Hochschule Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Übungsfragen

Kälte- und Wärmepumpentechnik

Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Technische Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar

HOCHSCHULE ZITTAU/GÖRLITZ University of Applied Sciences

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

Übungsaufgaben

Kälte- und Wärmepumpentechnik

1 Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen
2 Kältemittel für Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen
3 Mehrstufige Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen
4 Absorptionskältemaschinen und Absorptionswärmepumpen
5 Kaltgasmaschinen
6 Gasverflüssigung
7 Thermoelektrische Kühlung

1 Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen

Aufgabe 1.1

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

a) Wie groß ist die Leistungszahl ε_{KM} der Anlage ?
b) Welche Antriebsleistung P_t ist erforderlich ?

Lösung: a) $\varepsilon_{KM} = 4{,}09$ b) $P_t = 13{,}44$ kW

Aufgabe 1.2

Eine mit R134a arbeitende Kälteanlage soll $\dot{m} = 1{,}40 kg/s$ Kühlsole von ϑ_{S1} = 2 °C auf ϑ_{S2} = - 5 °C abkühlen. Die mittlere spezifische Wärmekapazität der als inkompressibel anzusehenden Kühlsole beträgt c_{pS} = 3,6 kJ/(kg·K). Der R134a-Dampf tritt aus dem Verdampfer als überhitzter Dampf mit einem Druck von p_V = 0,16 MPa, wobei die Überhitzung 3 K beträgt, aus. Er wird anschließend auf p_k = 1 MPa verdichtet, durchströmt danach den Kondensator und wird isobar auf ϑ_3 = 15 °C unterkühlt. Der Verdichter besitzt einen isentropen Wirkungsgrad η_{sV} = 0,7 und kann als adiabat angesehen werden. Im Drosselventil erfolgt die Entspannung auf den Verdampferdruck p_v. Der Kondensator wird von Kühlwasser durchströmt, das mit einer Temperatur ϑ_{W1} = 10 °C eintritt und ihn mit ϑ_{W2} = 16 °C verläßt. Das Kühlwasser kann als inkompressibel berechnet werden.
Darzustellen bzw. zu bestimmen sind:
a) das Schaltbild der Anlage,
b) der Zustandsverlauf im lgp,h-Diagramm mit Kennzeichnung der Zustandspunkte und tabellarischer Übersicht der Zustandsgrößen (p, ϑ, h),
c) die Kälteleistung $\dot{Q}_{zu}$ der Anlage,
d) der Massestrom $\dot{m}$ des Kältemittels,
e) die Leistung P_t des Verdichters,
f) die Leistungszahl ε_{KM},
g) der im Kondensator abzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$,
h) der notwendige Kühlwassermassestrom $\dot{m}_W$,
i) Vergleich mit dem analogen *Carnot*-Prozess, wobei näherungsweise Verdampfungs- und Kondensationstemperatur als thermodynamische Mitteltemperaturen verwendet werden können.

Lösung: c) $\dot{Q}_{zu}$ = 35,28 kW d) $\dot{m}$ = 0,206 kg/s e) P_t = 11,42 kW
f) ε_{KM} = 3,09 g) $\dot{Q}_{ab}$ = –46,70 kW h) $\dot{m}_W$ = 1,86 kg/s
i) ν_{KM} = 61,6 %

Aufgabe 1.3

Die Kälteleistung einer NH_3-Kälteanlage beträgt $\dot{Q}_{zu} = 100$ kW. Die Verdampfungstemperatur liegt bei $\vartheta_V = -30$ °C. Der nach der Wärmeaufnahme im Verdampfer trocken gesättigte Dampf wird im Kompressor mit einem Gütegrad $\eta_{sV} = 0{,}84$ (bezogen auf die Isentrope) verdichtet. Die Kondensation erfolgt isobar bei $\vartheta_K = 30{,}93$ °C. Nach der Kondensation wird das Kältemittel isobar auf $\vartheta_3 = 10$ °C unterkühlt. Im Drosselventil erfolgt die Entspannung auf den Verdampferdruck (Der Kompressor und das Drosselventil können in erster Näherung als adiabat berechnet werden.).

Zu bestimmen sind:

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

b) die Temperatur ϑ_2 nach dem Verdichter,

c) die Antriebsleistung P_t des Verdichters,

d) der aus dem Kondensator abzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$.

Lösung: a) $\dot{m} = 0{,}085$ kg/s b) $\vartheta_2 = 165{,}47$ °C c) $P_t = 35{,}42$ kW

d) $\dot{Q}_{ab} = -135{,}42$ kW

Aufgabe 1.4

Die Heizleistung der Warmwasserheizung eines Gebäudes beträgt $\dot{Q}_H = 10$ kW, wobei die Vorlauftemperatur $\vartheta_{H1} = 80$ °C beträgt. Diese Heizleistung soll bei gleicher Vorlauftemperatur durch eine Wärmepumpe bereit gestellt werden. Als Wärmereservoir steht Flusswasser mit einer Temperatur $\vartheta_{Fl} = 0°C$ zur Verfügung. Von der Wärmepumpe ist bekannt, daß sie 60 % der Leistungszahl $\varepsilon_{c,WP}$ eines *Carnot*-Linksprozesses zwischen den Temperaturen $T^m_{qzu} = \vartheta_{Fl}$ und $T^m_{qab} = \vartheta_{H1}$ erreicht.

Für die Berechnung darf der Verdichter als adiabat reversibel arbeitend vorausgesetzt werden.

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

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

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

Lösung: a) $\varepsilon_{WP} = 2{,}649$ $P_t = 3{,}78$ kW

b) $\dot{Q}_{zu} = 6{,}22$ kW c) $P_{el} = 10$ kW

Aufgabe 1.5

Eine Wärmepumpe arbeitet mit R134a nach folgendem Kreisprozess: Trocken gesättigter Dampf mit einer Temperatur ϑ_1 = 10 °C wird irreversibel in einem als adiabat anzusehenden Verdichter einem isentropen Wirkungsgrad η_{sV} = 0,5 auf den Druck p_k komprimiert. Im Kondensator wird isobar bei Siedetemperatur ϑ_K = 60,45 °C und anschließender Unterkühlung auf ϑ_3 = 50 °C die spezifische Wärme $-q_{ab}$ abgegeben. Das Arbeitsmittel wird danach in einem Drosselventil auf p_V entspannt, durchströmt danach den Verdampfer und nimmt hier bei konstantem Druck die spezifische Wärme q_{zu} auf. Zu bestimmen sind:

a) die Drücke p_V und p_K im Verdampfer und Kondensator,
b) die spezifische technische Arbeit w_t zur Kompression,
c) der Kältemittelmassestrom $\dot{m}$, wenn vom Kondensator ein Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$ = - 29 kW an den zu beheizenden Raum abgegeben wird,
d) die erforderliche elektrische Leistung P_{el}, wenn die Beheizung des Raumes durch eine Widerstandsheizung anstatt der Wärmepumpe erfolgen würde,
e) der prozentuale Anteil der elektrischen Leistung zum Antrieb der Wärmepumpe im Vergleich zur Leistung der Widerstandsheizung,
f) die Leistungszahl ε_{WP} der Wärmepumpe,
g) Vergleich mit dem analogen *Carnot*-Prozess, wobei näherungsweise Verdampfungs- und Kondensationstemperatur als thermodynamische Mitteltemperaturen verwendet werden können.

Lösung: a) p_v = 0,41 MPa p_k = 1,70 MPa b) w_t = 58,29 kJ/kg
c) $\dot{m}$ = 0,152 kg/s d) P_{el} = 29 kW e) P_t/P_{el} = 30,5 %
f) ε_{WP} = 3,28 g) ν_{WP} = 49,6 %

Aufgabe 1.6

Zur Beheizung eines Gebäudes wird über die gesamte Heizperiode gemittelt ein Wärmestrom von $\dot{Q}_H$ = 300 kW benötigt. Die vorhandene Heizanlage mit einem Wirkungsgrad von η_H = 50 % auf der Basis von Braunkohlenbriketts soll durch eine Wärmepumpe ersetzt werden, deren Leistungszahl 30 % der eines analogen *Carnot*-Prozesses zwischen den im folgenden erläuterten Temperaturen beträgt. Als Energiereservoir steht Brunnenwasser mit einer mittleren Temperatur von ϑ_W = 8 °C zur Verfügung. Die Raumtemperatur soll ϑ_H = 20 °C betragen, wofür eine Vorlauftemperatur von 45°C notwendig ist. Die minimalen Temperaturdifferenzen des im Gleichstrom betriebenen Verdampfers und Kondensators betragen je 5 K. Die jährliche Betriebsdauer der Heizung beträgt t = 5500 h.

a) Welche Masse Braunkohlenbriketts benötigt die alte Heizanlage jährlich?
b) Welche elektrische Arbeit W_{el} würde jährlich durch die Wärmepumpe verbraucht ?

Lösung: a) m_B = 642,16 t jährlich b) W_{el} = 800 MWh

Aufgabe 1.7

Die Kälteleistung einer Kompressionskälteanlage beträgt $\dot{Q}_{zu}^{KM} = 65\,kW$. Sie besitzt eine Leistungszahl ε_{KM} = 2,9. Eine direkte Nutzung des Abwärmestromes der Kälteanlage für eine Heizung ist wegen zu niedriger Kondensationstemperatur nicht möglich. Deshalb soll eine mit dem Arbeitsmittel R134a betriebene Wärmepumpe angeschlossen werden. Der von der Wärmepumpe abgegebene Wärmestrom soll für die Aufwärmung von Wasser mit $\vartheta_{W,1} = 20^oC$ bis $\vartheta_{W,2} = 40^oC$ genutzt werden (Das Wasser kann mit guter Genauigkeit als inkompressibel angesehen werden.). Für den Vergleichsprozess der Wärmepumpe sind folgende Angaben bekannt:

- die Verdampfung erfolgt bei $\vartheta_{V,WP} = 30^oC$ vollständig,
- die Zustandsänderung im Verdichter verläuft in erster Näherung adiabat reversibel bis zum Druck p_K = 2 MPa und
- die Austrittstemperatur des Arbeitsmittels aus dem Kondensator der Wärmepumpe beträgt ϑ_3 = 50 °C.

Zu entwerfen ist das Schaltschema der Anlage.
Zu berechnen sind für die Wärmepumpenanlage:

a) der im Verdampfer aufgenommene Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$,
b) der Massestrom $\dot{m}$ des Kältemittels R134a
c) die Verdichterleistung P_t
d) die Leistungszahl ε_{WP} und
e) der Massestrom des aufzuheizenden Wassers $\dot{m}_W$.

Lösung: a) $\dot{Q}_{zu}$ = 87,41 kW b) $\dot{m}_{KM}$ = 0,609 kg/s c) P_t = 11,74 kW
d) ε_{WP} = 8,45 e) $\dot{m}_W$ = 1,185 kg/s

Aufgabe 1.8

Eine Kompressionskältemaschine arbeitet mit dem Kältemittel R134a und soll bei einer Kondensationstemperatur von 35,53 °C betrieben werden. Als Verdichterwirkungsgrad wird vom Hersteller η_S = 0,83 angegeben. Eine Unterkühlung im Kondensator findet nicht statt.

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Kältemaschine !
b) Bestimmen Sie für zwei Kreisprozesse mit den zugehörigen Verdampfungstemperaturen -10 °C und -30 °C die Zustandspunkte der Kreisprozesse sowie die Leistungszahlen ε_{KM} !
c) Ermitteln Sie die Leistungszahlen $\varepsilon_{KM}^{C,analog}$ der analogen *Carnot*-Prozesse und die Gütegrade ν_{KM} der realen Kaltdampfprozesse, wobei näherungsweise Verdampfungs- und Kondensationstemperatur als thermodynamische Mitteltemperaturen verwendet werden können !

Lösung: b) ε_{KM} = 3,796 für ϑ_V = -10 °C , ε_{KM} = 2,196 für ϑ_V = –30 °C
c) $\varepsilon_{KM}^{C,analog}$ = 5,78, ν_{KM} = 0,66 für ϑ_V = –10 °C
$\varepsilon_{KM}^{C,analog}$ = 3,71, ν_{KM} = 0,592 für ϑ_V = –30 °C

Aufgabe 1.9

In einem Industrieunternehmen soll ein kontinuierlich anfallender Abwassermassestrom von 52 t/h für eine Wärmepumpenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 62,48°C genutzt werden. Dabei ist eine Abkühlung des Abwassers von 22 °C auf 18 °C vorgesehen. Die Rücklauftemperatur des Heizungswassers betrage 45 °C, die minimalen Temperaturdifferenzen beider jeweils im Gleichstrom geschalteter Wärmeübertrager können in erster Näherung mit 5 K angenommen werden. Sowohl das Wasser der Heizung als auch das Abwasser kann als inkompressibel berechnet werden.

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der einzusetzenden Wärmepumpe und die ϑ,a-Schaubilder für Verdampfer und Kondensator !
b) Bestimmen Sie für das Kältemittel R134a und einen isentropen Verdichterwirkungsgrad von η_s = 0,85 die Zustandspunkte, die Leistungszahl sowie Verdichter- und Heizleistungen !
c) Überprüfen Sie, ob der gewählte Prozess bezüglich des Primärenergieeinsatzes im Vergleich zu einem Heizkessel sinnvoll ist. Für die Elektroenergieerzeugung ist dabei ein Gesamtwirkungsgrad von 38 % anzunehmen. Der Feuerungswirkungsgrad der als Alternative einsetzbaren Kesselanlage liegt bei 88 %.

Lösung: b) ε_{WP} = 3,98 P_t = 81,23 kW $\dot{Q}_H = -\dot{Q}_K$ = 323,04 kW

c) $\dot{E}_{primär_H}$ = 367,09 kW $\dot{E}_{primär_WP}$ = 213,76 kW

Aufgabe 1.10

Eine Kompressionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 35 kW arbeitet mit dem Kältemittel R227 und soll bei einer Kondensationstemperatur von 28 °C betrieben werden, wobei eine Unterkühlung um 5 K stattfindet. Die Überhitzung im Verdampfer beträgt 10 K. Für die Verdichter wird vom Hersteller der isentrope Verdichterwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Druckverhältnis angegeben:

$$\eta_s = 0{,}84976 + 0{,}024315 \cdot \frac{p_K}{p_V} - 0{,}0071483 \cdot \left(\frac{p_K}{p_V}\right)^2 + 0{,}0002146 \cdot \left(\frac{p_K}{p_V}\right)^3 .$$

Die Verdampfungstemperatur beträgt -20 °C.

a) Bestimmen Sie Verdampferdruck, Kondensatordruck sowie die Enthalpien der Zustandspunkte des Kreisprozesses und die Leistungszahl !
b) Berechnen Sie Kältemittelmassestrom und Verdichterleistung !

Lösung: a) ε_{KM} = 3,35 b) $\dot{m}$ = 0,389 kg/s P_t = 10,45 kW

Aufgabe 1.11

Eine Kältemaschine mit R134a arbeitet mit einem Kondensatoraustrittsdruck von 9 bar und einem Verdampfereintrittsdruck von 2 bar. Messungen des Druckverlustes ergaben für den Kondensator Werte von 1 bar und für den Verdampfer von 0,3 bar. Der Verdichtergütegrad beträgt $\eta_s = 0{,}8$. Bei der Berechnung darf die Näherung benutzt werden, dass der Druck des fiktiven Endpunkts der isentropen Verdichtung (2s) dem Austrittsdruck des Verdichters (2) entspricht.

a) Ermitteln Sie Leistungszahl ε_{KM} des Prozesses mit Druckverlusten !

b) Berechnen Sie vergleichend die Leistungszahl ε_{KM}^{ohne} ohne Druckverluste ($p_V = 2$ bar, $p_K = 9$ bar) !

c) Welcher relative Fehler in % wird bei der Berechnung der Leistungszahl ohne Berücksichtigung der Druckverluste begangen ?

Lösung: a) $\varepsilon_{KM} = 3{,}04$ b) $\varepsilon_{KM}^{ohne} = 3{,}65$ c) + 20,0 %

2 Kältemittel für Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen

Aufgabe 2.1

Eine Lagerhalle für Tiefkühllebensmittel soll mit einer Kälteanlage ausgerüstet werden. Die einzuhaltende Lagertemperatur liegt bei -22 °C, wobei im Verdampfer eine minimale Temperaturdifferenz von 5 K gewährleistet sein soll. Hochrechnungen ergaben, daß der aus der Lagerhalle abzuführende Wärmestrom 150 kW beträgt. Der Gleichstromkondensator wird mit Kühlwasser von 24 °C beaufschlagt, das sich auf maximal 27 °C aufheizen darf, wobei wiederum eine minimale Temperaturdifferenz von 5 K zugrunde gelegt werden soll. Der isentrope Verdichterwirkungsgrad des Verdichters kann in Abhängigkeit vom Druckverhältnis mit der Gleichung in Aufgabe 1.10 berechnet werden.
Untersuchen Sie für diese Randbedingungen vergleichend Leistungszahlen, Kältemittelmassenströme, Verdichterleistungen und Druckverhältnisse für Kältemaschinen mit den Kältemitteln

a) NH_3 b) R134a .

c) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage sowie das ϑ,a-Schaubild für den Kondensator !

Lösung:

	NH_3	R134a
ε_{KM}	2,10	2,11
$\dot{m}$	0,139 kg/s	1,090 kg/s
P_t	71,29 kW	71,27 kW
p_K / p_V	8,98	8,40

Aufgabe 2.2

Eine Kälteanlage arbeitet mit dem Kältemittelgemisch MP 39 zwischen dem Verdampferdruck 0,1 MPa und dem Kondensatordruck 1 MPa, wobei die Kälteleistung 30 kW beträgt und einer Kühlsole entzogen wird. Der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters beträgt 0,75. Die Unterkühlung im Kondensator und die Überhitzung im Verdampfer können vernachlässigt werden. Die minimale Temperaturdifferenz im Verdampfer beträgt 5 K.

a) Auf welche Temperatur kann die Kühlsole im Verdampfer maximal abgekühlt werden, wenn der Verdampfer im Gegenstrom betrieben wird ?

b) Zeichnen Sie für den Verdampfer ein ϑ,a-Schaubild !

c) Fertigen Sie eine tabellarische Übersicht der Drücke, Temperaturen und Enthalpien in den Zustandspunkten an !

d) Ermitteln Sie den Massestrom $\dot{m}$ des Kältemittels und die Leistung P_t des Verdichters, den im Kondensator abzuführenden Wärmestrom $\dot{Q}_K$ sowie die Leistungszahl ε_{KM}.

Lösung: a) $\vartheta_{Sole}^{min} = -26$ °C d) $\dot{m} = 0{,}196$ kg/s $P_t = 14{,}9$ kW

$\dot{Q}_K = -44{,}9$ kW $\varepsilon_{KM} = 2{,}01$

3 Mehrstufige Kompressionskältemaschinen und -wärmepumpen

Aufgabe 3.1

In einem Markt sind Tiefkühltruhen für Lebensmittel auf der Temperatur ϑ_0 = - 20 °C zu halten, wobei eine Kälteleistung $\dot{Q}_o$ = 12 kW anfällt. Da außerdem Bedarf an Wärme für Raumheizung besteht, ist der Einsatz einer zweistufigen Kälteanlage mit äußerer Zwischenkühlung zu prüfen. Die Abwärme des Kondensators soll für eine Niedertemperaturheizung genutzt werden. Als Kältemittel ist R134a vorgesehen. Die für die Heizung notwendige Temperatur des Kältemittels im Kondensator beträgt 60,45 °C. Für den Zwischenkühler kann Brunnenwasser genutzt werden, so dass das Kältemittel auf 20 °C abgekühlt wird. Die Kältemitteltemperatur im Verdampfer soll 5 K unter der Temperatur in den Tiefkühltruhen betragen. Die Unterkühlung im Kondensator sowie die Überhitzung im Verdampfer sind zu vernachlässigen. Der isentrope Wirkungsgrad der zur Verfügung stehenden Kompressoren beträgt 0,8.

a) Berechnen Sie den Druck im Zwischenkühler !
b) Ermitteln Sie den Kältemittelmassestrom, die im Kondensator zur Verfügung stehende Heizleistung und die aufzubringende Gesamtverdichterleistung !
c) Wie hoch sind die Verdichteraustrittstemperaturen ?
d) Welche Leistungszahl erreicht der Prozess, wobei die Kälteleistung als Nutzen anzusehen ist ?
e) Berechnen Sie die Leistungszahl, Verdichterleistung und die Verdichteraustritts-temperatur für einen einstufigen Prozess ohne Zwischenkühlung, wobei sich der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters in diesem Fall auf 0,6 verringert !

Lösung: a) p_M = 0,425 MPa b) $\dot{m}$ = 0,126 kg/s $\dot{Q}_K$ = - 20,55 kW

$P_{t,ges}$ = 9,23 kW c) t_{M1} = 25,8 °C ϑ_2 = 79,8 °C

d) ε_{KM} = 1,3

e) P_t = 12,23 kW ε_{KM} = 0,98 ϑ_2 = 105,2 °C

Aufgabe 3.2

Eine Großkälteanlage mit einer Kälteleistung von 200 kW arbeitet mit dem Kältemittel Ammoniak. Der Verdampferdruck soll auf 1,2 bar eingestellt werden. Für den Gegenstromkondensator steht Kühlwasser mit einer Temperatur von 20 °C zur Verfügung, so dass sich die Kondensationstemperatur zu 29,5 °C ergibt. Legen Sie einen zweistufigen Kaltdampfprozess mit Mitteldruckflasche und äußerer Zwischenkühlung thermodynamisch aus. Für den im Gleichstrom betriebenen Zwischenkühler soll Kühlwasser verwendet werden, das sich auf 25 °C erwärmt. Vereinfachend ist für den Zwischenkühler 5 K als minimale Temperaturdifferenz anzunehmen. Der Verdichtergütegrad der Niederdruckstufe beträgt 0,85 und der der Hochdruckstufe 0,8.

a) Ermitteln Sie die Kältemittelmasseströme in der Niederdruck- und Hochdruckstufe sowie in der Verbindungsleitung zwischen Mitteldruckflasche und Mischventil !

b) Berechnen Sie die aufzubringenden Leistungen in den Verdichterstufen und die Leistungszahl !

Lösung: a) $\dot{m}_{ND} = 0{,}161$ kg/s $\dot{m}_{HD} = 0{,}184$ kg/s

$(\dot{m}_{HD} - \dot{m}_{ND}) = 0{,}023$ kg/s

b) $P_{tND} = 28{,}23$ kW $P_{tHD} = 41{,}37$ kW $\varepsilon_{KM} = 2{,}87$

Aufgabe 3.3

In einem Tiefkühlschrank mit R134a soll Kryotechnik bei einer Temperatur von - 46,41 °C aufbewahrt werden. Die Kälteleistung beträgt 2 kW. Der Schrank steht in einem beheizten Raum mit einer Temperatur von 21,33 °C. Im Verdampfer und Kondensator wird jeweils von einer minimalen Temperaturdifferenz von 5 K zwischen dem Kältemittel und der Luft ausgegangen, wobei sich im Kondensator eine Unterkühlung um 5 K und im Verdampfer eine Überhitzung um ebenfalls 5 K einstellt. Für den Zwischenkühler steht Kühlwasser zur Verfügung, so dass das Kältemittel den Zwischenkühler mit der Temperatur 10 °C verlässt. Die isentropen Wirkungsgrade der Verdichterstufen betragen 0,7.

Ermitteln Sie für eine zweistufige Prozessführung mit Mitteldruckflasche, innerer und äußerer Zwischenkühlung:

a) die Kältemittelmasseströme in der Niederdruck- und Hochdruckstufe,

b) die aufzubringenden technischen Arbeitsleistungen in den Verdichterstufen, den Zwischenkühler- und den Kondensatorwärmestrom,

c) die erreichte Leistungszahl !

Lösung: a) $\dot{m}_{ND} = 0{,}0103$ kg/s $\dot{m}_{HD} = 0{,}0164$ kg/s

b) $P_{tND} = 0{,}532$ kW $P_{tHD} = 0{,}899$ kW

$\dot{Q}_K = -3{,}353$ kW $\dot{Q}_Z = -0{,}078$ kW

c) $\varepsilon_{KM} = 1{,}397$

4 Absorptionskältemaschinen und -wärmepumpen

Aufgabe 4.1

Der kältetechnische Teil einer Großklimaanlage soll als Absorptionsanlage mit dem Arbeitsstoffpaar H_20/LiBr ausgelegt werden. Zu realisieren ist eine Kälteleistung von 150 kW, wobei das Kaltwasser für die Klimaanlage auf 10 °C abgekühlt werden muss. Als Heizmedium für den Austreiber steht Abdampf mit Siedetemperatur bei einem Druck p = 1 bar zur Verfügung. Für Kondensator und Absorber kann Kühlwasser mit der Temperatur 25 °C eingesetzt werden, das sich in beiden Apparaten auf 30 °C erwärmt. Die minimalen Temperaturdifferenzen der eingesetzten Wärmeübertrager einschl. Absorber und Austreiber betragen jeweils 5 K (Näherungsweise kann angenommen werden, dass reines Wasser im Austreiber verdampft. Die Druckverluste sind zu vernachlässigen.).

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage !
b) Welche Temperaturen sind im Kondensator, Verdampfer, Absorber und Austreiber zu realisieren ?
c) Welche Drücke stellen sich im Kondensator und Verdampfer ein ?
d) Ermitteln Sie die Kältemittelmasseanteile ξ_r und ξ_a der Lösungsmasseströme !
e) Bestimmen Sie den umlaufenden Kältemittelmassestrom sowie die Lösungsmasseströme !

Lösung: c) p_K = 5,6 kPa p_V = 0,87 kPa
d) ξ_r = 0,435 ξ_a = 0,318
e) $\dot{m}$ = 0,0635 kg/s $\dot{m}_r$ = 0,370 kg/s $\dot{m}_a$ = 0,307 kg/s

Aufgabe 4.2

Ein Massestrom $\dot{m}_A$ = 8 kg/s siedende Ammoniak/Wasser-Flüssigkeit mit einem Ammoniak-Masseanteil von 20 % wird mit $\dot{m}_B$ = 2 kg/s gesättigtem Dampf aus ebenfalls Ammoniak und Wasser bei einem Druck von 0,6 MPa isobar gemischt. Der gesättigte Dampf besitzt einen Ammoniakmasseanteil von 90 %.
Ermitteln Sie rechnerisch und parallel dazu grafisch mit dem h,ξ-Diagramm:

a) den Kältemittelanteil der Mischung ξ_M
b) die spezifische Enthalpie der Mischung h_M !
c) Liegt die Mischung als Flüssigkeit, Dampf oder Nassdampf vor ?
d) Bestimmen Sie die Temperatur der Mischung ϑ_M !

Lösung: a) ξ_M = 0,34 b) h_M = 677 kJ/kg d) ϑ_M = 100 °C

Aufgabe 4.3

In einem Chemiebetrieb fällt gesättigter Wasserdampf bei einem Druck von 0,2 MPa an. Er soll als Heizmedium für eine Wasser/Lithiumbromid-Großwärmepumpe genutzt werden. An die Wärmepumpe soll eine Niedertemperaturheizung mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C angeschlossen werden, wobei das Wasser des Heizungsrücklaufs zunächst zur Kühlung des Absorbers genutzt wird. Hierbei erwärmt es sich bereits auf 35 °C. Zur Wärmeaufnahme im Verdampfer dient Abwasser mit einer Temperatur von 20 °C, das dabei auf 15 °C abgekühlt wird. Die minimalen Temperaturdifferenzen der eingesetzten Wärmeübertrager einschl. Absorber und Austreiber können mit jeweils 5 K angenommen werden (Es darf davon ausgegangen werden, dass reines Wasser den Austreiber verlässt. Druckverluste können vernachlässigt werden.).

a) Welche Temperaturen sind im Kondensator, Verdampfer, Absorber und Austreiber zu realisieren ?
b) Welche Drücke stellen sich im Kondensator und Verdampfer ein ?
c) Ermitteln Sie die Zusammensetzungen ξ_r und ξ_a der Lösungsmasseströme !
d) Berechnen Sie die Verhältnisse:
   - Massestrom der Kältemittel-armen Lösung zu Kondensatormassestrom sowie
   - Massestrom der Kältemittel-reichen Lösung zu Kondensatormassestrom !
e) Welche Temperatur hat die arme Lösung beim Eintritt in den Absorber ?

Lösung: b) $p_K = 0{,}019919$ MPa $p_V = 0{,}0012271$ MPa
c) $\xi_r = 0{,}44$ $\xi_a = 0{,}37$
d) $\dot{m}_a/\dot{m} = 8{,}0$ $\dot{m}_r/\dot{m} = 9{,}0$
e) $\vartheta_{a,Abs} = 53$ °C

Aufgabe 4.4

In den Absorber einer Ammoniak/Wasser-Kälteanlage strömt $\dot{m} = 36$ kg/h gesättigter Kältemittelgemischdampf mit einem Ammoniakmasseanteil von 95 %. Gleichzeitig tritt die kältemittelarme Lösung siedend mit 23 % Ammoniakmasseanteil ein. Durch die Kühlung verlässt die kältemittelreiche Lösung den Absorber als siedende Flüssigkeit mit 20 °C. Der Druck im Absorber beträgt 0,1 MPa.
Ermitteln Sie rechnerisch und parallel mit Hilfe des h,ξ-Diagramms:

a) den Ammoniakmasseanteil der kältemittelreichen Lösung ξ_r ,
b) die Masseströme der kältemittelreichen und kältemittelarmen Lösung $\dot{m}_r$ und $\dot{m}_a$,
c) den abzuführenden Absorptionswärmestrom $\dot{Q}_{Abs}$,
d) die spezifische Absorptionswärme q_{Abs} bezogen auf den Kältemittelmassestrom !

Lösung: a) $\xi_r = 0{,}34$ b) $\dot{m}_r = 0{,}0655$ kg/s $\dot{m}_a = 0{,}0555$ kg/s
c) $\dot{Q}_{Abs} = -24{,}13$ kW $q_{Abs} = -2412{,}73$ kJ/kg

Aufgabe 4.5

In einem Industriebetrieb fällt warmes Abwasser mit einer Temperatur von 40 °C an. Des weiteren kann Dampf aus einem technologischen Prozess ausgekoppelt werden. Geprüft werden soll der Einsatz einer Absorptionswärmepumpe mit dem Arbeitsfluidgemisch Wasser/Lithiumbromid für eine Niedertemperaturheizung, wobei eine Vorlauftemperatur von 45 °C zu realisieren ist. Vorgeschlagen wird eine Variante, bei der das Heizungswasser im Kondensator und im Absorber parallel erwärmt wird, so dass die Absorbertemperatur der Kondensatortemperatur entspricht. Das Abwasser soll den Verdampfer mit einer Temperatur von 30 °C verlassen. Die minimalen Temperaturdifferenzen der eingesetzten Wärmeübertrager einschl. Verdampfer, Kondensator und Austreiber sollen jeweils 5 K betragen (Es darf davon ausgegangen werden, dass reines Wasser den Austreiber verlässt. Druckverluste können vernachlässigt werden.).

a) Bestimmen Sie die theoretisch minimale Temperatur des Austreiber-Heizmediums ϑ_H^{min} für die die Anlage überhaupt funktionsfähig ist !
b) Bei welchem Druck p_H^{min} müsste der als trocken gesättigt vorliegende Wasserdampf aus dem technologischen Prozess für die Heizung des Austreibers ausgekoppelt werden, um den theoretischen Fall zu realisieren ?
c) Berechnen Sie den Kältemittelmasseanteil der kältemittelarmen Lösung ξ_a für den Fall, dass der Massestrom der kältemittelarmen Lösung das Fünffache des Kondensatormassestroms beträgt !

Lösung: a) $\vartheta_H^{min} = 83°C$ b) $p_H^{min} = 0{,}0534$ MPa c) $\xi_a = 0{,}376$

Aufgabe 4.6

In eine gekoppelte Rektifiziersäule einer Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe gelangt siedende kältemittelreiche Lösung mit einem Kältemittelmasseanteil von 30 %. Der Druck in der Säule beträgt 1 MPa. Weiterhin ist bekannt, dass als Kopfprodukt $\dot{m} = 18$ kg/h gesättigter Dampf mit einem Kältemittelmasseanteil von 0,95 austritt und die kältemittelarme Lösung die Säule mit der Austreibertemperatur von 120 °C als siedende Flüssigkeit verlässt. (Der Dephlegmationswärmestrom soll das 1,5-fache des theoretisch minimalen betragen.)

Bestimmen Sie rechnerisch und mit Hilfe des h,ξ-Diagramms:

a) den Kältemittelmasseanteil der kältemittelarmen Lösung ξ_a,

b) die Masseströme der kältemittelarmen Lösung $\dot{m}_a$ und der kältemittelreichen Lösung $\dot{m}_r$,

c) die theoretisch minimale spezifische Dephlegmationswärme q_{Dph}^{min}, bezogen auf den Massestrom des Kopfproduktes,

d) den tatsächlich abzuführenden Dephlegmationswärmestrom $\dot{Q}_{Dph}$,

e) den zuzuführenden Austreiberwärmestrom $\dot{Q}_{Aus}$,

f) die spezifische Austreiberwärme q_{Aus}, bezogen auf den Massestrom des Kopfproduktes !

Lösung: a) $\xi_a = 0{,}22$ b) $\dot{m}_a = 0{,}0406$ kg/s $\dot{m}_r = 0{,}0456$ kg/s

c) $q_{Dph}^{min} = -150$ kJ/kg d) $\dot{Q}_{Dph} = -1{,}125$ kW

e) $\dot{Q}_{Aus} = 12{,}3$ kW f) $q_{Aus} = 2452$ kJ/kg

Aufgabe 4.7

Siedende Flüssigkeit von Ammoniak/Wasser-Nassdampf mit einer Temperatur von 90 °C besitzt einen Ammoniakmasseanteil von 40 %.

Ermitteln Sie mit Hilfe des h,ξ-Diagramms:

a) den Druck p, unter dem der Nassdampf steht

b) den Ammoniakmasseanteil des gesättigten Dampfes ξ''

c) die spezifischen Enthalpien der siedenden Flüssigkeit h' und des gesättigten Dampfes h'' !

Lösung: a) p = 1,25 MPa b) $\xi'' = 0{,}95$ c) $h' = 300$ kJ/kg $h'' = 1820$ kJ/kg

Aufgabe 4.8

Eine Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlage mit innerem Lösungswärmeübertrager soll für folgende Parameter ausgelegt werden: ϑ_K = 40 °C, ϑ_V = -19 °C, ϑ_{Abs} = 30 °C, ϑ_{Aus} = 130 °C. Zu realisieren ist eine Kälteleistung von 20 kW. Von der zu verwendenden gekoppelten Rektifiziersäule ist bekannt, dass sie als Kopfprodukt 99,7 % reines Kältemittel liefert. Die Berechnung kann durchgeführt werden, als würde reines Kältemittel die gekoppelte Rektifiziersäule verlassen. Der Dephlegmationswärmestrom soll das 1,5-fache des theoretisch minimalen betragen. Die Auslegung des im Gegenstrom betriebenen inneren Lösungsmittelwärmeübertragers erfolgt ausgehend von einer minimalen Temperaturdifferenz von 10 K.
Bei der Berechnung können folgende Annahmen getroffen werden:

- Vernachlässigung der Unterkühlung im Kondensator und der Überhitzung im Verdampfer,
- Austritt der kältemittelreichen Lösung aus dem Absorber als siedende Flüssigkeit,
- Austritt der kältemittelarmen Lösung aus dem Austreiber als siedende Flüssigkeit,
- Austritt des Kopfproduktes aus dem Rektifikator als gesättigter Dampf,
- Vernachlässigung der Lösungsmittelpumpenleistung ,
- Vernachlässigung der Druckverluste .

Mit Hilfe des h,ξ-Diagramms und der Kältemitteltafel sind zu ermitteln:

a) p_K, p_V

b) ξ_a, ξ_r

c) $\dot{m}$, $\dot{m}_a$, $\dot{m}_r$

d) h_1, h_2, h_3, h_4, h_{r1}, h_{r2}, h_{r3}, h_{a1}, h_{a2}, h_{a3}

e) q_V, q_K, q_{Abs}, q_{Aus}, q_{Dph} bezogen auf den Verdampfermassestrom

f) $\dot{Q}_K$, $\dot{Q}_{Abs}$, $\dot{Q}_{Aus}$, $\dot{Q}_{Dph}$, $\left|\dot{Q}_L^i\right|$, Wärmeverhältnis ζ_{KM}

g) die theoretisch minimale Austreibertemperatur, ab der die Anlage überhaupt funktionsfähig ist .

Lösung: a) p_K = 1,5554 MPa p_V = 0,1987 MPa b) ξ_a = 0,26 ξ_r = 0,38

c) $\dot{m}$ = 0,019 kg/s $\dot{m}_a$ = 0,0981 kg/s $\dot{m}_r$ = 0,117 kg/s

e) q_V = 1048,36 kJ/kg q_K = –1099,26 kJ/kg q_{Abs} = –1898,68 kJ/kg
q_{Aus} = 2391,5 kJ/kg q_{Dph} = –441,9 kJ/kg

f) $\dot{Q}_K$ = –20,97 kW $\dot{Q}_{Abs}$ = –36,22 kW $\dot{Q}_{Aus}$ = 45,62 kW
$\dot{Q}_{Dph}$ = –8,43 kW $\left|\dot{Q}_L^i\right|$ = 39,24 kW ζ_{KM} = 0,438

g) $\vartheta_{Aus}^{min} = 100°C$

Aufgabe 4.9

In einem Industrieunternehmen fällt gesättigter Wasserabdampf bei einem Druck von 1 bar an. Dieser soll als Heizmedium für den Austreiber einer AmmoniakWasser--Kältemaschine mit innerem Lösungswärmeübertrager verwendet werden. Die minimale Temperaturdifferenz im Austreiber beträgt 5 K. Mit der Kältemaschine soll ein Massestrom 1800 kg/h Kühlsole (c_{ps} = 3,6 kJ/kg K) von - 5 °C auf - 15 °C abgekühlt werden. Die minimale Temperaturdifferenz im Verdampfer sei 5 K. Als Kühlmedium für Kondensator und Absorber steht Abwasser (inkompressibel) mit einer Temperatur von 15 °C zur Verfügung, das mit maximal 22 °C abgeleitet werden darf. Das Abwasser wird parallel durch den Absorber und durch den Kondensator geführt und anschließend wieder vereinigt. Für die Auslegung des Kondensators und des Absorbers wurden minimale Temperaturdifferenzen von 4 K zugrunde gelegt. Von der zu verwendenden gekoppelten Rektifiziersäule ist bekannt, dass sie ein Kopfprodukt mit einem Kältemittelanteil von 99,8 % liefert und der Dephlegmationswärmestrom das 1,4-fache des theoretisch minimalen beträgt. In der Berechnung kann angenommen werden, dass reines Kältemittel die gekoppelte Rektifiziersäule verlässt. Für den Lösungswärmeübertrager wird eine minimale Temperaturdifferenz von 5 K angenommen.

Bei der Berechnung können folgende Annahmen getroffen werden:

- Vernachlässigung der Unterkühlung im Kondensator und der Überhitzung im Verdampfer
- Austritt der kältemittelreichen Lösung aus dem Absorber als siedende Flüssigkeit
- Austritt der kältemittelarmen Lösung aus dem Austreiber als siedende Flüssigkeit
- Austritt des Kopfproduktes aus dem Rektifikator als gesättigter Dampf
- Vernachlässigung der Lösungsmittelpumpenleistung
- Vernachlässigung der Druckverluste .

a) Ermitteln Sie den Kondensatordruck und den Verdampferdruck !

b) Berechnen Sie den Verdampfermassestrom sowie die Kältemittelmasseanteile und Masseströme der kältemittelreichen und -armen Lösung !

c) Welcher Massestrom Abwasser muss durch den Kondensator und welcher durch den Absorber geleitet werden ?

d) Wie groß sind die Wärmeströme im Dephlegmator und der im Lösungswärmeübertrager ?

e) Ermitteln Sie den Massestrom des gesättigten Wasserabdampfes für die Heizung des Austreibers, wobei anzunehmen ist, dass der Abdampf vollständig kondensiert ?

f) Berechnen Sie die technische Arbeitsleistung der Lösungsmittelpumpe für die Näherung der Dichteberechnung für siedendes Wasser bei Absorbertemperatur, wobei ihr isentroper Wirkungsgrad 75 % beträgt !

g) Bestimmen Sie die theoretisch minimale Austreibertemperatur, ab der die Anlage funktionsfähig ist !

Lösung: a) p_K = 1,0345 MPa p_V = 0,190 MPa

b) ξ_r = 0,41 ξ_a = 0,33

$\dot{m}$ = 0,0161 kg/s $\dot{m}_a$ = 0,1186 kg/s $\dot{m}_r$ = 0,1348 kg/s

c) $\dot{m}_w^K$ = 0,64 kg/s $\dot{m}_w^{Abs}$ = 0,907 kg/s

d) $\dot{Q}_{Dph}$ = –4,31 kW $\left|\dot{Q}_L^i\right|$ = 35,59 kW

e) $\dot{m}_D^{Aus}$ = 0,014 kg/s f) P_{tL} = 0,152 kW g) $\vartheta_{Aus}^{min} = 80$ °C

5 Kaltgasmaschinen

Aufgabe 5.1

Eine Kaltgasmaschine mit innerem Wärmeübertrager zur Regeneration soll den unter einem Überdruck von 2 kPa stehenden Kühlraum durch Einblasen von Luft auf der konstanten Temperatur ϑ_0 = - 30 °C halten. Die Kälteleistung beträgt 8 kW. Der Kühlraum befindet sich in einer Umgebung mit der Temperatur von 25 °C und dem Druck 1 bar. Der innere Wärmeübertrager wurde für eine minimale Temperaturdifferenz von 8 K im Gegenstrombetrieb ausgelegt. Der zur Verfügung stehende Kompressor besitzt einen isentropen Wirkungsgrad von 0,85 und der der nutzbaren Entspannungsmaschine beträgt 0,8. Die Eintrittstemperatur in den Verdichter soll der Umgebungstemperatur entsprechen. Die Luftein- und -austritte im Kühlraum wurden für einen umlaufenden Luftmassestrom von 900 kg/h konzipiert (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern mit guter Näherung als ideales Gas angenommen werden, wobei cpm als Mittelwert zwischen der Kühlraumtemperatur und der Umgebungstemperatur berechnet wird. Die Druckverluste in den Rohrleitungen und im inneren Wärmeübertrager sind zu vernachlässigen.).

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage !
b) Stellen Sie die Zustandsänderungen der umlaufenden Luft qualitativ im T,s-Diagramm dar !
c) Auf welchen Druck muss der Kompressor die Luft verdichten ?
d) Ermitteln Sie die technischen Arbeitsleistungen des Verdichters und der Entspannungsmaschine !
e) Welcher Wärmestrom ist an die Umgebung abzuführen, und wie groß ist der Wärmestrom im inneren Wärmeübertrager ?
f) Ermitteln Sie die Leistungszahl der Kaltgasmaschine !

Lösung: c) p_{qab} = 2,211 bar d) P_{tE} = –10,00 kW P_{tV} = 21,80 kW
e) $\dot{Q}_{ab}$ = –19,79 kW $\left|\dot{Q}^{i}_{Reg}\right|$ = 13,78 kW f) ε = 0,678

Aufgabe 5.2

Der Innenraum eines Kühlwagens soll mit einer Kaltgasmaschine ohne inneren Wärmeübertrager durch Einblasen von Kaltluft gekühlt werden, wobei der Verdichter Luft aus dem Innenraum ansaugt. Die Kühlung der umlaufenden Luft nach dem Kompressor erfolgt mit Umgebungsluft. Die minimale Temperaturdifferenz des hierfür einzusetzenden Wärmeübertragers beträgt 5 K. Die Luft im Kühlraum steht unter Umgebungsdruck und soll auf einer konstanten Temperatur $\vartheta_0 = 5\ °C$ gehalten werden. Die Luft darf mit minimal – 3 °C in das Wageninnere gelangen um die zu transportierenden Blumen nicht zu schädigen. Die zu realisierende Kälteleistung beträgt 5 kW. Die Umgebung des Kühlwagens besitzt eine Temperatur $\vartheta_U = 30\ °C$ und einen Druck $p_U = 0{,}1$ MPa. Der isentropen Wirkungsgrad des Verdichters beträgt 0,87 und der der Entspannungsmaschine 0,85 (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern mit guter Näherung als ideales Gas angenommen werden. Druckverluste können vernachlässigt werden.).

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage !
b) Stellen Sie die Zustandsänderungen der umlaufenden Luft qualitativ im T,s-Diagramm dar !
c) Berechnen Sie den umlaufenden Luftmassestrom !
d) Auf welchen Druck muss der Kompressor die Luft verdichten ?
e) Welche Temperatur besitzt die Luft am Kompressoraustritt ?
f) Ermitteln Sie die technischen Arbeitsleistungen des Verdichters und der Entspannungsmaschine !
g) Welcher Wärmestrom ist an die Umgebung abzuführen ?
h) Ermitteln Sie die Leistungszahl der Kaltgasmaschine !

Lösung: c) $\dot{m}_L = 0{,}622$ kg/s d) $p_{qab} = 173{,}08$ kPa e) $T_2 = 332{,}40$ K
f) $P_{tV} = 33{,}89$ kW $P_{tE} = -23{,}75$ kW g) $\dot{Q}_{ab} = -15{,}16$ kW
h) $\varepsilon = 0{,}492$

Aufgabe 5.3

Der Fahrgastraum eines Reisezugwagens wird mit einer Kaltgasmaschine ohne inneren Wärmeübertrager durch Einblasen von Kaltluft gekühlt, wobei der Verdichter aus hygenischen Gründen Außenluft ansaugt. Die Kühlung der umlaufenden Luft nach dem Kompressor erfolgt mit Umgebungsluft. Die minimale Temperaturdifferenz des hierfür einzusetzenden Wärmeübertragers beträgt 5 K. Die Luft im Fahrgastraum steht unter Umgebungsdruck und soll auf einer konstanten Temperatur ϑ_0 = 25 °C gehalten werden. Die Luft darf mit minimal 15 °C in das Wageninnere gelangen um Behaglichkeit zu garantieren. Die zu realisierende Kälteleistung beträgt 5 kW. Die Umgebung des Kühlwagens besitzt eine Temperatur ϑ_u = 35 °C und einen Druck p_u = 0,1 MPa. Der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters beträgt 0,87 und der der Entspannungsmaschine 0,80 (Die Luft darf bei den vorliegenden Parametern mit guter Näherung als ideales Gas angenommen werden. Druckverluste können vernachlässigt werden.).

a) Zeichnen Sie das Schaltbild der Anlage !
b) Stellen Sie die Zustandsänderungen der umlaufenden Luft qualitativ im T,s-Diagramm dar !
c) Berechnen Sie den umlaufenden Luftmassestrom !
d) Auf welchen Druck muss der Kompressor die Luft verdichten ?
e) Welche Temperatur besitzt die Luft am Kompressoraustritt ?
f) Ermitteln Sie die technischen Arbeitsleistungen des Verdichters und der Entspannungsmaschine !
g) Welcher Wärmestrom ist an die Umgebung abzuführen ?
h) Ermitteln Sie die Leistungszahl der Kaltgasmaschine !

Lösung: c) $\dot{m}_L$ = 0,498 kg/s d) p_{qab} = 144,37 kPa e) T_2 = 347,41 K
f) P_{tV} = 19,63 kW P_{tE} = –12,5 kW g) $\dot{Q}_{ab}$ = –17,13 kW
h) ε = 0,701

6 Gasverflüssigung

Aufgabe 6.1

Eine Anlage, die nach dem einfachen *Linde*-Prozess arbeitet, soll 10 kg/h flüssige Luft bei einem Druck von 0,1 MPa liefern. Die Luft wird mit einer Temperatur von 15 °C eingespeist. Der maximale Druck der Anlage beträgt aus Sicherheitsgründen 200 bar. Von der einzusetzenden mehrstufigen Verdichtung ist bekannt, dass sie einen Gesamtwirkungsgrad von 0,6, bezogen auf die isotherme Verdichtung von idealem Gas, besitzt.

a) Entwerfen Sie das Schaltbild der Anlage !
b) Zeichnen Sie den Prozess qualitativ in einem T,s-Diagramm !

Mit Hilfe des T,s-Ablesediagramms sind zu ermitteln :

c) die Verflüssigungsrate,
d) der insgesamt zu verdichtende Luftmassestrom,
e) die Verdichterleistung bei Annahme einer isothermen Verdichtung von idealem Gas,
f) die tatsächlich aufzubringende Verdichterleistung,
g) die theoretisch minimal mögliche Verflüssigungsarbeitsleistung,
h) der Gütegrad der verwendeten Anlage !
i) Ermitteln Sie die Temperatur des Eintrittszustands in das Drosselventil !

Lösung: c) $y = 0{,}0918$ d) $\dot{m}_{HD1} = 0{,}0303$ kg/s e) $P_{tV}^{ig} = 13{,}27$kW

f) $P_{tV} = 22{,}12$ kW g) $P_{Fl}^{min} = 1{,}92$ kW h) $\nu_{Fl} = 0{,}087$

i) $T_{HD2} = 169$ K

Aufgabe 6.2

Mit einer nach dem einfachen *Linde*-Prozess arbeitenden Anlage wird Luft verflüssigt. Die Luft wird mit einer Temperatur von 20 °C eingespeist. Die flüssige Luft wird mit einem Druck von 1 bar entnommen. Der mehrstufige Verdichter mit Zwischenkühlung erreicht 18 MPa und kann 800 m^3/h eintretende Luft verdichten. Sein Gesamtwirkungsgrad, bezogen auf die isotherme Verdichtung von idealem Gas, beträgt 0,65 (Die Luft am Verdichtereintritt kann mit guter Näherung als ideales Gas angenommen werden.).

Mit Hilfe des T,s-Ablesediagramms sind zu ermitteln

a) Temperatur der flüssigen Luft,
b) die Verflüssigungsrate,
c) der als siedende Flüssigkeit zu entnehmende Luftmassestrom,
d) die aufzubringende Verdichterleistung,
e) der Wärmestrom im inneren Wärmeübertrager,
f) der Gütegrad der Anlage !
g) Ermitteln Sie die Temperatur des Eintrittszustands in das Drosselventil !

Lösung: a) $T_{ab} = 79$ K b) $y = 0{,}086$ c) $\dot{m}_{ab} = 0{,}0227$ kg/s

d) $P_{tV} = 177{,}54$ kW e) $\left|\dot{Q}_{Reg}^{i}\right| = 52{,}11$ kW f) $\nu_{Fl} = 0{,}091$

g) $T_{HD2} = 170$ K

7 Thermoelektrische Kühlung

Aufgabe 7.1

Die Kühlung einer transportablen Kühlbox wird mit 240 *Peltier*-Elementen realisiert. Deren positive Schenkel bestehen aus dem Halbleiterwerkstoff 38Sb/62Te mit einem Durchmesser von 4 mm, während die negativen aus 63Pb/37Te mit einem Durchmesser von 6 mm gefertigt sind. Ihre Schenkellängen betragen je 1 cm. In der Kühlbox soll eine Temperatur von 5 °C erreicht werden. Die Umgebungstemperatur beträgt 20 °C. Die Temperaturdifferenzen des Kühlbox-Innenraums und der Umgebung zu den *Peltier*-Elementen können mit je 3 K angenommen werden. Der fließende elektrische Strom darf 10 A nicht überschreiten.

a) Welcher Wärmestrom kann mit den *Peltier*-Elementen der Kühlbox entzogen werden ?
b) Wie hoch ist die dabei benötigte elektrische Anschlussleistung ?
c) Ermitteln Sie die Leistungszahl der *Peltier*-Kühlung !
d) Welche theoretisch minimale Temperatur könnte in der Kühlbox erreicht werden (Hinweis: Verwenden Sie 10 °C als mittlere Temperatur) ?

Lösung: a) $\dot{Q}_{zu} = 19{,}31$ W b) $P_{el} = 133{,}90$ W

c) $\varepsilon_{KM} = 0{,}144$ d) $\vartheta_0^{min} = -0{,}80$ °C

Aufgabe 7.2

Die Kühlleistung einer Laborkühlbox beträgt 30 W und soll mit *Peltier*-Elementen realisiert werden. Deren positive Schenkel bestehen aus 58,28Sb/41,72Zn und haben einem Durchmesser von 2 mm. Die negativen Schenkel bestehen aus 63Pb/37Te mit einem Durchmesser von 4 mm. Ihre Schenkellängen betragen je 1,5 cm. In der Laborkühlbox ist eine Temperatur von 10 °C gefordert. Die Temperatur im klimatisierten Labor beträgt 20 °C. Die Temperaturdifferenzen des Kühlbox-Innenraums und der Labors zu den *Peltier*-Elementen sollen jeweils mit 3 K angenommen werden. Der fließende elektrische Strom soll 10 A nicht überschreiten.
Prüfen Sie, ob die Kühlung mit den geplanten *Peltier*-Elementen realisiert werden kann, und begründen Sie Ihre Entscheidung !

Lösung: $\dot{Q}_p = 0{,}815$ W $\dot{Q}_{v,\varepsilon} = 5{,}534$ W $\dot{Q}_{v,\lambda} = 0{,}065$ W

Realisierung nicht möglich, da $\dot{Q}_p < (\dot{Q}_{v,\varepsilon} + \dot{Q}_{v,\lambda})$