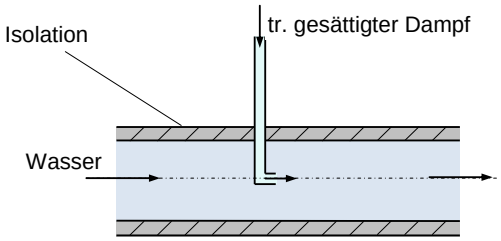
Lösung: a) Nassdampf b) ϑ_2 = 179,89 °C x_2 = 0,986

c) q_{12} = 998,83 kJ/kg

d) überhitzter Dampf ϑ_2 = 561,85 °C q_{12} = 1864,37 kJ/kg

Aufgabe 6.7

In einer wärmeisolierten Warmwasserbereitungsanlage wird bei konstantem Druck p = 0,1 MPa ein Wassermassestrom $\dot{m}_{1W}$ = 2 kg/s von ϑ_{1W} = 30 °C auf ϑ_2 = 80 °C durch Einblasen von trocken gesättigtem Wasserdampf erwärmt. Die Umgebungstemperatur beträgt ϑ_u = 20 °C.



Lösen Sie die folgenden Aufgaben mit Hilfe der Wasserdampftafel:

a) Zeichnen Sie den Vorgang in einem T,s-Diagramm ! Liegt am Austritt flüssiges Wasser oder Nassdampf vor ? Begründen Sie ihre Entscheidung !

b) Welcher Massestrom Dampf $\dot{m}_{1D}$ wird eingeblasen ?

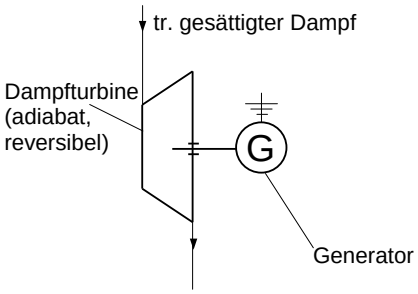
c) Berechnen Sie den Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$!

d) Wie groß ist der Exergieverluststrom $\dot{E}_{v12}$!

Lösung: b) $\dot{m}_{1D}$ = 0,1788 kg/s c) $\dot{S}_{12}^{irr}$ = 0,1539 kW/K d) $\dot{E}_{v12}$ = 45,12 kW

Aufgabe 6.8

Trocken gesättigter Wasserdampf von p_1 = 1 MPa wird adiabat reversibel auf p_2 = 0,1 MPa entspannt.



Mit der Wasserdampftafel und dem h,s-Diagramm sind zu bestimmen:

a) der Dampfanteil x_2 im Endzustand,

b) die dabei gewinnbare spezifische technische Arbeit w_{t12}.

c) Stellen Sie die Zustandsänderung außerdem im T,s-Diagramm dar !

Lösung: a) x_2 = 0,872 b) w_{t12} = –390,6 kJ/kg

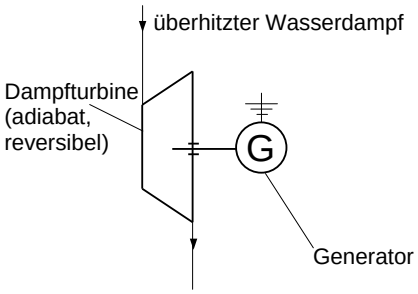
Aufgabe 6.9

Überhitzter Wasserdampf von ϑ_1 = 200 °C wird bis zum Beginn der Kondensation isotherm verdichtet. Der Druck p_2 ist mit Hilfe der Wasserdampftafel und parallel mit dem h,s-Diagramm zu bestimmen. Stellen Sie die Zustandsänderung außerdem im T,s-Diagramm dar !

Lösung: p_2 = 1,555 MPa

Aufgabe 6.10

In einer als adiabat anzusehenden Dampfturbine wird überhitzter Wasserdampf von p_1 = 2 MPa auf den Enddruck p_2 = 100 kPa reversibel entspannt.



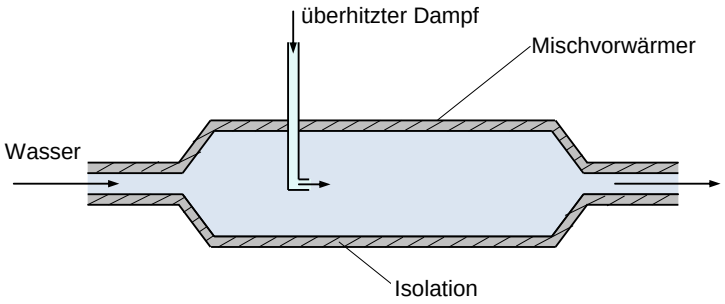
Mit der Wasserdampftafel und parallel dazu mit einem h,s-Diagramm ist die Temperatur ϑ_1 des überhitzten Wasserdampfes zu bestimmen, wenn der Dampf am Austritt der Turbine

a) trocken gesättigt ist,
b) einen Dampfanteil x_2 = 0,9 besitzt.
c) Stellen Sie die Zustandsänderungen im T,s-Diagramm dar !

Lösung: a) ϑ_1 = 474,25 °C b) ϑ_1 = 296,27 °C

Aufgabe 6.11

In einem gut isolierten Mischvorwärmer wird ein stationärer Wassermassestrom $\dot{m}_{1W}$ = 7,2 t/h mit einer Temperatur ϑ_{1W} = 90 °C und überhitzter Dampf $\dot{m}_{1D}$ = 1 kg/s mit einer Temperatur ϑ_{1D} = 250 °C und der Geschwindigkeit c_{1D} = 100 m/s bei konstantem Druck p = 1 MPa zusammengeführt. Die Geschwindigkeiten des eintretenden Wassers und des austretenden Gemisches können vernachlässigt werden.

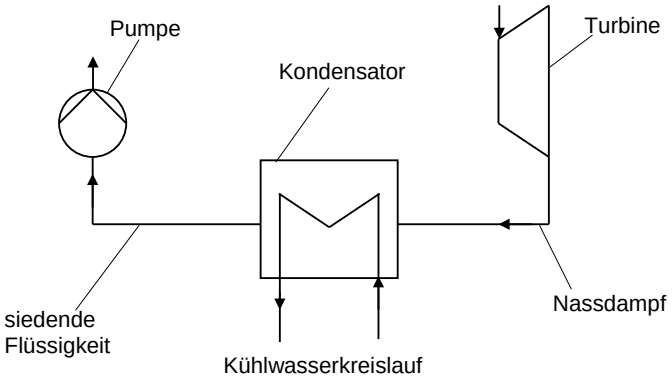


a) Berechnen Sie die spezifische Enthalpie h_2 am Austritt des Mischvorwärmers !
b) Liegt am Austritt flüssiges Wasser, Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie ihre Entscheidung !
c) Zeichnen Sie die Mischung im h,s- und im T,s-Diagramm !
d) Ermitteln Sie am Austritt die Temperatur ϑ_2 und, falls Nassdampf vorliegt, außerdem den Dampfanteil x_2 !

Lösung: a) h_2 = 1234,5 kJ/kg d) ϑ_2 = 179,89 °C x_2 = 0,234

Aufgabe 6.12

In einem gut isolierten Wärmeübertrager wird der Massestrom $\dot{m}_D = 5$ t/h Wasser-Nassdampf mit $x_{1D} = 0{,}85$ bei $\vartheta_{1D} = 30$ °C vollständig bei konstantem Druck kondensiert, so dass am Ende siedende Flüssigkeit vorliegt. Das hierzu benötigte Kühlwasser tritt in den Wärmeübertrager mit der Temperatur $\vartheta_{1W} = \vartheta_u = 14$ °C ein und verlässt ihn mit $\vartheta_{2W} = 22$ °C. (Das Kühlwasser kann mit guter Genauigkeit als inkompressibel betrachtet werden.)

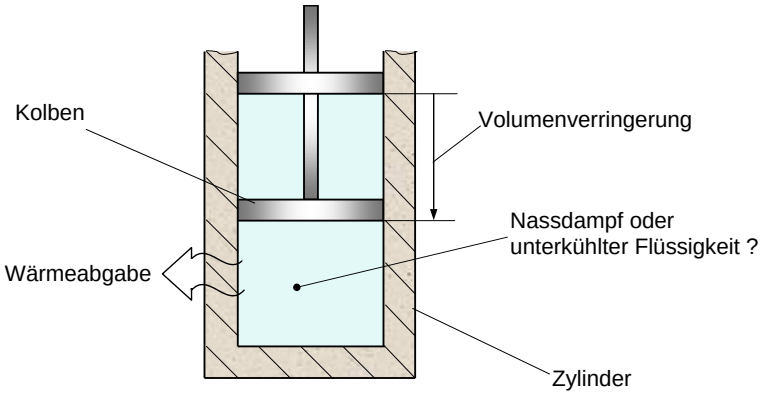


a) Stellen Sie die Zustandsänderung des Nassdampfes im T,s-Diagramm dar !
b) Ermitteln Sie den Druck p_D, bei dem der Nassdampf kondensiert !
c) Ermitteln Sie den Kühlwassermassestrom $\dot{m}_W$!
d) Berechnen Sie den Betrag des übertragenen Wärmestroms $|\dot{Q}|$!
e) Ermitteln Sie den im Kondensator auftretenden Entropieverluststrom $\dot{S}_{12}^{irr}$!
f) Berechnen Sie den dabei auftretenden Exergieverluststrom $\dot{E}_{v12}$?

Lösung: b) $p_D = 4{,}24669$ kPa c) $\dot{m}_W = 85{,}64$ kg/s d) $|\dot{Q}| = 2{,}869$ MW
e) $\dot{S}_{12}^{irr} = 0{,}391$ kW/K f) $\dot{E}_{v12} = 112{,}14$ kW

Aufgabe 6.13

Wasser-Nassdampf gibt bei einem konstanten Druck p = 0,4 MPa Wärme ab. Das spezifische Volumen v_1 = 0,41 m^3/kg verringert sich dabei auf v_2 = 0,18 m^3/kg.



Ermitteln Sie:

a) Liegt nach der Wärmeabgabe Nassdampf oder unterkühlte Flüssigkeit vor ? Begründen Sie Ihre Entscheidung !

b) die Dampfanteile x_1 und, falls nach der Wärmeabgabe Nassdampf vorliegt, x_2 !

c) die spezifischen Enthalpien h_1 und h_2 !

d) die spezifischen Entropien s_1 und s_2 !

e) die spezifischen Exergien e_1 und e_2 für ϑ_u = 20 °C, p_u = 0,1 MPa !

f) Berechnen Sie die abgegebene spezifische Wärme q_{12} !

g) Stellen Sie die Zustandsänderung im p,v- und im T,s-Diagramm dar !

Lösung: a) Nassdampf

b) x_1 = 0,886 x_2 = 0,388

c) h_1 = 2495,8 kJ/kg h_2 = 1432,1 kJ/kg

d) s_1 = 6,314 kJ/(kg·K) s_2 = 3,762 kJ/(kg·K)

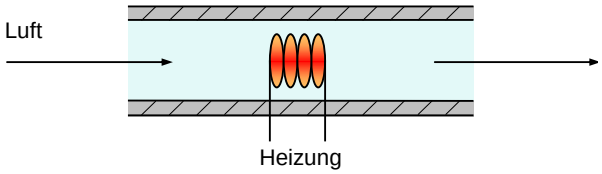
e) e_1 = 647,7 kJ/kg e_2 = 332,2 kJ/kg

f) q_{12} = –1063,6 kJ/kg

7. Einfache technische Prozesse

Aufgabe 7.1

In einem Lufterhitzer wird $\dot{V}_1 = 10000\ m^3/h$ Luft bei einem konstanten Druck von $p = 0{,}1$ MPa von $\vartheta_1 = 15$ °C auf $\vartheta_2 = 250$ °C stationär erwärmt. Die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft in den Lufterhitzer beträgt $c_1 = 5$ m/s.



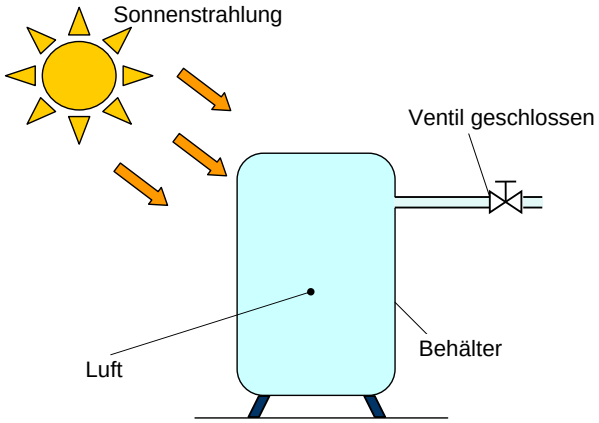
Es sind für die Näherung, dass die Luft als ideales Gas mit c_p, κ = const betrachtet werden kann, zu berechnen:

a) der Luftmassestrom $\dot{m}$,
b) die Austrittsgeschwindigkeit c_2 bei gleichbleibendem Strömungsquerschnitt,
c) die zuzuführende elektrische Heizleistung $\dot{W}_{el12}$ unter Berücksichtigung der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit !

Lösung: a) $\dot{m} = 3{,}358$ kg/s b) $c_2 = 9{,}078$ m/s c) $\dot{W}_{el12} = 793{,}0$ kW

Aufgabe 7.2

Luft mit $\vartheta_1 = 15$ °C und $p_1 = 0{,}1$ MPa befindet sich in einem geschlossenen Behälter vom Volumen $V = 5\ m^3$. Der Behälter wird in Folge Sonneneinstrahlung erwärmt, so dass der Druck auf $p_2 = 0{,}11$ MPa steigt. Für die Luft darf die Näherung ideales Gas mit c_v, κ = const verwendet werden.

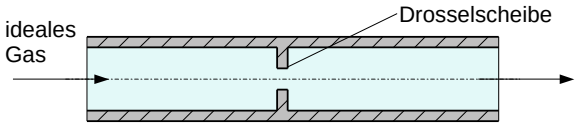


a) Zeichnen Sie die Zustandsänderung qualitativ im T,s-Diagramm !
b) Wie groß wird die Temperatur ϑ_2 der Luft im Behälter ?
c) Ermitteln Sie die zugeführte Wärme Q_{12} !

Lösung: b) $\vartheta_2 = 43{,}82$ °C c) $Q_{12} = 125{,}0$ kJ

Aufgabe 7.3

Ein als ideal anzusehendes Gas mit dem Druck $p_1 = 1$ MPa strömt in einer Rohrleitung stationär durch eine Drosselscheibe. Die Dichte ρ_2 hat sich nach der Drosselung um 10 % verringert. Die Änderung der Geschwindigkeit kann vernachlässigt werden.

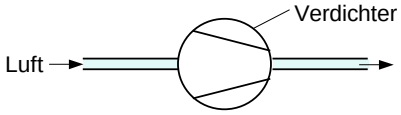


a) Zeichnen Sie die Zustandsänderung qualitativ im h,s-Diagramm !
b) Wie groß ist der Enddruck p_2 ?

Lösung: b) $p_2 = 900$ kPa

Aufgabe 7.4

In einem Verdichter wird Luft von $\vartheta_1 = 20$ °C und $p_1 = 0{,}1$ MPa auf $p_2 = 0{,}7$ MPa komprimiert.

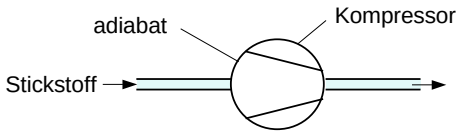


Zu bestimmen sind für die Näherung ideales Gas mit c_p, κ = const :
a) die spezifische technische Arbeit w_{t12s} bei isentroper Kompression,
b) die spezifische technische Arbeit w_{t12T} bei isothermer Kompression.
c) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen qualitativ im p,v- und im T,s-Diagramm !

Lösung: a) $w_{t12s} = 219{,}1$ kJ/kg b) $w_{t12T} = 163{,}8$ kJ/kg

Aufgabe 7.5

In einem Kompressor wird Stickstoff (N_2) von $p_1 = 1$ bar auf $p_2 = 10$ bar stationär verdichtet. Die Eintrittstemperatur beträgt $\vartheta_1 = 20$ °C. Dabei nimmt der Verdichter eine Leistung von $P_{t12} = 3{,}33$ kW auf. Nach Angaben des Herstellers hat der Verdichter einen isentropen Wirkungsgrad $\eta_s = 0{,}85$. Stickstoff darf bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas mit c_p, κ = const berechnet werden. Der Verdichter kann in erster Näherung als adiabat angesehen werden.

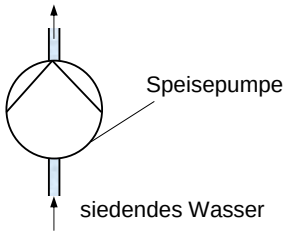


a) Stellen Sie die Zustandsänderung des Stickstoffs qualitativ im T,s- und h,s-Diagramm dar !
b) Mit welcher Austrittstemperatur T_2 verlässt der Stickstoff den Verdichter?
c) Welcher Massestrom $\dot{m}$ Stickstoff wird verdichtet ?
d) Berechnen Sie den dabei auftretenden Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$
e) Wie groß wäre die zuzuführende Leistung P_{trev} und die Austrittstemperatur ϑ_{2s} für den berechneten Massestrom, wenn der Verdichter reversibel arbeiten würde ?

Lösung: b) $T_2 = 614{,}13$ K ($\vartheta_2 = 340{,}98$ °C) c) $\dot{m} = 0{,}01$ kg/s
d) $\dot{S}_{12}^{irr} = 0{,}847$ W/K e) $P_{trev} = 2{,}831$ kW $\vartheta_{2s} = 292{,}83$ °C

Aufgabe 7.6

Die Speisepumpe eines Kraftwerks fördert stationär einen Massestrom $\dot{m}$ = 72 t/h Wasser von einem Druck p_1 = 0,05 bar auf p_2 = 210 bar. In die Pumpe tritt siedendes Wasser ein. Die Pumpe hat einen isentropen Wirkungsgrad η_s = 0,8.
(Das Wasser ist wegen des hohen Austrittsdruckes als reales Fluid zu berechnen. Die Änderungen von kinetischer und potentieller Energie können mit guter Näherung vernachlässigt werden. Die Pumpe darf als adiabat angenommen werden.)



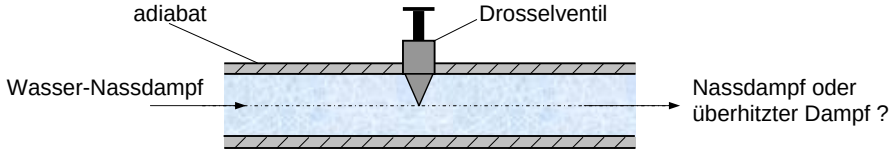
a) Stellen Sie die Zustandsänderung des Wassers in der Pumpe qualitativ in einem T,s-Diagramm dar !
b) Berechnen Sie die für die Pumpe benötigte technische Arbeitsleistung P_{t12} !
c) Ermitteln Sie den Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$
d) Ermitteln Sie die benötigte Arbeitsleistung P_{t12}^{if} für die Näherung, dass das Wasser als ideale Flüssigkeit berechnet wird. Welcher relative Fehler in % wird dabei begangen ?

Lösung: b) P_{t12} = 526,16 kW c) $\dot{S}_{12}^{irr}$ = 0,344 kW/K

d) P_{t12}^{if} = 527,67 kW $\frac{P_{t12}^{if} - P_{t12}}{P_{t12}} \cdot 100\%$ = 0,286 %

Aufgabe 7.7

Wasser-Nassdampf vom Zustand $p_1 = 2{,}0$ MPa und $x_1 = 0{,}984$ durchströmt stationär ein gut isoliertes Drosselventil. Hinter der Drosselstelle weist der Dampf einen Druck $p_2 = 0{,}2$ MPa auf. Die Umgebungstemperatur beträgt $\vartheta_u = 0$ °C.



Lösen Sie die folgenden Aufgaben parallel mit dem h,s-Ablesediagramm und mit Hilfe der Wasserdampftafel :

a) Liegt hinter der Drosselstelle Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie Ihre Entscheidung !
b) Stellen Sie die Zustandsänderung in einem h,s-Diagramm dar !
c) Ermitteln Sie die Temperatur ϑ_2 des Dampfes am Austritt des Drosselkalorimeters!
d) Wie groß ist die spezifische Entropieproduktion s_{12}^{irr} ?
e) Wie groß ist der spezifische Exergieverlust e_{v12} ?
f) Wiederholen Sie die Teilaufgaben a) bis e) für einen Austrittsdruck $p_2 = 1{,}0$ MPa. Berechnen Sie außerdem x_2, falls der Dampf die Drosselstelle als Nassdampf verlässt!

Lösung: c) $\vartheta_2 = 149{,}54$ °C d) $s_{12}^{irr} = 1{,}002$ kJ/(kg·K) e) $e_{v12} = 273{,}62$ kJ/kg

f) $\vartheta_2 = 179{,}89$ °C $s_{12}^{irr} = 0{,}288$ kJ/(kg·K) $e_{v12} = 78{,}74$ kJ/kg

$x_2 = 0{,}996$

Aufgabe 7.8

Kohlenstoffmonoxid (CO) wird von $v_1 = 0{,}909$ m^3/kg und $p_1 = 0{,}1$ MPa isotherm auf $p_2 = 0{,}4$ MPa und anschließend isentrop auf $p_3 = 2$ MPa verdichtet, wobei die Zustandsänderungen als reversibel angesehen werden können. (Das CO darf bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas mit c_p, κ = const berechnet werden.)

a) Stellen Sie die Zustandsänderungen qualitativ im p,v- und T,s-Diagramm dar !
b) Berechnen Sie den Polytropenexponent n, mit dem der Endzustand (p_3, v_3) vom Ausgangszustand (p_1, v_1) direkt zu erreichen ist !
c) Ermitteln Sie die zuzuführenden spezifischen technischen Arbeiten w_{t13} und die abzuführenden spezifischen Wärmen q_{13} bei
   c_1) isothermer und anschließender isentroper Zustandsänderung,
   c_2) polytroper Zustandsänderung !

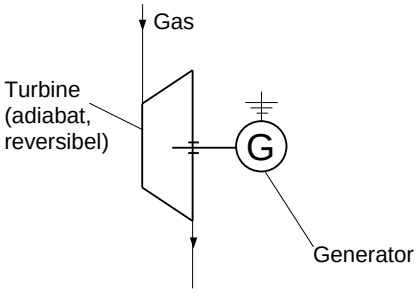
Lösung: b) $n = 1{,}18133$

c_1) $w_{t13} = 311{,}76$ kJ/kg $q_{13} = -126{,}01$ kJ/kg (isotherm-isentrop)

c_2) $w_{t13} = 345{,}73$ kJ/kg $q_{13} = -159{,}99$ kJ/kg (polytrop)

Aufgabe 7.9

Ein stationärer Gasmassestrom von $\dot{m} = 1200$ kg/h wird in einer als adiabat anzunehmenden Turbine von $\vartheta_1 = 670$ °C und $p_1 = 0{,}51$ MPa auf den Druck $p_2 = 0{,}1$ MPa entspannt. Die Entspannung kann in erster Näherung als reversibel angesehen werden. Von dem als ideal anzusehenden Gas sind M = 32 kg/kmol und $c_{pm} = 1{,}16$ kJ/(kg·K) bekannt.

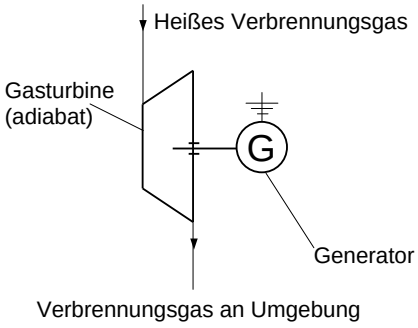


a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im T,s-Diagramm dar !
b) Wie groß ist die Leistung P_{t12} der Turbine ?

Lösung: b) $P_{t12} = -111{,}5$ kW

Aufgabe 7.10

In eine stationär arbeitende Gasturbine strömt $\dot{m} = 0{,}442$ kg/s heißes Verbrennungsgas mit einem Druck $p_1 = 5$ bar und der Temperatur $\vartheta_1 = 700$ °C ein. Das Verbrennungsgas verlässt die Turbine bei Umgebungsdruck $p_2 = p_u = 1$ bar. Die Turbine besitzt nach Herstellerangaben einen isentropen Wirkungsgrad von $\eta_s = 0{,}8$. Näherungsweise kann die Turbine als adiabat betrachtet werden. Das Verbrennungsgas darf näherungsweise wie Luft (ideales Gas mit c_p, κ = const) berechnet werden. (Die weiteren Verbrennungsprodukte können vernachlässigt werden.)

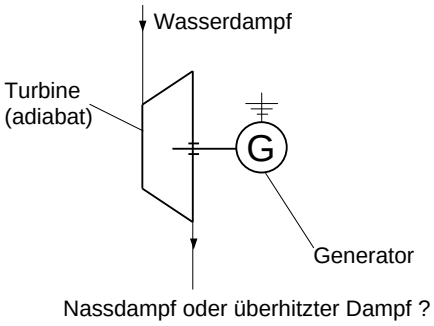


a) Stellen Sie die Zustandsänderung des Verbrennungsgases qualitativ im T,s -Diagramm dar !
b) Welche Temperatur ϑ_2 hat das Verbrennungsgas am Turbinenausgang ?
c) Berechnen Sie die abgegebene Leistung P_{t12} !
d) Geben Sie den Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$ an !
e) Ermitteln Sie für den gegebenen Brenngasmassestrom die Leistung P_{trev}, die die Turbine unter der Annahme einer reversiblen Arbeitsweise abgeben würde !

Lösung: b) $\vartheta_2 = 413{,}026$°C c) $P_{t12} = -127{,}46$ kW
d) $\dot{S}_{12}^{irr} = 49{,}049$ W/K e) $P_{trev} = -159{,}32$ kW

Aufgabe 7.11

Eine stationär arbeitende Dampfturbine gibt eine technische Leistung $P_{t12} = -100$ MW ab. Der Wasserdampf tritt mit $\vartheta_1 = 500$ °C und $p_1 = 100$ bar in die Turbine ein. Der isentrope Wirkungsgrad der Turbine beträgt $\eta_S = 0{,}85$.
Die Turbine kann mit guter Näherung als adiabat betrachtet werden. Die Änderungen der kinetischen und potentiellen Energie des Wasserdampfes zwischen Ein- und Austritt sind vernachlässigbar gering.



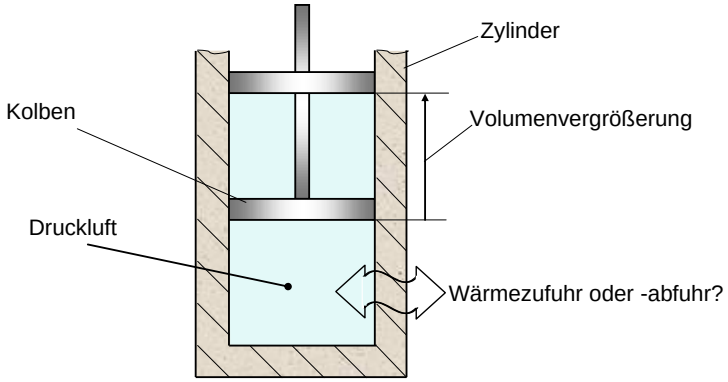
a) Der Wasserdampf verlässt die Turbine mit einem Druck $p_2 = 0{,}1$ bar !
- Tragen Sie die Zustandsänderung in das h,s-Ablesediagramm ein !
- Liegt am Austritt Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie Ihre Aussage !
- Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im T,s-Diagramm dar !
- Berechnen Sie den Massestrom $\dot{m}$ des Wasserdampfes !
- Wie groß ist die Temperatur ϑ_2 am Turbinenaustritt ?
- Falls Nassdampf am Turbinenaustritt vorliegt, so ist außerdem der Dampfanteil x_2 zu berechnen !

b) Der Wasserdampf verlässt die Turbine mit einem Druck $p_2 = 10$ bar, damit er als Heizmedium in einem Trocknungsprozess verwendet werden kann .
- Tragen Sie die Zustandsänderung in das h,s-Ablesediagramm ein !
- Liegt am Austritt Nassdampf oder überhitzter Dampf vor ? Begründen Sie Ihre Aussage !
- Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im T,s-Diagramm dar !
- Berechnen Sie den Massestrom $\dot{m}$ des Wasserdampfes !
- Ermitteln Sie die Turbinenaustrittstemperatur ϑ_2 !

Lösung: a) $\dot{m} = 91{,}52$ kg/s $\quad \vartheta_2 = 45{,}81$ °C $\quad x_2 = 0{,}874$
b) $\dot{m} = 198{,}93$ kg/s $\quad \vartheta_2 = 218{,}64$ °C

Aufgabe 7.12

Druckluft konstanter Masse mit $p_1 = 0{,}98$ MPa, $\vartheta_1 = 100$ °C und $V_1 = 0{,}1$ m^3 expandiert reversibel polytrop auf $p_2 = 150$ kPa und ein Endvolumen $V_2 = 0{,}468$ m^3. (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern als ideales Gas mit c_p, κ = const berechnet werden.)

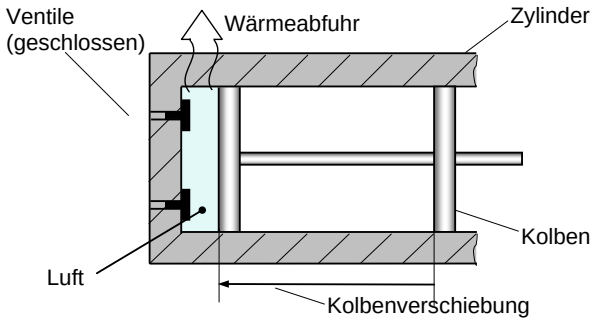


a) Wie groß ist der Polytropenexponent n ?
b) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im p,v- und im T,s-Diagramm dar !
c) Berechnen Sie die abgegebene Volumenänderungsarbeit W_{V12} !
d) Berechnen Sie die dabei auftretende Wärme Q_{12} ? Wird sie ab- oder zugeführt ?

Lösung: a) n = 1,216
c) $W_{V12} = -128{,}60$ kJ
d) $Q_{12} = 59{,}10$ kJ (zugeführt)

Aufgabe 7.13

Bei einem Dieselmotor tritt die angesaugte Luft (ideales Gas, c_p, κ = const) mit $\vartheta_1 = 80$ °C und $p_1 = 95$ kPa in den Zylinder ein. Die Verdichtung erfolgt polytrop mit n = 1,3, und kann als reversibel angesehen werden.

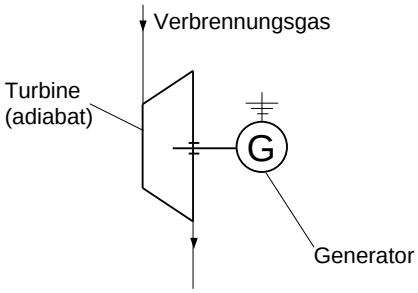


a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im p,v- und im T,s-Diagramm dar !
b) Bis zu welchem Druck p_2 muss verdichtet werden, damit die Selbstentzündungstemperatur $\vartheta_2 = 630$ °C des Brennstoffes erreicht wird ?
c) Wie groß ist die zuzuführende spezifische Volumenänderungsarbeit w_{V12} ?
d) Welche spezifische Wärme q_{12} ist abzuführen ?

Lösung: b) $p_2 = 5557{,}2$ kPa c) $w_{v12} = 526{,}35$ kJ/kg d) $q_{12} = -131{,}59$ kJ/kg

Aufgabe 7.14

Eine als adiabat anzusehende Turbine wird mit einem als ideal anzusehenden Verbrennungsgas stationär betrieben. Der Eintrittszustand des Gases ist mit $\vartheta_1 = 750\ °C$, $p_1 = 1{,}0\ MPa$ und $c_1 = 80\ m/s$ gegeben. Am Turbinenaustritt hat das Gas den Zustand $\vartheta_2 = 365\ °C$, $p_2 = 0{,}1\ MPa$ und $c_2 = 100\ m/s$. Das Verbrennungsgas darf näherungsweise wie Luft (ideales Gas mit c_p, κ = const) berechnet werden. (Die weiteren Verbrennungsprodukte können vernachlässigt werden.)



a) Zeichnen Sie die Zustandsänderung qualitativ in einem T,s-Diagramm !

b) Welche spezifische technische Arbeit w^{st}_{t12} wird abgeführt ?

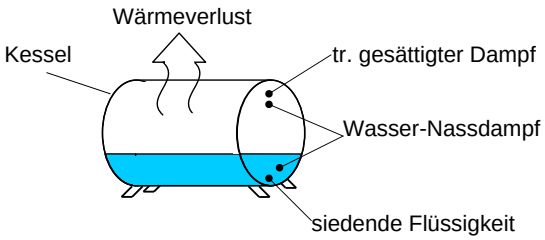
c) Berechnen Sie den isentropen Wirkungsgrad der Turbine η_{sT} !

d) Welche spezifische technische Arbeit w^{st}_{trev} könnte bei gleichem p_2 und c_2 im Falle einer reversiblen Entspannung in der Turbine abgeführt werden ?

Lösung: b) $w^{st}_{t12} = -385{,}07\ kJ/kg$ c) $\eta_{sT} = 0{,}781$ d) $w^{st}_{trev} = -493{,}80\ kJ/kg$

Aufgabe 7.15

Ein geschlossener Kessel von $V = 8\ m^3$ enthält $m = 56\ kg$ Wasser-Nassdampf bei $p_1 = 500\ kPa$. Durch Abkühlung sinkt der Druck auf $p_2 = 300\ kPa$.



a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ in einem p,v-Diagramm dar !

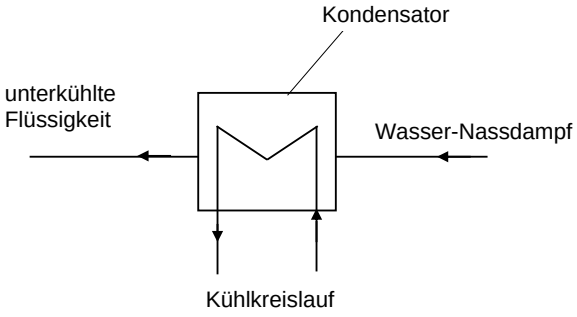
b) Ermitteln Sie die Dampfanteile x_1 vor und x_2 nach der Abkühlung !

c) Wie groß ist die Masse des Dampfes $\Delta m'' = m''_2 - m''_1$, der bei der Abkühlung kondensiert ?

Lösung: b) $x_1 = 0{,}379$ $x_2 = 0{,}234$ c) $\Delta m'' = -8{,}11\ kg$

Aufgabe 7.16

Im Kondensator einer Dampfkraftanlage wird Wasser-Nassdampf mit einem Dampfanteil $x_1 = 0{,}85$ bei $p = 5$ kPa isobar kondensiert und um $\Delta\vartheta = 10$ K isobar unterkühlt.

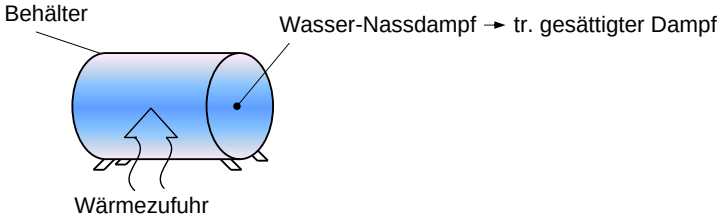


a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ in einem T,s-Diagramm dar !
b) Welche Temperatur ϑ_2 hat die unterkühlte Flüssigkeit am Ende ?
c) Ermitteln Sie die spezifische Enthalpie h_2 der unterkühlten Flüssigkeit !
d) Welche spezifische Wärme q_{12} muss abgeführt werden ?

Lösung: b) $\vartheta_2 = 22{,}88$ °C c) $h_2 = 95{,}95$ kJ/kg d) $q_{12} = -2101{,}36$ kJ/kg

Aufgabe 7.17

Ein geschlossener Behälter mit starren Wänden von $V = 0{,}2\ m^3$ enthält Wasser-Nassdampf mit $p_1 = 600$ kPa und $x_1 = 0{,}8$. Durch Wärmezufuhr entsteht trocken gesättigter Dampf.

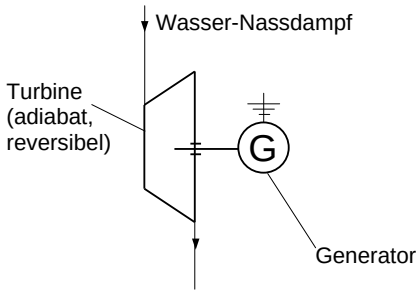


a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im p,v-Diagramm dar !
Lösen Sie folgenden Aufgaben parallel mit der Wasserdampftafel und dem h,s-Ablesediagramm:
b) Bestimmen Sie den Enddruck p_2 !
c) Welche Masse m Wasserdampf befindet sich im Behälter ?
d) Welche Wärme Q_{12} muss zugeführt werden ?

Lösung: b) $p_2 = 759{,}3$ kPa c) $m = 0{,}7915$ kg d) $Q_{12} = 306{,}21$ kJ

Aufgabe 7.18

Wasser-Nassdampf mit $p_1 = 5$ MPa und $x_1 = 0{,}85$ expandiert in einer als adiabat anzusehenden Turbine bis zum Enddruck $p_2 = 1$ MPa. Die Expansion kann näherungsweise als reversibel betrachtet werden.

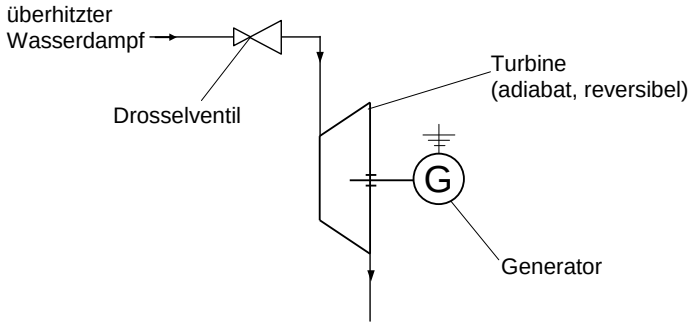


a) Stellen Sie die Zustandsänderung qualitativ im T,s-Diagramm dar !
b) Es sind parallel mit der Wasserdampftafel und dem h,s-Diagramm die spezifischen Volumina v_1 und v_2 im Anfangs- und Endzustand zu bestimmen !
c) Ermitteln Sie die abgeführte spezifische technische Arbeit w_{t12} !

Lösung: b) $v_1 = 0{,}03372$ m³/kg $v_2 = 0{,}14789$ m³/kg c) $w_{t12} = -255{,}55$ kJ/kg

Aufgabe 7.19

Überhitzter Wasserdampf von $p_1 = 6$ MPa und $\vartheta_1 = 450$ °C wird auf $p_2 = 2$ MPa gedrosselt und anschließend in einer adiabaten Turbine auf $p_3 = 100$ kPa näherungsweise reversibel entspannt.

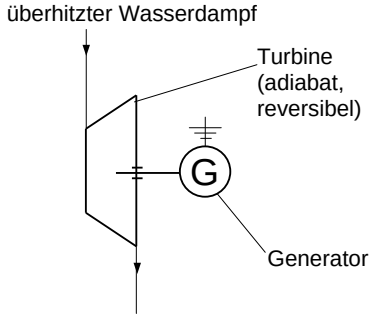


a) Stellen Sie die Zustandsänderungen im h,s- und im T,s-Diagramm qualitativ dar !
b) Ermitteln Sie die Temperatur ϑ_3 und x_3, falls Nassdampf am Turbinenaustritt vorliegt !
c) Es ist parallel mit der Wasserdampftafel und dem h,s-Ablesediagramm die spezifische technische Arbeit w_{t23} der Turbine zu bestimmen !

Lösung: b) $\vartheta_3 = 99{,}61$ °C $x_3 = 0{,}975$ c) $w_{t23} = -683{,}8$ kJ/kg

Aufgabe 7.20

Überhitzter Wasserdampf mit $p_1 = 2$ MPa und $\vartheta_1 = 300$ °C expandiert näherungsweise reversibel in einer als adiabat anzusehenden Turbine. Der Dampf ist im Endzustand trocken gesättigt.

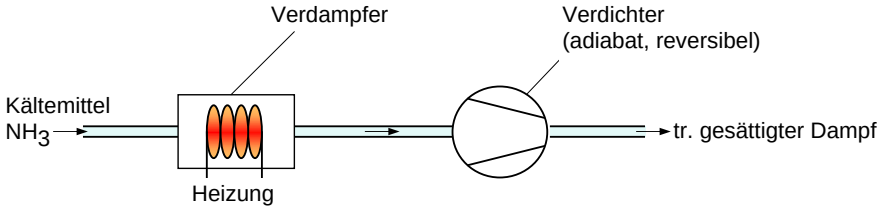


a) Stellen Sie die Zustandsänderung im T,s-Diagramm qualitativ dar !
b) Mit der Wasserdampftafel und parallel mit dem h,s-Ablesediagramm sind die Zustandsgrößen s_2, p_2, ϑ_2, h_2 im Endzustand zu ermitteln !
c) Berechnen Sie außerdem die abgegebene spezifische technische Arbeit w_{t12} !

Lösung: b) $p_2 = 0{,}5841$ MPa $\quad \vartheta_2 = 157{,}76$ °C $\quad h_2 = 2754{,}9$ kJ/kg
$s_2 = 6{,}7685$ kJ/(kg·K) $\quad$ c) $w_{t12} = -269{,}32$ kJ/kg

Aufgabe 7.21

In einer Kälteanlage wird das Kältemittel Ammoniak NH_3 bei einer Temperatur von $\vartheta_1 = -30$ °C isobar verdampft.

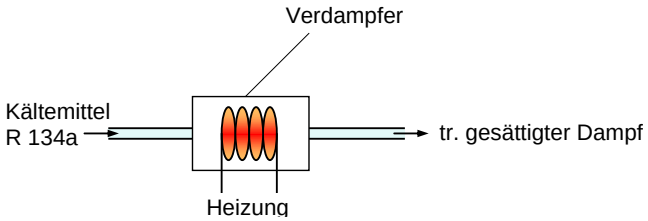


Bei welchem Dampfanteil x_2 müsste die Verdampfung abgebrochen werden, damit nach der anschließenden adiabaten reversiblen Verdichtung auf $p_3 = 500$ kPa das Kältemittel als trocken gesättigter Dampf vorliegt ? Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des lg p,h-Ablesediagramms von NH_3 .

Lösung: $x_2 = 0{,}91$

Aufgabe 7.22

Im Verdampfer einer Kühlanlage wird das Kältemittel R 134a isobar bei ϑ = - 10 °C verdampft. Das Kältemittel tritt mit einem Dampfanteil von x_1 = 0,3 kJ/kg in den Verdampfer ein und als trocken gesättigter Dampf aus.

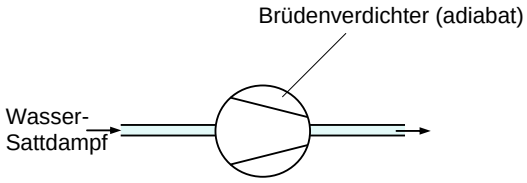


Bestimmen Sie mit Hilfe des lg p,h-Ablesediagramms von R134a die Änderung der spezifischen Enthalpie $h_2 - h_1$!

Lösung: $h_2 - h_1$ = 135 kJ/kg

Aufgabe 7.23

Ein Brüdenverdichter soll $\dot{m}$ = 5 t/h Wasser-Sattdampf mit der Temperatur ϑ_1 = 100°C auf einen Druck p_2 = 5 bar stationär verdichten. Der Verdichter hat einen isentropen Gütegrad η_{sV} = 0,82.
Die Änderungen von kinetischer und potentieller Energie können mit guter Näherung vernachlässigt werden. Der Verdichter darf als adiabat angenommen werden.



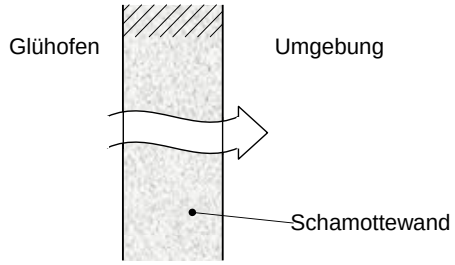
a) Stellen Sie die Zustandsänderung des Wasserdampfes qualitativ im T,s- und h,s-Diagramm dar, in welchem Zustand verlässt der Dampf den Verdichter ?
b) Ermitteln Sie die Austrittstemperatur des Dampfes mit der Wasserdampftafel und parallel mit dem h,s-Diagramm.
c) Berechnen Sie die für den Verdichter benötigte technische Arbeitsleistung P_{t12} !
d) Ermitteln Sie den dabei auftretenden Entropieproduktionsstrom $\dot{S}_{12}^{irr}$!
e) Welche technische Arbeitsleistung P_{trev} wäre notwendig, wenn der Verdichter reversibel arbeiten würde ?

Lösung: b) t_2 = 305,94 °C c) P_{t12} = 557,34 kW
d) $\dot{S}_{12}^{irr}$ = 178,69 W/K e) P_{trev} = 457,08 kW

8. Wärmeleitung

Aufgabe 8.1

An einer ebenen Schamottewand eines Glühofens betragen die Innentemperatur der Ofenwand $\vartheta_{W,i}$ = 900 °C und die Außenwandtemperatur $\vartheta_{W,a}$ = 50 °C. Die Fläche der Wand beträgt 10 m². Der Wärmeverlust darf den Wert $\dot{Q}$ = 20 kW nicht überschreiten.

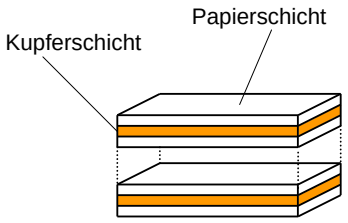


a) Zeichnen Sie qualitativ den Temperaturverlauf durch die Wand !
b) Berechnen Sie die Dicke δ der Schamottewand !

Lösung: δ = 0,302 m

Aufgabe 8.2

Ein Paket ist zusammengesetzt aus n = 108 ebenen Kupferblechen von je 1 mm Dicke und n + 1 = 109 ebenen Papierblättern von je 0,2 mm Dicke, die zwischen den einzelnen Kupferblechen liegen und das Paket auf den beiden Seiten abdecken. Die Seitenlängen der rechteckigen Bleche und Papierblätter betragen a = 12 cm und b = 9 cm.



Wie groß ist der Wärmeleitwiderstand R_λ ?

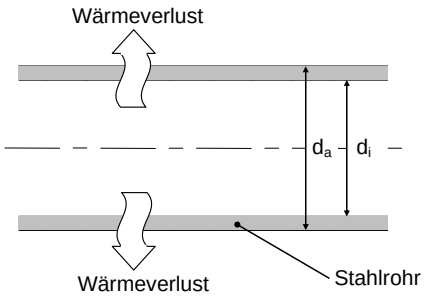
Ermitteln Sie des Weiteren für den Fall, dass die Schichten durch eine Schicht ersetzt werden, den äquivalenten Wärmeleitkoeffizient $\lambda_{äqu}$, wenn

a) der Wärmestrom die Schichten des Paketes senkrecht durchdringt,
b) der Wärmestrom die Kupferbleche und Papierblätter parallel durchdringt, wobei er senkrecht auf die schmalere Seite gerichtet ist ?

Lösung: a) R_λ = 14,44 K/W $\lambda_{äqu}$ = 0,832 W/(m·K)
b) R_λ = 0,03318 K/W $\lambda_{äqu}$ = 309,55 W/(m·K)

Aufgabe 8.3

Die Oberflächentemperaturen eines Stahlrohres der Länge 10 m betragen an der Innenwand $\vartheta_{W,i}$ = 90 °C und an der Außenwand $\vartheta_{W,a}$ = 60 °C.



Für einen Außendurchmesser d_a = 0,32 m und einen Innendurchmesser d_i = 0,30 m sind zu ermitteln:

a) der qualitative Temperaturverlauf durch das Stahlrohr (Zeichnung) !

b) der Wärmeleitwiderstand R_λ,

c) der Wärmestrom $\dot{Q}$,

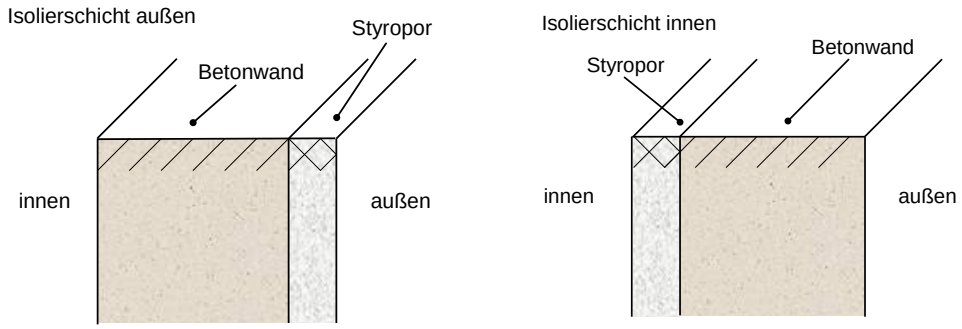
d) die Gleichung des Temperaturfeldes $\vartheta = \vartheta(r)$!

Lösung: b) $R_\lambda = 2{,}054 \cdot 10^{-5}$ K/W c) $\dot{Q}$ = 1460,33 kW

d) $\vartheta(r) = 90°C - 464{,}84\ K \cdot \ln\left(\frac{r}{0{,}15\ m}\right)$

Aufgabe 8.4

Eine δ_B = 16 cm dicke ebene Betonwand soll mit einer δ_{Is} = 3 cm dicken Dämmschicht aus Styropor versehen werden. Die Wand ist 10 m breit und 3 m hoch. Die Wandtemperatur beträgt innen $\vartheta_{W,i}$ = 12 °C und außen $\vartheta_{W,a}$ = –10 °C.



a) Berechnen Sie den sich einstellenden Wärmestrom $\dot{Q}$!

b) Bestimmen Sie die Temperatur $\vartheta_{W,z}$ zwischen den Schichten für die Fälle:
- die Isolierschicht wird außen angebracht !
- die Isolierschicht wird innen angebracht !

c) Zeichnen Sie qualitativ die Temperaturverläufe für beide Fälle !

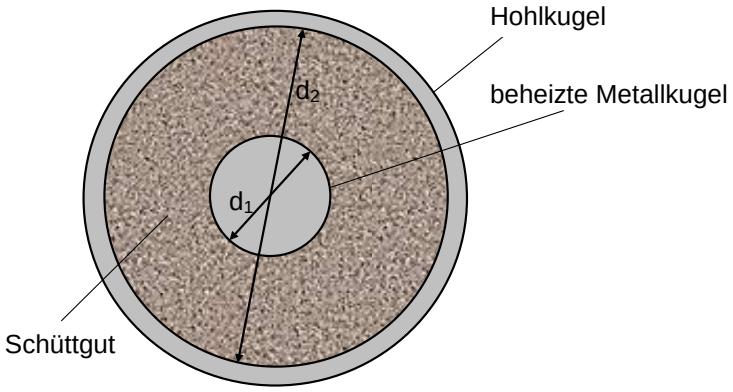
Lösung: a) $\dot{Q}$ = 705,94 W

b) $\vartheta_{W,z}$ = 8,6 °C (für Isolierschicht außen)

$\vartheta_{W,z}$ = –6,6 °C (für Isolierschicht innen)

Aufgabe 8.5

Zur Ermittlung des Wärmeleitkoeffizienten von Schüttgütern wird eine von *Nußelt* vorgeschlagene Messeinrichtung genutzt. In der Mitte einer Hohlkugel ist eine beheizte Metallkugel angeordnet. Der äußere Durchmesser der beheizten Metallkugel beträgt d_1 = 150 mm, während der innere Durchmesser der Hohlkugel d_2 = 250 mm beträgt. Das Schüttgut füllt den verbleibenden freien Raum in der Hohlkugel aus. Nach Einstellung des stationären Zustandes werden folgende Daten gemessen:
4,7 W für die der Metallkugel zugeführten Heizleistung, ϑ_1 = 25,9 °C und ϑ_2 = 20 °C als mittlere Oberflächentemperaturen.

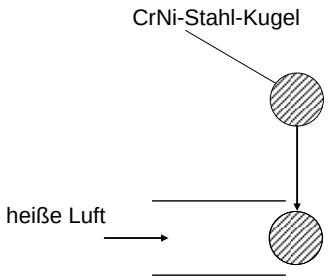


a) Zeichnen Sie qualitativ den Temperaturverlauf durch das Schüttgut !
b) Der Wärmeleitkoeffizient λ des Schüttgutes ist zu berechnen !

Lösung: b) λ = 0,338 W/(m·K)

Aufgabe 8.6

Kugeln aus Chromnickelstahl mit einem Durchmesser von d = 10 mm sollen von einer gleichmäßigen Temperatur ϑ_0 = 20 °C auf eine mittlere Temperatur ϑ_m = 80 °C erwärmt werden. Die Aufheizung erfolgt durch heiße Luft mit einer konstanten Temperatur ϑ_F = 180 °C. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Luft und den Stahlkugeln beträgt α = 20 W/(m^2·K).

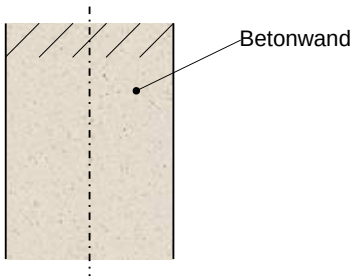


Ermitteln Sie die zur Aufheizung benötigte Zeit t und die je Kugel in dieser Zeit aufgenommene Wärme:
a) nach der quasistatischen instationären Methode
b) mit den Diagrammen nach *Gröber* !

Lösung: a) t = 147,6 s b) t = 147,8 s a) und b) Q = 0,118 kJ

Aufgabe 8.7

Eine ebene Betonwand, deren Abmessungen viel größer sind als die Wanddicke δ = 1 m, habe eine gleichmäßige Temperatur von ϑ_0 = 100 °C. Die Oberflächentemperaturen auf beiden Seiten werden plötzlich auf ϑ_W = 20 °C abgesenkt.



Lösen Sie die folgenden Aufgaben mit den Diagrammen nach *Gröber* :

a) Welche Temperatur ϑ_K besitzt nach t = 10 h die Wandmitte ?

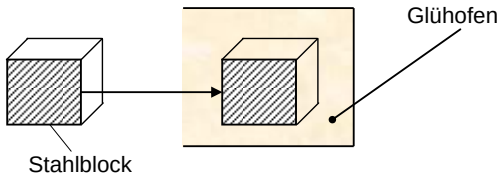
b) Wie groß ist die in dieser Zeit auf jeder Seite abgegebene Wärme pro Wandoberfläche ?

c) Wie groß ist nach der gleichen Zeit die Kerntemperatur ϑ_K^B eines sehr langen quadratischen Betonträgers der Kantenlänge δ = 1 m bei gleichen Temperaturen (Lösung mit Superpositionsprinzip) ?

Lösung: a) ϑ_K = 97,6 °C b) $\hat{q} = -24{,}39$ MJ m^{-2} c) ϑ_K^B = 95,3 °C

Aufgabe 8.8

In einem gasbeheizten Glühofen soll ein würfelförmiger Stahlblock mit der Kantenlänge von b = 0,3 m für den Schmiedeprozess solange erwärmt werden, bis seine Kerntemperatur ϑ_K = 750 °C beträgt. Der Stahlblock besitzt beim Einbringen in den Glühofen eine gleichmäßige Anfangstemperatur von ϑ_0 = 30 °C. Die Temperatur im Ofen beträgt ϑ_F = 800 °C, wobei am Stahlblock ein Wärmeübergangskoeffizient von α = 20 W/(m^2·K) auftritt.



Lösen Sie die folgenden Aufgaben a) und b) nach dem Superpositionsprinzip mit den Diagrammen nach *Gröber* :

a) Wie lange muss der Stahlblock geglüht werden ?

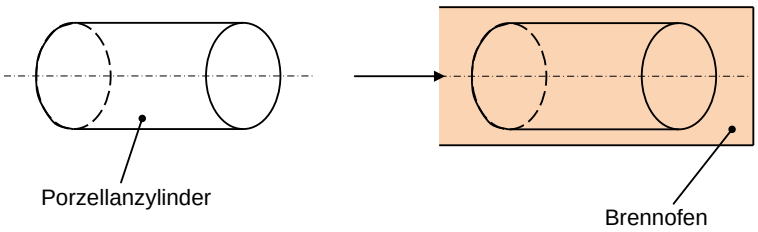
b) Welche Wärme Q hat der Stahlblock dabei aufgenommen ?

c) Berechnen Sie die Glühzeit für die Näherung, dass der würfelförmige Stahlblock als kugelähnliches Gebilde betrachtet wird !

Lösung: a) t = 7,222 h b) Q = 70,953 MJ c) t = 6,77 h

Aufgabe 8.9

Ein Porzellanzylinder mit dem Durchmesser d = 5 cm besitzt die gleichmäßige Anfangstemperatur ϑ_0 = 20 °C. Er wird zur Zeit t_0 = 0 in einen Brennofen gestellt, die Temperatur im Ofen beträgt ϑ_F = 400 °C, der mittlere Wärmeübergangskoeffizient α = 50 W/(m^2·K).



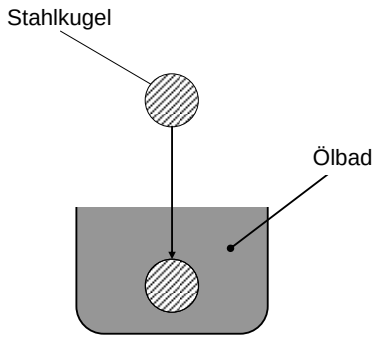
Unter der Nutzung der Diagramme nach *Gröber* sind zur Zeit t = 10 min zu bestimmen :

a) die Kerntemperatur und die Oberflächentemperatur, wenn der Zylinder als unendlich lang angenommen wird,
b) die Kerntemperatur und die Oberflächentemperatur in Zylindermitte, bezogen auf dessen Länge, wenn der Zylinder eine Länge von l = 10 cm besitzt (Lösung mit Superpositionsprinzip).

Lösung: a) ϑ_K = 235,6 °C ϑ_W = 297,6 °C
b) ϑ_K = 242,9 °C ϑ_W = 302,1 °C

Aufgabe 8.10

Eine Stahlkugel mit dem Durchmesser d = 10 cm hat die konstante Temperatur ϑ_0 = 400 °C. Die Kugel wird zur Zeit t_0 = 0 in ein Ölbad mit der konstant bleibenden Temperatur von ϑ_F = 20 °C getaucht. Der Wärmeübergangskoeffizient von der Kugel an das Ölbad hat den mittleren konstanten Wert α = 450 W/(m^2·K) (Lösen Sie die folgenden Aufgaben mit den Diagrammen nach *Gröber* !).

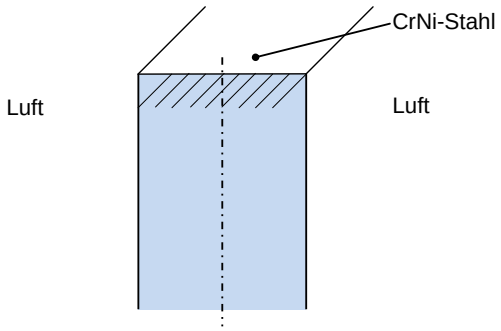


a) Ermitteln Sie die Oberflächentemperatur ϑ_W und die Kerntemperatur ϑ_K nach t = 10 s !
b) Nach welcher Zeit t ist die Temperatur der Kugelmitte bis auf ϑ_K = 50 °C abgesunken?

Lösung: a) ϑ_W = 343 °C ϑ_K = 400 °C b) t = 6 min

Aufgabe 8.11

Eine Platte aus Chromnickelstahl mit der Schichtdicke δ = 0,32 m, die zunächst eine gleichmäßige Temperatur von ϑ_0 = 700 °C hat, wird beidseitig von Luft mit der Temperatur ϑ_F = 25 °C abgekühlt. Der Wärmeübergangskoeffizient infolge Konvektion und Strahlung beträgt α = 70 W/(m^2·K).



a) Es ist der Abkühlungsvorgang in der Platte bis zur Zeit t = 17 min mit Hilfe des grafischen Differenzenverfahrens zu verfolgen !
Für die Lösung sind anzunehmen: Schrittweite: Δx = 0,04 m
Temperatur-Maßstab: 100 K ≙ 40 mm
Längen-Maßstab: 0,1 m ≙ 50 mm.

b) Ermitteln Sie die Wandtemperatur am Ende des Abkühlvorganges. Ermitteln Sie zum Vergleich die Temperatur am Ende des Abkühlvorganges mit der Lösung nach *Gröber !*

Lösung: a) $\vartheta_{W,5}$ = 517,5 °C b) ϑ_W = 518 °C

Aufgabe 8.12

In der Schamottewand eines Glühofens mit der Schichtdicke δ = 0,2 m hatte sich während des Betriebes ein stationärer Temperaturverlauf eingestellt. Die Temperatur im Ofen betrug $\vartheta_{F,i}$ = 900 °C, die Umgebungstemperatur $\vartheta_{F,a}$ = 20 °C. Nach Stillsetzung des Ofens fällt die Innentemperatur $\vartheta_{F,i}$ wie folgt ab:

$t_k = k \cdot \Delta t$, Δt = 0,76 h

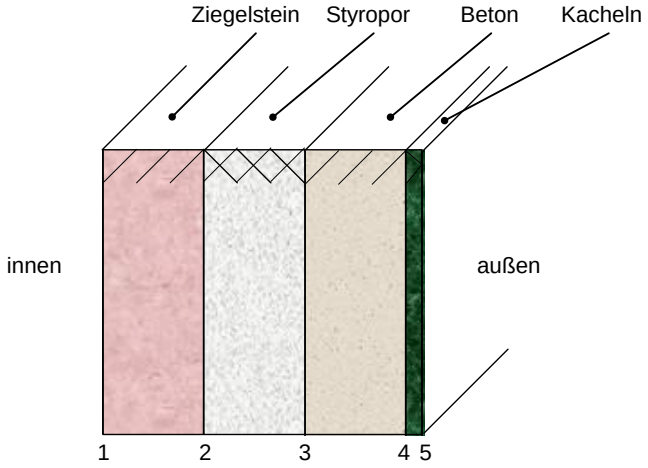
k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\vartheta_{F,i}$ / °C	900	700	575	480	400	335	280	235	200	175	155	140

Die Umgebungstemperatur bleibt konstant. Die Wärmeübergangskoeffizienten betragen innen α_i = 23,7 W/(m^2·K) und außen α_a = 9 W/(m^2·K) und bleiben konstant.
Es ist der Temperaturverlauf in der Wand mit dem grafischen Differenzenverfahren bis zu einer Zeit von t = 8,36 h nach der Stillsetzung des Ofens zu verfolgen. Dafür sind zu wählen: Temperatur-Maßstab: 100 K ≙ 2 cm
Längen-Maßstab: 0,2 m ≙ 10 cm.

9. Wärmedurchgang

Aufgabe 9.1

Ein ebenes Element einer mehrschichtigen Wand von $A = 2\ m^2$ Fläche habe von innen nach außen folgenden Aufbau: $\delta_Z = 50$ mm Ziegelstein, $\delta_S = 50$ mm Styropor, $\delta_B = 50$ mm Beton, $\delta_K = 5$ mm Kacheln.
Die Lufttemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten haben folgende Werte:
innen: $\vartheta_i = 20$ °C, $\alpha_i = 8{,}14$ W/(m²·K), außen: $\vartheta_a = -15$ °C, $\alpha_a = 23{,}2$ W/(m²·K).

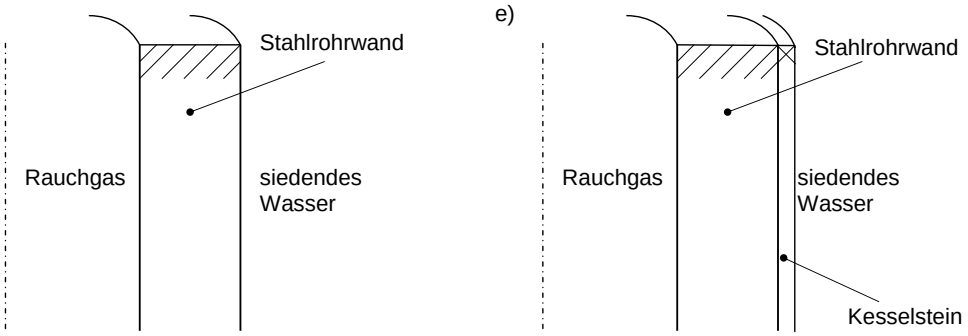


a) Berechnen Sie die thermischen Einzelwiderstände $R_{\alpha i}$, $R_{\lambda Z}$ ... $R_{\lambda K}$, $R_{\alpha a}$ und den Wärmedurchgangswiderstand R_k für das Wandelement !
b) Zeichnen Sie qualitativ den Temperaturverlauf durch die Wand !
c) Wie groß ist der Wärmestrom $\dot{Q}$ durch das Wandelement ?
d) Welche Temperaturen stellen sich an den Wandoberflächen und an den inneren Schichtgrenzen ein ?
e) Wie groß ist die Temperatur in der Mitte der Styroporschicht ϑ_{Sm} ?

Lösung: a) $R_k = 0{,}8208$ K/W c) $\dot{Q} = 42{,}64$ W d) $\vartheta_{W,i} = 17{,}38$ °C
$\vartheta_{W,2} = 15{,}01$ °C $\vartheta_{W,3} = -13{,}04$ °C $\vartheta_{W,4} = -14{,}01$ °C
$\vartheta_{W,a} = -14{,}08$ °C e) $\vartheta_{Sm} = 0{,}99$ °C

Aufgabe 9.2

Das Rauchgasrohr aus Stahl eines Großwasserraumkessels (Innendurchmesser $d_i = 500$ mm, Länge 3 m, Wanddicke $\delta_{St} = 21$ mm) wird innen von Rauchgas der mittleren Temperatur $\vartheta_{F,i} = 1000$ °C durchströmt. Außen ist es von siedendem Wasser unter einem Betriebsdruck $p_a = 2$ MPa umgeben. Der innere Wärmeübergangskoeffizient beträgt $\alpha_i = 36$ W/(m²·K), der äußere $\alpha_a = 9000$ W/(m²·K).

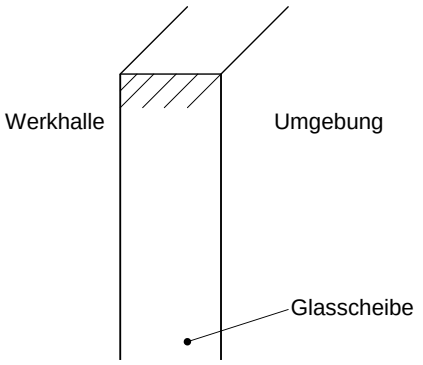


a) Wie groß sind der Wärmedurchgangswiderstand R_k und die Einzelwiderstände R_λ, $R_{\alpha i}$ und $R_{\alpha a}$?
b) Zeichnen Sie den Temperaturverlauf zwischen beiden Medien !
c) Berechnen Sie den Wärmestrom $\dot{Q}$ durch das Rohr !
d) Welche Oberflächentemperaturen $\vartheta_{W,i}$ und $\vartheta_{W,a}$ hat das Flammrohr ?
e) Außen hat sich eine Kesselsteinschicht (kalkreich) der Dicke 0,5 cm angelagert. Welcher Wärmestrom $\dot{Q}$ und welche Oberflächentemperaturen an der Rohrinnenoberfläche $\vartheta_{W,i}$ und an der Kesselsteinoberfläche außen $\vartheta_{W,a}$ stellen sich ein, wenn der äußere Wärmeübergangskoeffizient wie vorher angenommen wird?
f) Zeichnen Sie den Temperaturverlauf zwischen beiden Medien für den Fall e) !

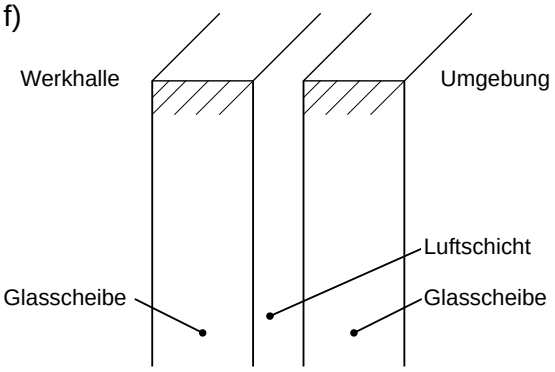
Lösung: a) $R_k = 6{,}002 \cdot 10^{-3}$ K/W $R_\lambda = 8{,}558 \cdot 10^{-5}$ K/W $R_{\alpha i} = 5{,}895 \cdot 10^{-3}$ K/W
$R_{\alpha a} = 2{,}175 \cdot 10^{-5}$ K/W
c) $\dot{Q} = 131{,}23$ kW
d) $\vartheta_{W,i} = 226{,}47$ °C $\vartheta_{W,a} = 215{,}24$ °C
e) $\dot{Q} = 105{,}10$ kW $\vartheta_{W,i} = 380{,}45$ °C $\vartheta_{W,a} = 214{,}63$ °C

Aufgabe 9.3

Die ebene Glasscheibe eines Werkhallenfensters mit der Oberfläche $A = 4\ m^2$ hat eine Dicke von $\delta_G = 8$ mm. Im Innenraum beträgt die Temperatur $\vartheta_i = 20$ °C und der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_i = 11{,}6\ W/(m^2 \cdot K)$, außen $\alpha_a = 23{,}2\ W/(m^2 \cdot K)$ und $\vartheta_a = -10$ °C.



f)



a) Berechnen Sie den Wärmestrom durch das Fenster und den Wärmedurchgangswiderstand R_k !
b) Ermitteln Sie die Wandtemperaturen der Glasscheibe innen und außen.
c) Es ist die Gleichung des Temperaturfeldes $\vartheta = f(x)$ in der Glasscheibe zu ermitteln!
d) Wie groß ist der Wärmedurchgangskoeffizient k ?
e) Wie hoch sind die Elektroenergiekosten, um den Wärmeverlust durch das Hallenfenster im Verlaufe von 24 Stunden zu decken, wenn für eine kWh nach dem geltenden Tarif 0,21 EUR gezahlt werden muss ?
f) Welche Elektroenergiekosten ergeben sich für ein thermoverglastes Hallenfenster gleicher Größe, bei dem zwischen den beiden Glasscheiben der Dicke von jeweils 8 mm eine Luftschicht der Dicke $\delta_L = 10$ mm als ruhend angenommen wird (Näherungsweise kann λ von Luft bei 0 °C und Normdruck verwendet werden.) ?
g) Welche Oberflächentemperaturen ergeben sich für das Thermofenster ?
h) Zeichnen Sie qualitativ die Temperaturverläufe für beide Fensterausführungen !

Lösung: a) $R_k = 0{,}03405$ K/W $\qquad \dot{Q} = 881{,}01$ W

b) $\vartheta_{W,i} = 1{,}01$ °C, $\quad \vartheta_{W,a} = -0{,}51$ °C (für Einfachfenster)

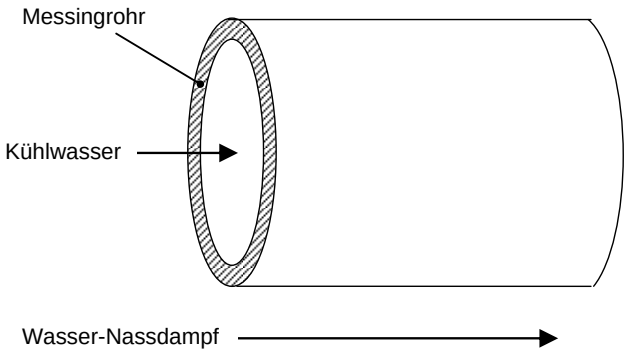
c) $\vartheta(x) = 1{,}01\ °C - 189{,}87\ \frac{K}{m} \cdot x$ $\qquad$ d) $k = 7{,}34\ W/(m^2 \cdot K)$

e) 4,44 EUR / 24 h $\qquad$ f) 1,08 EUR / 24 h

g) $\vartheta_{W,i} = 15{,}38$ °C, $\quad \vartheta_{W,a} = -7{,}69$ °C (für Thermofenster)

Aufgabe 9.4

Ein Messingrohr der Länge l = 1 m mit einem Innendurchmesser von d_i = 18 mm und einer Wanddicke von δ_M = 2 mm wird von Kühlwasser mit einer mittleren Temperatur ϑ_{Fi} = 10 °C durchflossen. Außen strömt Wasser-Nassdampf, dessen näherungsweise konstanter Druck p = 0,005 MPa beträgt. Er tritt mit einem Dampfanteil x = 0,9 ein und wird vollständig kondensiert. Der innere Wärmeübergangskoeffizient beträgt α_i = 1000 W/(m^2·K), der äußere α_a = 2000 W/(m^2·K).

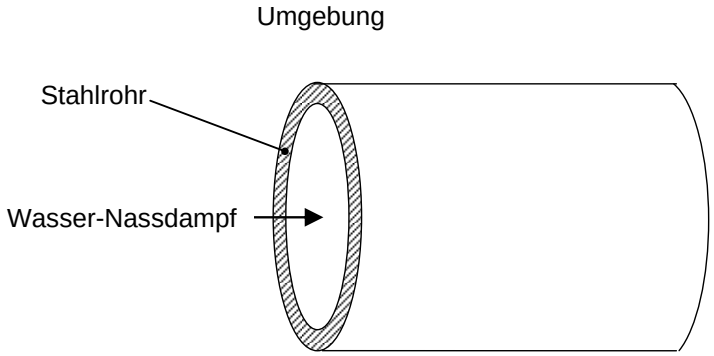


a) Berechnen Sie die thermischen Widerstände $R_{\alpha i}$, $R_{\lambda M}$, $R_{\alpha a}$!
b) Zeichnen Sie den qualitativen Temperaturverlauf zwischen beiden Medien !
c) Welche Oberflächentemperaturen $\vartheta_{W,i}$ und $\vartheta_{W,a}$ hat das Messingrohr ?
d) Welcher Massestrom Nassdampf kondensiert ?
e) Auf welchen Bruchteil $\dot{Q}_S / \dot{Q}$ sinkt der Wärmestrom, wenn sich durch Verunreinigungen des Kühlwassers innen eine Schmutzschicht von δ_S = 1 mm Dicke bildet ? Der Wärmeleitkoeffizient der Schmutzschicht beträgt λ_S = 0,8 W/(m·K).

Lösung: a) R_{α_i} = 17,684·10^{-3} K/W R_{λ_M} = 3,259·10^{-4} K/W R_{α_a} = 0,723·10^{-2} K/W
c) $\vartheta_{W,i}$ = 26,03 °C, $\vartheta_{W,a}$ = 26,32 °C d) $\dot{m}_a$ = 1,5 kg/h
e) $\dot{Q}_S / \dot{Q}$ = 0,496

Aufgabe 9.5

Durch ein 1 m langes Stahlrohr (d_i = 200 mm, d_a = 220 mm) strömt Wasser-Nassdampf mit einem konstanten Druck von p = 0,5 MPa. Die Umgebungstemperatur beträgt ϑ_u = 20 °C, der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i = 10000 W/(m^2·K), der äußere α_a = 20 W/(m^2·K).

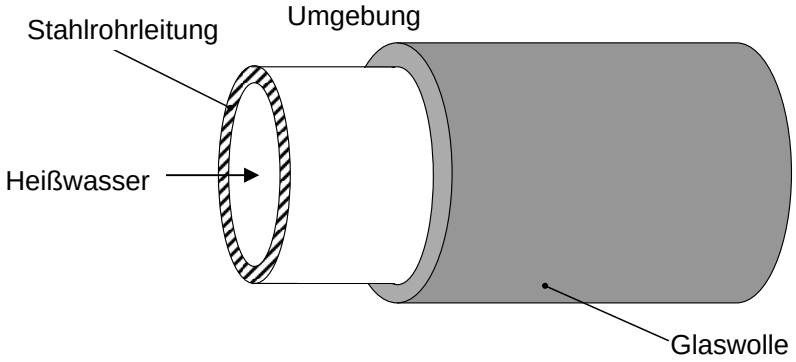


a) Wie groß sind der Wärmeleitwiderstand R_λ, die Wärmeübergangswiderstände $R_{\alpha i}$, $R_{\alpha a}$ und der Wärmedurchgangswiderstand R_k?
b) Zeichnen Sie den qualitativen Temperaturverlauf zwischen beiden Medien !
c) Wie groß ist der abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}$?
d) Berechnen Sie den Wärmedurchgangskoeffizienten k_i bezogen auf die Rohrinnenfläche !
e) Welche Oberflächentemperaturen $\vartheta_{W,i}$ und $\vartheta_{W,a}$ stellen sich ein ?
f) Wie groß ist der prozentuale Fehler, wenn bei der Berechnung des Wärmestromes $\dot{Q}$ nur der äußere Wärmeübergangswiderstand $R_{\alpha a}$ berücksichtigt wird ?
g) Wie ändern sich die unter a) bis e) berechneten Werte, wenn das Rohr von einer δ_{ls} = 10 cm dicken Isolierschicht aus Steinwolle umgeben ist ? Zeichnen Sie den qualitativen Temperaturverlauf zwischen beiden Medien für diesen Fall !

Lösung: b) $R_{\alpha a}$ = 0,07234 K/W R_λ = 0,00030 K/W $R_{\alpha i}$ = 0,00016 K/W
R_k = 0,07281 K/W c) $\dot{Q}$ = 1811 W d) k_i = 21,860 W/(m^2·K)
e) $\vartheta_{W,i}$ = 151,55 °C $\vartheta_{W,a}$ = 151,00 °C f) 0,64 %
g) $R_{\alpha i}$ = 0,00016 K/W R_λ = 2,510 K/W $R_{\alpha a}$ = 0,03789 K/W
R_k = 2,548 K/W $\dot{Q}$ = 51,73 W k_i = 0,625 W/(m^2·K)
$\vartheta_{W,i}$ = 151,83 °C $\vartheta_{W,a}$ = 21,96 °C

Aufgabe 9.6

Eine L = 100 m lange Stahlrohrleitung (d_i = 150 mm, d_a = 159 mm) ist auf einer Länge von l = 90 m mit einer δ_{ls} = 30 mm dicken Isolierschicht aus Glaswolle umgeben. Durch die Rohrleitung strömt Heißwasser der mittleren Temperatur ϑ_{Fi}^{m} = 90 °C mit einer Strömungsgeschwindigkeit c_{Fi} = 0,25 m/s. Die Wärmeübergangskoeffizienten sind innen mit α_i = 1800 W/(m²·K) und außen mit α_a = 6 W/(m²·K) gegeben, wobei α_a sowohl für unisolierte Rohroberfläche als auch für die Isolationsoberfläche gilt. Die Umgebungstemperatur außen beträgt ϑ_u = 20 °C. Das Heißwasser kann mit guter Näherung als ideale Flüssigkeit mit c_{pm} = const angesehen werden.



a) Zeichnen Sie die qualitativen Temperaturverläufe zwischen den Medien für das isolierte und unisolierte Rohrstück !
b) Ermitteln Sie den Verlustwärmestrom $\dot{Q}_{un}$ für den unisolierten Teil der Rohrleitung!
c) Ermitteln Sie den Verlustwärmestrom $\dot{Q}_{ls}$ für den isolierten Teil der Rohrleitung!
d) Wie groß sind die Außenwandtemperaturen am isolierten und am unisolierten Rohrstück ?
e) Um welche Temperaturdifferenz ($\vartheta_{Fi1} - \vartheta_{Fi2}$) kühlt sich das Heißwasser in der Rohrleitung zwischen Ein- und Austritt tatsächlich ab ?

Lösung: b) $\dot{Q}_{un}$ = 2089,4 W

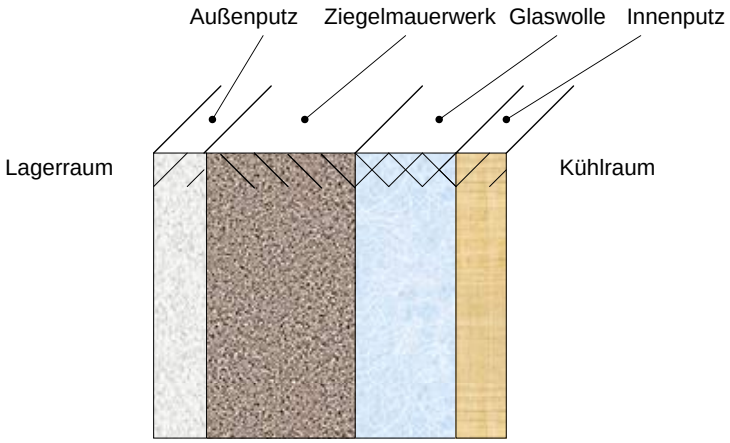
c) $\dot{Q}_{ls}$ = 3887 W

d) $\vartheta_{W,a}^{ls}$ = 30,46 °C $\quad\quad$ $\vartheta_{W,a}^{un}$ = 89,71 °C

e) ($\vartheta_{Fi1} - \vartheta_{Fi2}$) = 0,33 K

Aufgabe 9.7

In einem Kühlraum beträgt die Lufttemperatur $\vartheta_i = -22$ °C, im angrenzenden Lagerraum $\vartheta_a = 10$ °C. Die dazwischenliegende Trennmauer ist wie folgt aufgebaut: $\delta_{Ip} = 1$ cm Innenputz des Kühlraumes, $\delta_{Gl} = 8$ cm Glaswolle, $\delta_Z = 12$ cm Ziegelmauerwerk, $\delta_{Ap} = 1$ cm Außenputz. Ihre Fläche beträgt $A = 20$ m^2. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt auf beiden Seiten $\alpha_a = \alpha_i = 10$ W/(m^2·K).



a) Wie groß ist der Wärmedurchgangswiderstand R_k ?

b) Zeichnen und diskutieren Sie den qualitativen Temperaturverlauf zwischen ϑ_i und ϑ_a !

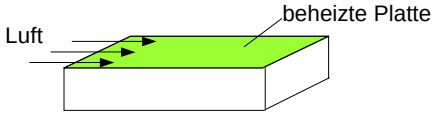
c) Wie groß ist der Wärmestrom $\dot{Q}$, der durch diese Wandfläche in den Kühlraum einströmt ?

Lösung: a) $R_k = 0{,}1327$ K/W c) $\dot{Q} = 241{,}13$ W

10. Konvektiver Wärmeübergang

Aufgabe 10.1

Ein Volumenstrom Luft $\dot{V}_1 = 100 m^3/h$ mit der Anströmtemperatur $\vartheta_1 = 20\ °C$ und Normdruck soll mit einer Geschwindigkeit von $c_1 = 3\ m/s$ zum Zwecke der Erwärmung längs über eine beheizte ebene Platte der Länge $L = 0{,}5\ m$ und der Breite $b = 0{,}25\ m$ strömen. Die mittlere Oberflächentemperatur der Platte beträgt $\vartheta_W = 140\ °C$.



a) Berechnen Sie den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α zwischen der Platte und der Luft !

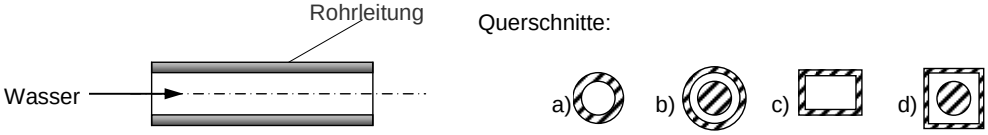
b) Wie groß ist der an die Luft übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$?

c) Berechnen Sie die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ der Luft nach dem Überströmen der Heizplatte (Die Luft darf als ideales Gas mit der Näherung $c_{p1} = const$ berechnet und die Änderung der Geschwindigkeit vernachlässigt werden.) !

Lösung: a) $\alpha = 9{,}353\ W/(m^2 \cdot K)$ b) $\dot{Q} = 140{,}3\ W$ c) $\Delta\vartheta = 4{,}17\ K$

Aufgabe 10.2

Mit einer Pumpe wird ein Wasserstrom (inkompressibel) $\dot{m}_F = 2880\ kg/h$ mit einer mittleren Temperatur $\vartheta_F = 80\ °C$ durch eine $L = 5\ m$ lange Rohrleitung gefördert. In erster Näherung kann angenommen werden, dass sich die Wandtemperatur nur wenig von der Fluidtemperatur unterscheidet.



Es ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_i an der Rohrinnenwand zu ermitteln, wenn die Rohrleitung die folgenden Querschnittsformen besitzt:

a) Kreis mit $d_i = 4\ cm$

b) Ringspalt mit $d_i = 4\ cm$, $d_a = 4\sqrt{2}\ cm$

c) Rechteck mit $a = 4\ cm$, $b = \pi\ cm$

d) Spalt in einem Rechteck mit $a = 1{,}6\pi\ cm$, $b = 5\ cm$ und Kreis mit $d_i = 4\ cm$!

Lösung: a) Kreis: $\alpha_i = 4521\ W/(m^2 \cdot K)$

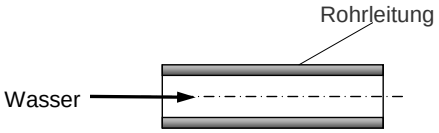
b) Ringspalt: $\alpha_i = 5133\ W/(m^2 \cdot K)$

c) Rechteck: $\alpha_i = 4609\ W/(m^2 \cdot K)$

d) Spalt Kreis in Rechteck: $\alpha_i = 5183\ W/(m^2 \cdot K)$

Aufgabe 10.3

Wasser mit einer mittleren Temperatur ϑ_{Fi} = 90 °C wird in einem L = 3 m langen Rohr (Innendurchmesser d_i = 22 mm) erwärmt. Die mittlere Wandtemperatur beträgt ϑ_{Wi} = 110 °C. Das als inkompressibel anzunehmende Wasser wird mit der Geschwindigkeit c_{Fi} = 0,14 m/s durch das Rohr gepumpt.



a) Ermitteln Sie den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_i !

b) Es ist der übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$ zu bestimmen !

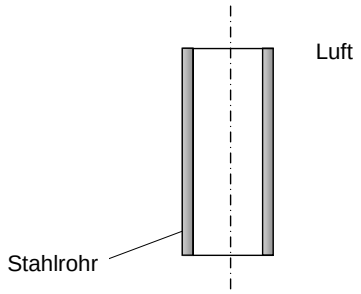
c) Vergleichsweise sind der Wärmeübergangskoeffizient α_i und der übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$ zu ermitteln, wenn Luft mit gleicher Geschwindigkeit und Temperatur bei Normdruck durch das Rohr strömt !

Lösung: a) Wasser: α_i = 1387 W/(m^2·K) b) $\dot{Q}$ = 5,75 kW

c) Luft: α_i = 5,059 W/(m^2·K) $\dot{Q}$ = 0,0210 kW

Aufgabe 10.4

Durch ein l = 2 m langes senkrechtes Rohr strömt heiße Luft mit einer mittleren Temperatur ϑ_{Fi} = 1000 °C. Das Rohr hat einen Innendurchmesser d_i = 0,5 m und eine Wanddicke von 2 mm. Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient der heißen Luft zur Rohrwand innen beträgt α_i = 200 W/(m^2·K). Das Rohr ist außen von Luft mit einer Temperatur von ϑ_{Fa} = 20 °C umgeben. Der Luftdruck entspricht näherungsweise dem Normdruck. Der Wärmeleitwiderstand des Stahlrohres ist gegenüber den Wärmeübergangswiderständen zu vernachlässigen. Die Temperatur der Rohraußenwand $\vartheta_{Wa}^{(0)}$ wurde zu 950 °C geschätzt.



a) Ermitteln Sie den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_a an der Rohraußenwand !

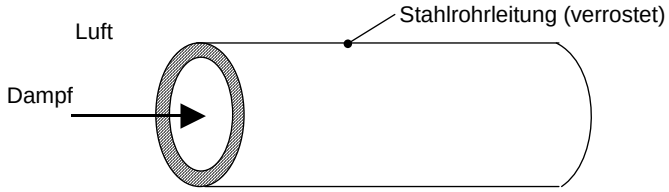
b) Wie groß ist der Wärmestrom $\dot{Q}$ durch die Rohrwand ?

c) Berechnen Sie die sich daraus ergebende neue Temperatur der Rohraußenwand $\vartheta_{Wa}^{(1)}$!

Lösung: a) α_a = 9,521 W/(m^2·K) b) $\dot{Q}$ = 28,19 kW c) $\vartheta_{Wa}^{(1)}$ = 955,1 °C

Aufgabe 10.5

Eine waagerecht liegende nicht isolierte Dampfleitung aus Stahl (verrostet) hat die Länge $l = 3\ m$ und einen Außendurchmesser $d_a = 100\ mm$. Die Temperatur der umgebenden Luft beträgt $\vartheta_{Fa} = 30\ °C$ und die der Rohroberfläche $\vartheta_{Wa} = 170\ °C$. Für den Luftdruck kann mit guter Näherung der Normdruck angenommen werden.



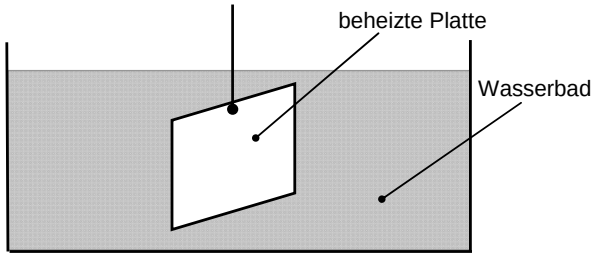
a) Berechnen Sie den Wärmeübergangskoeffizienten α_a an der äußeren Oberfläche der Rohrleitung !

b) Welcher Wärmeverluststrom $\dot{Q}$ tritt auf ?

Lösung: a) $\alpha_a = 7{,}635\ W/(m^2 \cdot K)$ b) $\dot{Q} = 1007{,}4\ W$

Aufgabe 10.6

Eine elektrisch beheizte Platte der Höhe $h = 0{,}5\ m$ und der Breite $b = 0{,}2\ m$ mit der Oberflächentemperatur $\vartheta_W = 80\ °C$ hängt senkrecht in einem Wasserbad von $\vartheta_F = 20\ °C$. Sie gibt beiderseitig Wärme an das Wasser ab. Das Wasser kann als inkompressibel angesehen werden.



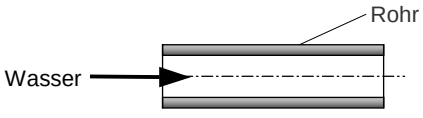
a) Ermitteln Sie den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α !

b) Welchen Wärmestrom $\dot{Q}$ gibt die beheizte Platte an das Wasserbad ab ?

Lösung: a) $\alpha = 859\ W/(m^2 \cdot K)$ b) $\dot{Q} = 10{,}30\ kW$

Aufgabe 10.7

Durch ein Rohr mit dem Innendurchmesser $d_i = 25\ mm$ und der Länge $l = 2\ m$ wird Wasser mit einer mittleren Geschwindigkeit $c_i = 0{,}05\ m/s$ gepumpt. Die mittlere Temperatur des Wassers im Rohr beträgt $\vartheta_{Fi} = 40\ °C$. Das Wasser kann als ideale Flüssigkeit angesehen werden.



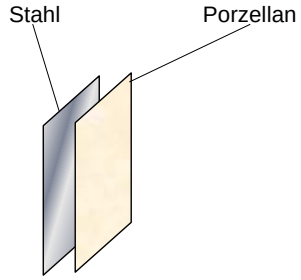
Bestimmen Sie den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_i !

Lösung: $\alpha_i = 207{,}5\ W/(m^2 \cdot K)$

11. Wärmestrahlung

Aufgabe 11.1

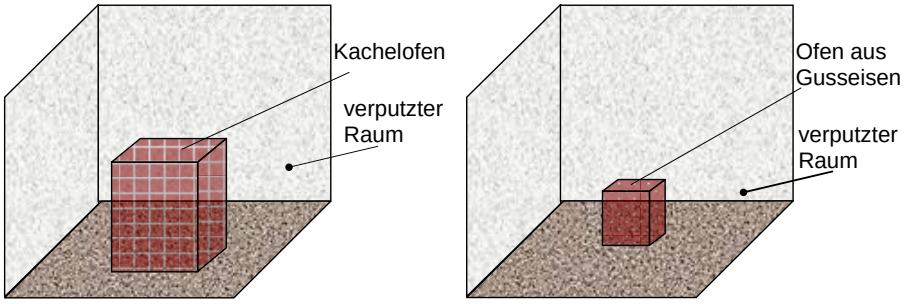
Welcher Wärmestrom $\dot{Q}$ wird zwischen zwei nahe beieinander liegenden parallelen Wänden aus verzinktem Stahl mit $T_1 = 500$ K und Porzellan mit $T_2 = 300$ K der gleichen Fläche von 10 m^2 übertragen.



Lösung: $\dot{Q} = 6{,}99$ kW

Aufgabe 11.2

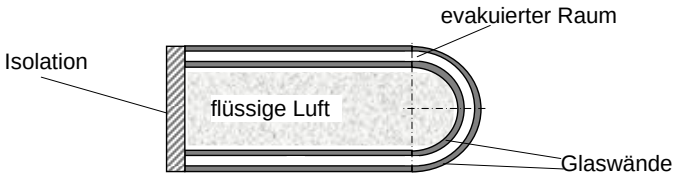
Vergleichen Sie die Heizleistungen durch Strahlung a) eines Kachelofens mit den Abmessungen 0,6 m x 1,0 m x 2,4 m und b) eines Ofens aus Gusseisen der Abmessungen 0,4 m x 0,5 m x 1,3 m. Beide Öfen sollen in einem verputzten Raum (4 m x 5 m x 3 m) mit einer mittleren Wandtemperatur $\vartheta_w = 17$ °C betrieben werden. Die Oberflächentemperatur des Kachelofens beträgt 70 °C und die des Ofens aus Gusseisen 140 °C. Für die Berechnung kann näherungsweise angenommen werden, dass die Öfen vollständig von den Wänden des Raums umgeben sind.



Lösung: a) $\dot{Q}_K = 2{,}51$ kW b) $\dot{Q}_E = 2{,}74$ kW

Aufgabe 11.3

Ein doppelwandiger Thermosbehälter, der zur Aufbewahrung von flüssiger Luft dient, besteht aus einem zylindrischen Teil der Länge l = 15 cm und einem halbkugelförmigen Boden mit dem Durchmesser d = 8 cm. Der Wärmeverlust durch den Deckel kann vernachlässigt werden. Zwischen den Wandungen aus Glas befindet sich ein enger evakuierter Raum. Die Temperatur der flüssigen Luft beträgt $\vartheta_L = -194$ °C. Die äußere Temperatur der Innenwand kann mit guter Näherung gleich der Temperatur der flüssigen Luft gesetzt werden. Die innere Oberflächentemperatur der Außenwand des Behälters beträgt $\vartheta_{Wa} = 10$ °C.

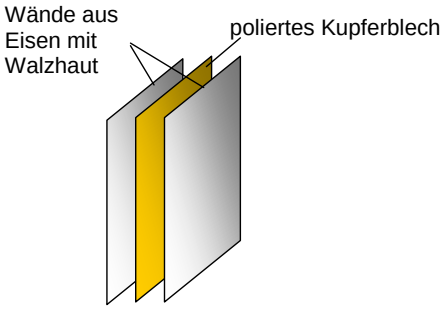


Für die Fälle, dass beide Wände a) aus Glas, unversilbert und b) aus Glas, blankversilbert sind, sollen die zwischen den Wänden des Thermosbehälters auftretenden Strahlungswärmeströme berechnet werden !

Lösung: a) $\dot{Q}_{un} = -15{,}78$ W b) $\dot{Q}_{Sil} = -0{,}13$ W

Aufgabe 11.4

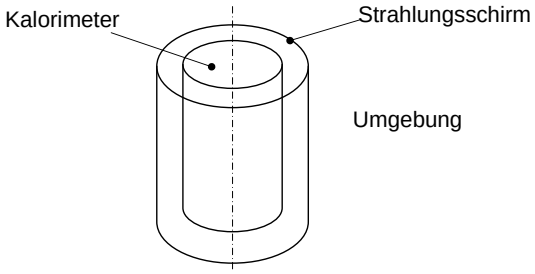
Wie groß ist die relative Änderung der Wärmestromdichte, wenn zwischen zwei ebenen, parallel weit ausgedehnten Wänden aus Eisen mit Walzhaut ein beiderseitig poliertes Kupferblech als Strahlungsschirm geschoben wird ?



Lösung: $\dfrac{\hat{\dot{q}}_{mit} - \hat{\dot{q}}_{ohne}}{\hat{\dot{q}}_{ohne}} = -97{,}6\ \%$

Aufgabe 11.5

Die Mantelfläche eines zylindrischen Kalorimeters mit 18 cm Durchmesser und der Länge von 30 cm soll mit einem zylindrischen Strahlungsschirm von 20 cm Durchmesser gleicher Länge umgeben werden. Die Temperatur der aus blankpoliertem Messingblech bestehenden zylindrischen Mantelfläche des Kalorimeters beträgt ϑ_1 = 250 °C, die Umgebungstemperatur ϑ_u = 20 °C. Die Umgebung kann als weit größer angenommen werden als das Kalorimeter bzw. der Strahlungsschirm.



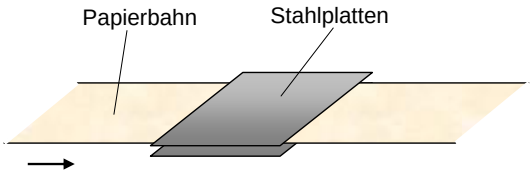
Wie groß ist der abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}$ durch Strahlung der zylindrischen Mantelfläche des Kalorimeters, wobei die Berechnung näherungsweise für sich umhüllende Körper erfolgen kann,

a) ohne Strahlungsschirm
b) mit einem Strahlungsschirm aus Eisenblech mit Walzhaut
c) mit einem Strahlungsschirm aus Eisenblech, blankgeätzt ?
d) Ermitteln Sie die Temperaturen des Strahlungsschirms für b) und c) !

Lösung: a) $\dot{Q}_{ohne}$ = 133,15 W b) $\dot{Q}_{EWalz}$ = 102,8 W c) $\dot{Q}_{Eblank}$ = 36,0 W
d) ϑ_{3EWalz} = 102,3 °C $\vartheta_{3Eblank}$ = 155,3 °C

Aufgabe 11.6

Eine zu trocknende Papierbahn mit der mittleren Temperatur von 60 °C und der Breite b = 1,5 m läuft in kleinem Abstand zwischen zwei beheizten parallel angeordneten Strahlungsplatten mit der Geschwindigkeit c = 1 m/s hindurch. Die Platten aus Gusseisen besitzen eine Oberflächentemperatur von 400 °C und eine Länge l = 2 m in Richtung der laufenden Papierbahn.

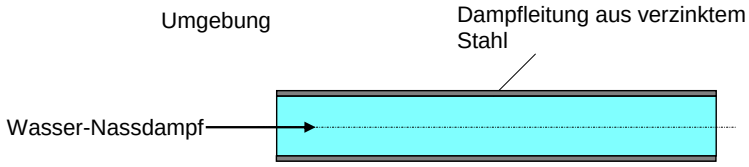


a) Wie groß ist die insgesamt durch Strahlung auf das Papier treffende Wärmestromdichte $\hat{q}$?
b) Berechnen Sie den Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung α_{Str} !
c) Welche Wärme Q/l wird je laufendem Meter Papier aufgenommen ?

Lösung: a) $\hat{q}$ = 16,66 kW/m^2 b) α_{Str} = 24,5 W/(m^2·K) c) Q/l = 49,98 kJ/m

Aufgabe 11.7

Eine freiliegende unisolierte Dampfleitung aus verzinktem Stahl mit einer Länge von 25 m besitzt einen Außendurchmesser von 75 mm. Im Rohr strömt Wasser-Nassdampf, der unter einem Druck von 5 bar steht. Die Temperatur der Umgebung beträgt - 10 °C (In erster Näherung darf die äußere Oberflächentemperatur des Rohres gleich der Temperatur des innen strömenden Nassdampfes angenommen werden.).

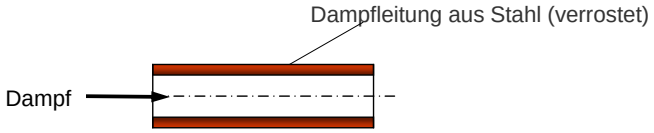


a) Ermitteln Sie den Wärmestrom infolge Strahlung an die Umgebung !
b) Berechnen Sie den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Rohroberfläche und Umgebung durch Strahlung !

Lösung: a) $\dot{Q}$ = 2,14 kW b) α_{Str} = 2,24 W/(m^2 K)

Aufgabe 11.8

Gemäß Aufgabe 10.5 ist eine nicht isolierte Dampfleitung aus Stahl (verrostet) der Länge l = 3 m und dem Außendurchmesser d_a = 100 mm gegeben. Die Temperatur der umgebenden Luft beträgt ϑ_{Fa} = 30 °C und die der Rohroberfläche ϑ_{Wa} = 170 °C.



Es sind zu berechnen:

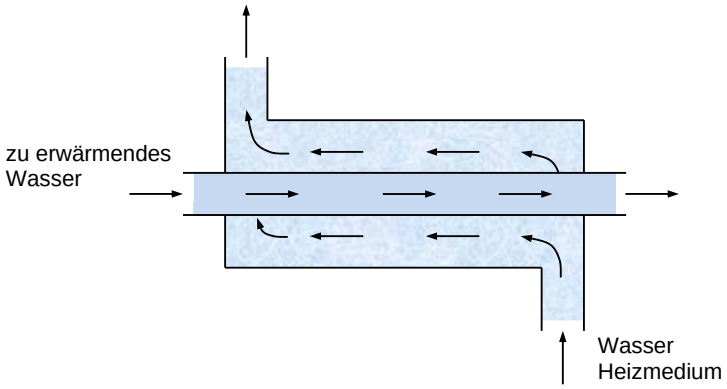
a) der Wärmestrom $\dot{Q}_{Str}$ infolge Strahlung an die Umgebung
b) der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung α_{Str} zwischen Rohroberfläche und Umgebung
c) der Anteil des Strahlungswärmestroms am Gesamtwärmeverluststrom infolge Konvektion und Strahlung $\dot{Q}_{Str} / \dot{Q}_{ges}$
d) der gesamte Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion und Strahlung .

Lösung: a) $\dot{Q}_{Str}$ = 1,127 kW b) α_{Str} = 8,540 W/(m^2 K)
c) $\dot{Q}_{Str} / \dot{Q}_{ges}$ = 0,528 d) α_{ges} = 16,17 W/(m^2 K)

12. Rekuperatoren (Wärmetauscher)

Aufgabe 12.1

In einem Rohrbündelwärmeübertrager, der als Gegenströmer betrieben wird, soll Wasser um $\Delta\vartheta_K$ = 20 K erwärmt werden. Als Heizmedium steht ebenfalls Wasser mit ϑ_{H1} = 90 °C zur Verfügung. Die minimale Temperaturdifferenz (Pinch Point) zwischen Heiz- und Kühlmedium soll $\Delta\vartheta_{HK}^{min}$ = 5 K betragen. Aus konstruktiven Gründen soll die Länge des Rohrbündels l = 4 m nicht überschreiten. Weiterhin sind gegeben: das Verhältnis der Wärmekapazitätsströme $\dot{C}_H / \dot{C}_K = 2$, der Volumenstrom des Heizmediums am Eintritt $\dot{V}_{H1}$ = 0,002 m^3/s sowie der innere Rohrdurchmesser d_i = 0,01 m. Der Wärmedurchgangskoeffizient, bezogen auf die Rohrinnenfläche, beträgt k_i = 270 W/(m^2·K). Sowohl das Heiz- als auch das Kühlmedium darf als inkompressible Flüssigkeit mit c_{pm}^{if} = const berechnet werden.



a) Wie hoch liegt die Austrittstemperatur des Heizmediums ϑ_{H2} ?

b) Wie groß ist der Massestrom des Heizmediums $\dot{m}_H$?

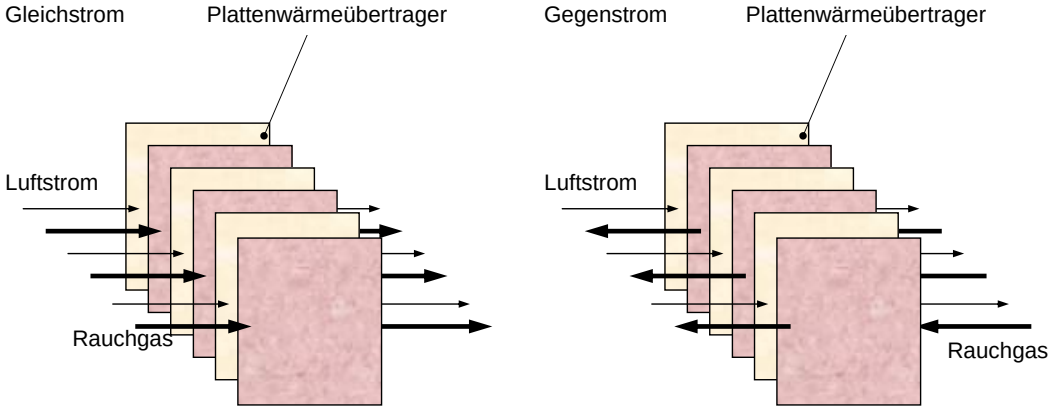
c) Wie groß ist die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlmedium ?
Zeichnen Sie qualitativ das ϑ,a -Schaubild des Wärmeübertragers !

d) Wieviel Rohre werden benötigt ?

Lösung: a) ϑ_{H2} = 80 °C b) $\dot{m}_H$ = 1,931 kg/s c) $\Delta\vartheta_{HK}^{m}$ = 9,10 K
d) z = 263 Rohre

Aufgabe 12.2

Ein Luftstrom von $\dot{m}_K$ = 20000 kg/h soll in verschiedenen Plattenwärmeübertragern von ϑ_{K1} = 20 °C auf ϑ_{K2} = 150 °C erwärmt werden. Hierzu steht ein Rauchgasmassestrom von $\dot{m}_H$ = 26000 kg/h [$c_{p,H}$ = 1,1 kJ/(kg·K)] mit einer Temperatur ϑ_{H1} = 300 °C zur Verfügung. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt jeweils k = 15 W/(m^2·K). Sowohl das Rauchgas als auch die Luft können mit guter Genauigkeit als ideale Gase mit c_{pm}^{ig} = const berechnet werden.



Wie hoch ist die Austrittstemperatur ϑ_{H2} des Rauchgases und wie groß ist die Heizfläche A,

a) wenn es sich um einen Gleichstrom-Wärmeübertrager handelt,
b) wenn es sich um einen Gegenstrom-Wärmeübertrager handelt ?
c) Zeichnen Sie qualitativ die ϑ,a -Schaubilder für den Gleichstrom- und den Gegenstrom-Wärmeübertrager !

Lösung: a) ϑ_{H2}^{Gl} = 208,1 °C A_{Gl} = 344,8 m^2

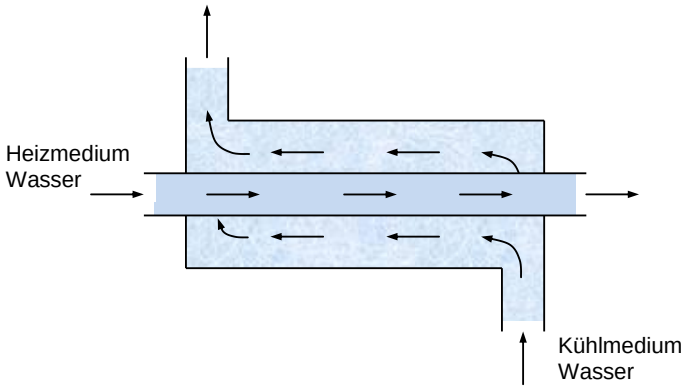
b) ϑ_{H2}^{Geg} = 208,1 °C A_{Geg} = 289,0 m^2

Aufgabe 12.3

In einem Gegenstromrekuperator soll ein Wärmestrom $\dot{Q}$ = 25 kW übertragen werden. Als Heiz- und Kühlmittel dient Wasser. Gegeben sind:

die äußere Heizfläche	$A_a = 6\ m^2$
der Wärmedurchgangskoeffizient (bezogen auf A_a)	$k_a = 300\ W/(m^2 \cdot K)$
die Temperaturänderung des Kühlmediums	$\Delta\vartheta_K = 50\ K$
die Temperaturänderung des Heizmediums	$\Delta\vartheta_H = 25\ K$
die Eintrittstemperatur des Kühlmediums	$\vartheta_{K1} = 10\ °C$

(Näherungsweise darf das Wasser als ideale Flüssigkeit mit $c_{pm}^{if} = 4{,}19\ kJ/(kg \cdot K) = const$ berechnet werden.) .



a) Zeichnen Sie qualitativ das ϑ,a -Schaubild !

b) Wie groß ist der Massestrom des Kühlmediums $\dot{m}_K$?

c) Wie hoch liegt die Eintrittstemperatur des Heizmediums ϑ_{H1} ?

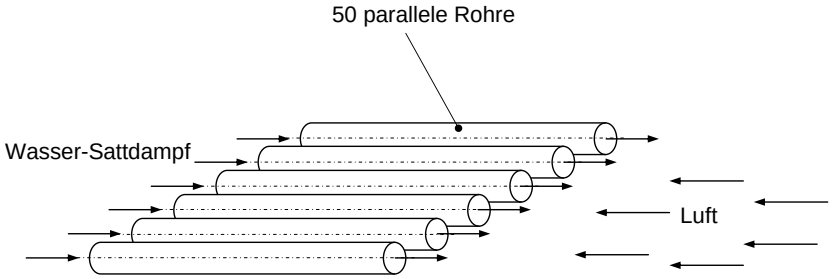
d) Wie groß sind die Austrittstemperaturen des Heiz- und Kühlmediums ϑ_{H2} und ϑ_{K2} ?

Lösung: b) $\dot{m}_K = 0{,}1193\ kg/s$ c) $\vartheta_{H1} = 65{,}0\ °C$

d) $\vartheta_{H2} = 40{,}0\ °C$, $\vartheta_{K2} = 60{,}0\ °C$

Aufgabe 12.4

Der Wärmebedarf eines Raumes von $\dot{Q} = 18{,}5\ \text{kW}$ wird durch ein Luftheizgerät gedeckt, das mit Wasser-Sattdampf bei einem näherungsweise konstanten Druck $p_H = 0{,}15\ \text{MPa}$ als Heizmedium arbeitet. Der Dampf durchströmt $z = 50$ parallele Rohre ($d_i = 32\ \text{mm}$), dabei nimmt sein Dampfanteil um 10 % ab. Die Rohre werden von der aus dem Raum angesaugten Luft (Eintrittstemperatur $\vartheta_{K1} = 20\ °\text{C}$) im Gegenstrom umströmt. Das Verhältnis beider Masseströme ist $\dot{m}_K / \dot{m}_H = 4{,}85$. Der auf die innere Rohroberfläche bezogene Wärmedurchgangskoeffizient beträgt $k_i = 45\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$. (Näherungsweise kann die Luft als ideales Gas und deren als konstant anzunehmende spezifische Wärmekapazität c_{pK} bei Eintrittstemperatur ermittelt werden.)



a) Zeichnen Sie qualitativ das ϑ,a-Schaubild !

b) Welcher Massestrom $\dot{m}_H$ Sattdampf wird benötigt ?

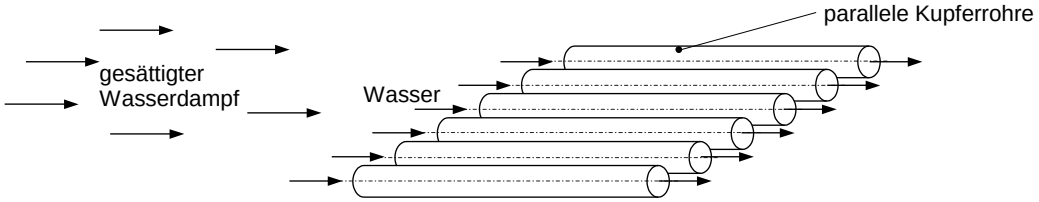
c) Wie groß ist die Austrittstemperatur ϑ_{K2} der Luft aus dem Luftheizgerät ?

d) Berechnen Sie die Länge l des Rohrbündels über die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlmedium $\Delta\vartheta^m_{HK}$ und parallel dazu über die Betriebscharakteristik Φ !

Lösung: b) $\dot{m}_H = 0{,}0831\ \text{kg/s}$ c) $\vartheta_{K2} = 65{,}7\ °\text{C}$ d) $l = 1{,}24\ \text{m}$; $l_\Phi = 1{,}25\ \text{m}$

Aufgabe 12.5

In einem Gleichstrom-Rohrbündelwärmeübertrager wird mit trocken gesättigtem Wasserdampf vom Druck $p_H = 0{,}15$ MPa = const ein Massestrom Wasser $\dot{m}_K = 27000$ kg/h von $\vartheta_{K1} = 20$ °C auf $\vartheta_{K2} = 60$ °C erwärmt. Das Wasser strömt in die als Rohrbündel parallel geschalteten Kupferrohre ($d_a = 24$ mm, $d_i = 20$ mm) mit der Geschwindigkeit $c_{K1} = 0{,}55$ m/s. Der Dampf kondensiert vollständig. Der auf die äußere Rohroberfläche bezogene Wärmedurchgangskoeffizient beträgt dabei $k_a = 1850$ W/(m^2·K) (Das zu erwärmende Wasser darf als ideale Flüssigkeit mit c_{pm} = const berechnet werden.).

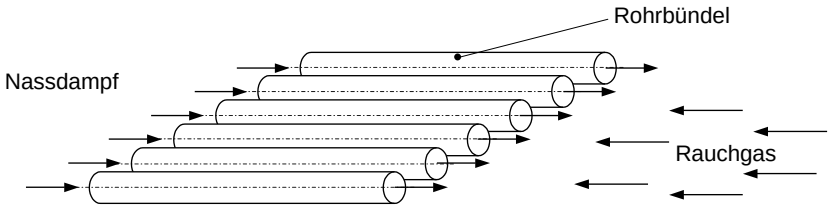


a) Zeichnen Sie qualitativ das ϑ,a-Schaubild !
b) Aus wie vielen Rohren besteht das Rohrbündel ?
c) Welcher Wärmestrom $\dot{Q}$ wird übertragen ?
d) Berechnen Sie die Länge l des Rohrbündels über die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlmedium $\Delta\vartheta^m_{HK}$ und parallel dazu über die Betriebscharakteristik Φ !
e) Wie groß ist das Kühlwasserverhältnis $\dot{m}_K / \dot{m}_H$?

Lösung: b) z = 44 c) $\dot{Q}$ = 1255,2 kW d) l = 2,945 m; l_Φ = 2,965 m
e) $\dot{m}_K / \dot{m}_H$ = 13,3

Aufgabe 12.6

In einem Gegenstrom-Wärmeübertrager soll Wasser-Nassdampf vom Dampfgehalt $x_{K1} = 0{,}1$ und dem näherungsweise konstanten Druck $p_K = 100$ bar vollständig verdampft werden. Der Nassdampf strömt dabei durch ein aus n = 30 parallelen Rohren (Innendurchmesser $d_i = 10$ mm, Länge l = 2 m) bestehendes Rohrbündel. Sein Massenstrom beträgt $\dot{m}_K = 0{,}01$ kg/s. Als Heizmedium wird Rauchgas verwendet, das sich von $\vartheta_{H1} = 620$ °C auf $\vartheta_{H2} = 496$ °C abkühlt.



a) Zeichnen Sie qualitativ das ϑ,a-Schaubild !
b) Berechnen Sie den übertragenen Wärmestrom $\dot{Q}$!
c) Wie hoch ist die Austrittsgeschwindigkeit c_{K2} des gesättigten Dampfes ?
d) Berechnen Sie den auf die Wärmeübertragerinnenfläche bezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_i !

Lösung: b) $\dot{Q}$ = 11,86 kW c) c_{K2} = 0,0765 m/s d) k_i = 26,0 W/(m^2·K)