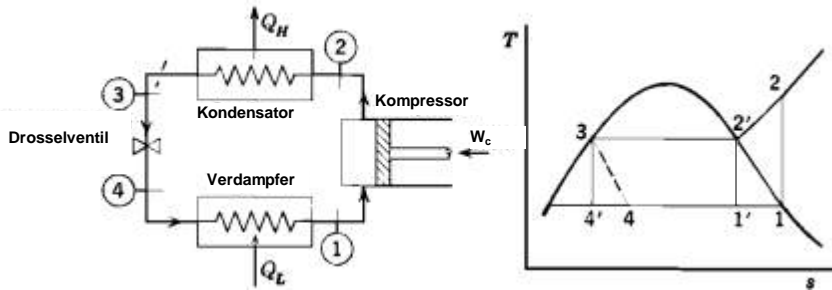


**Ü 12.1 Dampf-Kompressions-Kühlkreislauf**

Nachrechnung des skizzierten idealisierten Kühlkreislaufs



**geg.:**

Kühlmittel Dichlordifluormethan (Freon-12)

Temperatur des Kühlmittels im Verdampfer:

$$T_1 = -20^\circ\text{C}$$

Temperatur des Kühlmittels im Kondensator:

$$T_3 = +40^\circ\text{C}$$

Massenstrom:

$$\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s}$$

**Stoffwerte für Freon-12 im Naßdampfgebiet:**

$T_S$ [°C]	$p_S$ [MPa]	$v'$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v''$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h'$ [kJ/kg]	$h''$ [kJ/kg]	$s'$ [kJ/kg·K]	$s''$ [kJ/kg·K]
-20	0.1509	0.000685	0.108847	17.8	178.61	0.073	0.7082
+40	0.9607	0.000798	0.018171	74.527	203.051	0.2716	0.682

**Stoffwerte für Freon-12 im überhitzten Zustand:**

$T$ [°C]	$p$ [MPa]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]
+50	0.9 MPa	0.020912	211.765	0.7131
+60	0.9 MPa	0.022012	219.212	0.7358
+50	1.0 MPa	0.018366	210.162	0.7021
+60	1.0 MPa	0.019410	217.810	0.7254

**ges:**

Kühlleistung  $Q_L$  und Leistungsziffer  $\varepsilon$

**1-2** Kompressor: Isentrope Verdichtung von  $p_1$  auf  $p_2$

$$p_1 = p_4 = p(T_S = -20^\circ\text{C}) = 0.1509 \text{ MPa}$$

$$p_2 = p_3 = p(T_S = +40^\circ\text{C}) = 0.9607 \text{ MPa}$$

$$h_1 = h_1'' = h''(T_S = -20^\circ\text{C}) = 178.61 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = s_1'' = s_2 = (T_S = -20^\circ\text{C}) = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

spezifische Kompressorarbeit

$$w_{\text{Kompressor}} = h_2 - h_1$$

### Bestimmung von $T_2$ und $h_2$ durch zweifache lineare Interpolation

#### Schritt 1:

Berechnung von  $h$  und  $s$  für  $p = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}$  aus  $h(T=+50^\circ\text{C})$  und  $h(T=+60^\circ\text{C})$  im überhitzten Zustand

spezifische Enthalpie  $h$

$$h_a = h(T_a = 50^\circ\text{C}, p_a = 0.9 \text{ MPa}) = 211.765 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_b = h(T_b = 50^\circ\text{C}, p_b = 1.0 \text{ MPa}) = 210.162 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = h_a + \frac{h_b - h_a}{p_b - p_a} \cdot (p_2 - p_a)$$

$$h(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 211.765 + \frac{210.162 - 211.765}{1.0 - 0.9} \cdot (0.9607 - 0.9)$$

$$\boxed{h(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 210.792 \text{ [kJ/kg]}}$$

$$h_c = h(T_c = 60^\circ\text{C}, p_c = 0.9 \text{ MPa}) = 219.212 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_d = h(T_d = 60^\circ\text{C}, p_d = 1.0 \text{ MPa}) = 217.810 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = h_c + \frac{h_d - h_c}{p_d - p_c} \cdot (p_2 - p_c)$$

$$h(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 219.212 + \frac{217.810 - 219.212}{1.0 - 0.9} \cdot (0.9607 - 0.9)$$

$$\boxed{h(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 218.361 \text{ [kJ/kg]}}$$

spezifische Entropie  $s$

$$s_a = s(T_a = 50^\circ\text{C}, p_a = 0.9 \text{ MPa}) = 0.7131 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$s_b = s(T_b = 50^\circ\text{C}, p_b = 1.0 \text{ MPa}) = 0.7021 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$s(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = s_a + \frac{s_b - s_a}{p_b - p_a} \cdot (p_2 - p_a)$$

$$s(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7131 + \frac{0.7021 - 0.7131}{1.0 - 0.9} \cdot (0.9607 - 0.9)$$

$$\boxed{s(T = 50^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7064 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}}$$

$$s_c = s(T_c = 60^\circ\text{C}, p_c = 0.9 \text{ MPa}) = 0.7358 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$s_d = s(T_d = 60^\circ\text{C}, p_d = 1.0 \text{ MPa}) = 0.7254 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$s(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = s_c + \frac{s_d - s_c}{p_d - p_c} \cdot (p_2 - p_c)$$

$$s(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7358 + \frac{0.7254 - 0.7358}{1.0 - 0.9} \cdot (0.9607 - 0.9)$$

$$\boxed{s(T = 60^\circ\text{C}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7295 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}}$$

**Schritt 2:**Berechnung von  $T_2$  und  $h_2$  für  $s = s_2 = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ Temperatur  $T_2$ 

$$s_a = s(T_a = 50^\circ\text{C}, p = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7064 [\text{kJ/kg}\cdot\text{K}]$$

$$s_b = s(T_b = 60^\circ\text{C}, p = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 0.7295 [\text{kJ/kg}\cdot\text{K}]$$

$$T_2 = T(s_2 = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = T_a + \frac{T_b - T_a}{s_b - s_a} \cdot (s_2 - s_a)$$

$$T_2 = T(s_2 = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 50 + \frac{60 - 50}{0.7295 - 0.7064} \cdot (0.7082 - 0.7064)$$

$$\boxed{T_2 = 50.8 [^\circ\text{C}]}$$

spezifische Enthalpie  $h_2$ 

$$h_a = h(T_a = 50^\circ\text{C}, p = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 210.792 [\text{kJ/kg}]$$

$$h_b = h(T_b = 60^\circ\text{C}, p = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 218.361 [\text{kJ/kg}]$$

$$h_2 = h(s_2 = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = h_a + \frac{h_b - h_a}{T_b - T_a} \cdot (T_2 - T_a)$$

$$h_2 = h(s_2 = 0.7082 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 210.792 + \frac{218.361 - 210.792}{60 - 50} \cdot (50.8 - 50)$$

$$\boxed{h_2 = 211.398 [\text{kJ/kg}]}$$

spezifische Kompressorarbeit

$$w_{\text{Kompressor}} = h_2 - h_1 = 211.398 - 178.61 = 32.788 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**3-4:** Drosselventil: Isenthalpe Druckminderung

$$h_4 = h_3 = h_3'(T_3 = +40^\circ\text{C}, p_3 = p_2 = 0.9607 \text{ MPa}) = 74.527 \text{ kJ/kg}$$

**4-1:** Isobare Verdampfung

$$q_L = h_1 - h_4 = 178.61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 74.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 104.08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Leistungsziffer  $\varepsilon$ 

$$\varepsilon = \frac{\text{spez. abgeführte Wärme}}{\text{spez. Kompressorarbeit}} = \frac{q_L}{w_c} = \frac{104.08}{32.788} \quad \boxed{\varepsilon = 3.17}$$

Maximale Kühlleistung  $Q_L$ 

$$Q_L = q_L \cdot \dot{m} = 104.08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0.03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \boxed{Q_L = 3.12 \text{ kW}}$$

## Ü 12.2 Zweistufige Kompressions-Kälteanlage

Zweistufige Kompressions-Kälteanlage, die mit dem Kältemittel Ammoniak betrieben wird. Beide Kreisläufe sind voneinander getrennt und lediglich über einen Wärmetauscher miteinander gekoppelt.

**Kreislauf I** nimmt Wärme im Verdampfer bei einer Temperatur des Kältemittels von  $-35^\circ\text{C}$  aus dem Kühlraum, dessen Temperatur  $-25^\circ\text{C}$  beträgt auf und gibt Wärme bei einem Kältemitteldruck von 5 bar über einen Wärmetauscher (Kondensator von Kreislauf I) an den Kreislauf II ab.

**Kreislauf II** nimmt Wärme bei einem Kältemitteldruck von 4 bar im Wärmetauscher (Verdampfer von Kreislauf II) auf. Im Kondensator wird Wärme bei einem Kältemitteldruck von 18 bar an die Umgebung abgegeben.

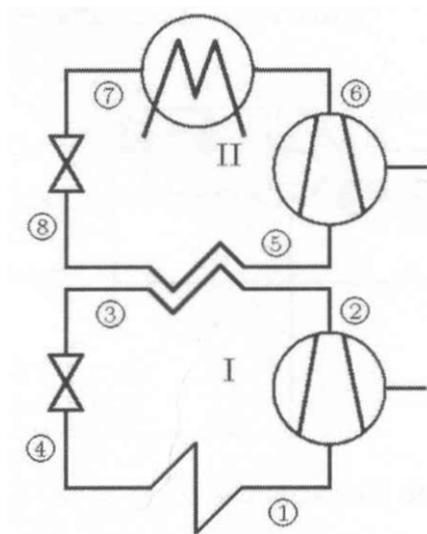
Die maximale Umgebungstemperatur beträgt  $35^\circ\text{C}$  und die geforderte Kälteleistung beträgt  $Q_K = 80 [\text{kW}]$ .

### Annahmen

Ideale Verdichter

Beide Verdichter arbeiten verlustfrei

Vor der Kompression befindet sich das Kältemittel im Sattdampfzustand, die Kondensation erfolgt in den Siedzustand

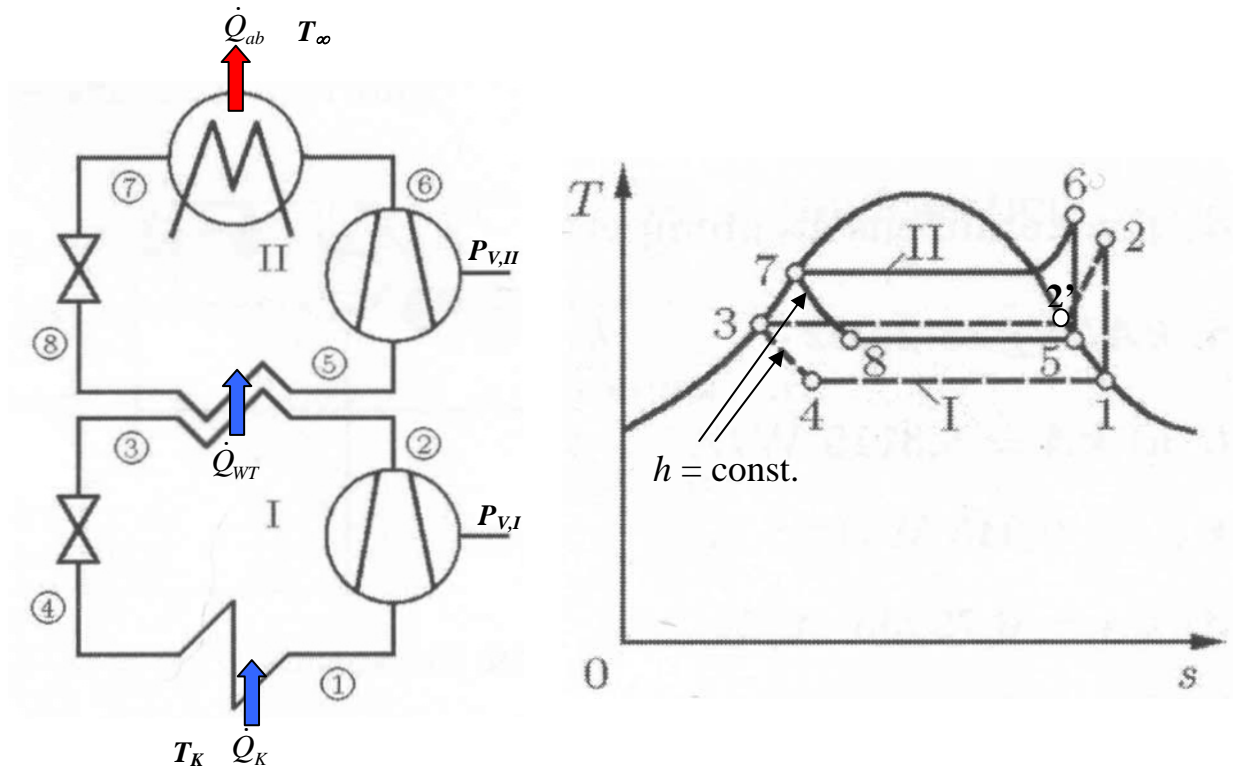


geg.:

Die spezifischen Enthalpien von Ammoniak im überhitzten Zustand betragen  $h_2 = 1947.9 \text{ kJ/kg}$  und  $h_6 = 1979.7 \text{ kJ/kg}$

ges.:

1. Zustandspunkte 1-8  $(p, T, x, h)$ , außer  $T_2$  und  $T_6$
2. Mengenströme des Kältemittels in beiden Kreisläufen
3. Die im Wärmetauscher übertragene Wärmeleistung
4. Wärmeleistungsabgabe an die Umgebung
5. Antriebsleistung der beiden Verdichter
6. Leistungszahl der Gesamtanlage
7. Leistungszahl eines reversiblen Carnot-Prozesses, der zwischen  $T_0 = -25^\circ\text{C}$  und  $T = +35^\circ\text{C}$  arbeitet



1. Zustandspunkte 1-8  
siehe Tab. 14.6: Sättigungsdampf tabel Ammoniak (Temperatur tabel)

Pkt.	$p$ [bar]	$T$ [°C]	$x$ [-]	$h$ [kJ/kg]
1	0.9312	-35	1	1415.0
2	5	-	-	1947.9
3	5	4.09	0	218.7
4	0.9312	-35		218.7
5	4	-1.97	1	1458.6
6	18	-	-	1979.7
7	18	45.3	0	412.2
8	4	-1.97		412.2

(5: Angabe, 0.9312: direkt aus Dampf tabel abgelesen, -1.97: interpoliert aus Dampf tabel)

Temperaturinterpolation

$$T_x = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} \cdot (p_x - p_1)$$

Enthalpieinterpolation

$$h_x = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{p_2 - p_1} \cdot (p_x - p_1)$$

2a. Massenstrom  $\dot{m}_I$

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_I \cdot (h_1 - h_4) \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_I = \frac{\dot{Q}_K}{h_1 - h_4} = \frac{80 \cdot 10^3}{1415 \cdot 10^3 - 218.7 \cdot 10^3} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{m}_I = 0.067 \text{ [kg/s]}}$$

3. Die im Wärmetauscher übertragene Wärmeleistung

$$\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_I \cdot (h_2 - h_3) \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_{WT} = 0.067 \cdot (1947.9 - 218.7) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{Q}_{WT} = 115.85 \text{ [kW]}}$$

2b. Massenstrom  $\dot{m}_{II}$

$$\dot{Q}_{WT} = \dot{m}_I \cdot (h_2 - h_3) = \dot{m}_{II} \cdot (h_5 - h_8) \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_{II} = \frac{\dot{Q}_{WT}}{h_5 - h_8}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{m}_{II} = \frac{115.85}{1458.6 - 412.2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{m}_{II} = 0.111 \text{ [kg/s]}}$$

4. Wärmeabgabe an die Umgebung

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m}_{II} \cdot (h_6 - h_7) \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_{ab} = 0.111 \cdot (1979.7 - 412.2) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{Q}_{ab} = 174 \text{ [kW]}}$$

5. Antriebsleistung der Verdichters  $P_{V,I}, P_{V,II}$

$$P_{V,I} = \dot{m}_I \cdot (h_2 - h_1) \quad \Rightarrow \quad P_{V,I} = 0.067 \cdot (1947.9 - 1415) \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_{V,I} = 35.5 \text{ [kW]}}$$

$$P_{V,II} = \dot{m}_{II} \cdot (h_6 - h_5) \quad \Rightarrow \quad P_{V,II} = 0.111 \cdot (1979.7 - 1458.6) \Rightarrow \quad \boxed{P_{V,II} = 57.8 \text{ [kW]}}$$

6. Leistungszahl der Gesamtanlage

$$\varepsilon = \frac{Q_K}{W} = \frac{\dot{Q}_K}{P_{ges}} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{80}{35.5 + 57.8} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon = 0.96}$$

7. Leistungszahl eines reversiblen Carnot-Prozesses, der zwischen  $T_0 = -25^\circ\text{C}$  und  $T = +35^\circ\text{C}$  arbeitet

$$\varepsilon_{Carnot} = \frac{Q_0}{W} = \frac{T_0}{T - T_0} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{248.15}{308.15 - 248.15} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon_{Carnot} = 4.136}$$