

75 Berechnung im lg p,h-Diagramm

75.1 Einstufige Kälteanlage mit offenem Kältemittelverdichter

Beispiel

Gegeben:

Verflüssigungstemperatur	+35 °C
Unterkühlungstemperatur vor dem Expansionsventil	+33 °C
Verdampfungstemperatur	-30 °C
Temperatur am Verdampferaustritt	-20 °C
Verdampfungsleistung	5 815 W
Liefergrad nach DKV Arbeitsblatt 3-01	0,60
mechanischer Wirkungsgrad	0,80
indizierter Gütegrad	0,69
Kältemittel	R-290

Gesucht:

- Kältezahl des Carnot-Prozesses!
- Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses!
- Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung des flüssigen R-290 durch Kühlmittel!
- Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses mit innerem Wärmeaustausch und zusätzlicher Unterkühlung von 5 K!
- Kältezahl des indizierten Vergleichsprozesses!
- Kältemittelmassenstrom!
- Leistungsbedarfs des Kältemittelverdichters mit indizierter Verdichtung!
- Effektive Verdichterleistung (Direktantrieb)!
- Erforderlicher Hubvolumenstrom des Kältemittelverdichters!
- Erforderliches geometrisches Hubvolumen des Kältemittelverdichters ($n = 1450 \text{ min}^{-1}$)!
- Gütegrad!
- Verflüssigungsleistung!

Lösung:

Die Berechnungen erfolgen mit der Dampftafel für R-290 und dem lg p,h-Diagramm.

- a) Kältezahl des Carnot-Vergleichsprozesses

$$\varepsilon_c = \frac{T_o}{(T_c - T_o)} = \frac{243}{(308 - 243)} = 3,74$$

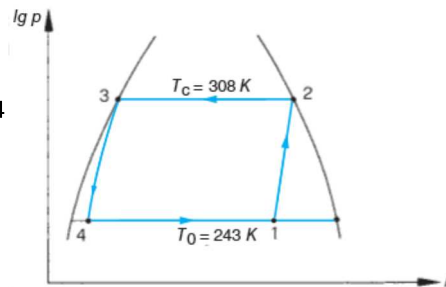


Abb. 75.1: Carnot-Vergleichsprozess

b) Kältegrad des isentropen Vergleichsprozesses

$$\begin{aligned}\varepsilon_{is} &= \frac{q_{ON}}{w_{is}} = \frac{(h_1' - h_4')}{(h_2'' - h_1')} \\ &= \frac{(563,05 - 298,50)}{(663,25 - 563,05)} = 2,64\end{aligned}$$

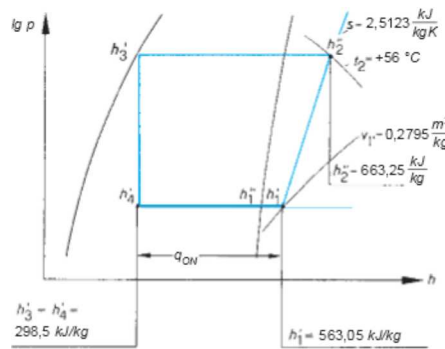


Abb. 75.2: Isentroper Vergleichsprozess

c) Kältegrad des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung des flüssigen R-290 durch Kühlmittel

$$\begin{aligned}\varepsilon_{isu} &= \frac{(h_1' - h_4')}{(h_2'' - h_1')} \\ &= \frac{(563,05 - 292,50)}{(663,25 - 563,05)} = 2,70\end{aligned}$$

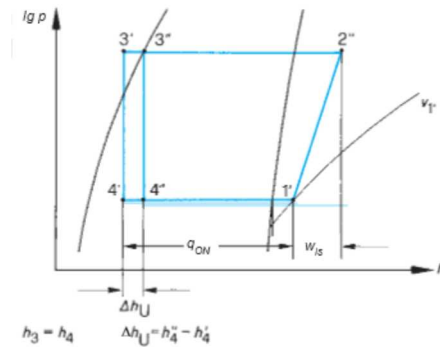


Abb. 75.3: Isentroper Vergleichsprozess mit Unterkühlung des flüssigen R-290 durch Kühlmittel

d) Kältezahl des isentropen Vergleichsprozesses mit Unterkühlung und einem Wärmeübertrager

$$\Delta h_{\bar{u}} = \Delta h_u = (h_4' - h_4)$$

$$= 292,50 - 277,60 = 14,90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_1' + \Delta h_u = 563,05 + 14,90$$

$$= 577,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\varepsilon_{is\bar{u}} = \frac{q_{ON}}{w_{is\bar{u}}} = \frac{(h_1' - h_4)}{(h_2' - h_1)}$$

$$= \frac{(563,05 - 277,60)}{(682,70 - 577,95)} = 2,73$$

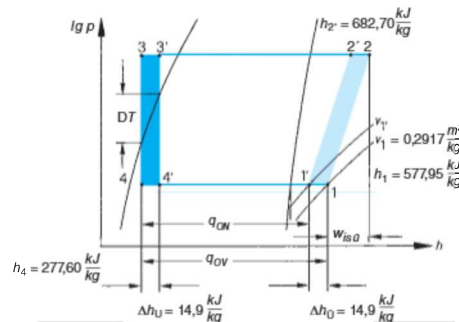


Abb. 75.4: Isentroper Vergleichsprozess mit Unterkühlung und Wärmeübertrager

e) Indizierter Kältegrad

$$w_i = \frac{w_{is}}{\eta_i} = \frac{(h_2' - h_1)}{\eta_i}$$

$$= \frac{(682,70 - 577,95)}{0,69} = 151,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + w_i = 577,95 + 151,81$$

$$= 729,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\varepsilon_i = \frac{q_{ON}}{w_i} = \frac{(h_1' - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

$$= \frac{(563,05 - 277,60)}{(729,76 - 577,95)} = 1,88$$

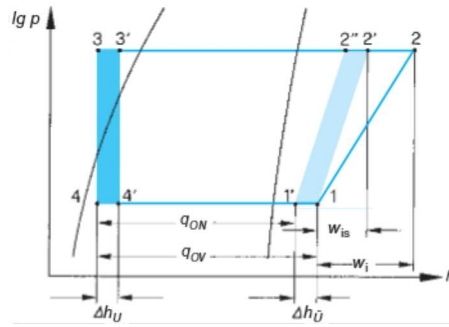


Abb. 75.5: Indizierter Kältegrad

f) Kältemittelmassenstrom

$$h_1' = 563,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; h_3 = 277,60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ bf}$$

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{Q}_o}{(h_1' - h_3)} = \frac{5,815 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{\left(563,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 277,60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 0,0204 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

g) Leistungsbedarf des offenen Kältemittelverdichters mit indizierter Verdichtung

$$h_2' = 682,70 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ und } h_1 = 577,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_i = \frac{\dot{m}_R \cdot (h_2' - h_1)}{\eta_i} = \frac{0,0204 \cdot (682,70 - 577,95)}{0,69} = 3,097 \text{ kW}$$

h) Effektive Antriebsleistung an der Welle

$$P_e = \frac{\dot{m}_R \cdot (h_2' - h_1)}{\eta_e} = \frac{0,0204 \cdot (682,70 - 577,95)}{0,69 \cdot 0,80} = 3,89 \text{ kW}$$

i) Erforderlicher Hubvolumenstrom des Kältemittelverdichters

$$\dot{V}_{HUB} = \frac{\dot{m}_R \cdot v_1}{\lambda} = \frac{0,0204 \cdot 0,2917}{0,60} = 0,0099 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

j) Erforderliches Hubvolumen des Kältemittelverdichters

$$V = \frac{\dot{V}_{HUB} \cdot 60}{n} = \frac{0,0099 \cdot 60}{1450} = 0,00041 \text{ m}^3 \cong 410,0 \text{ cm}^3$$

K) Gütegrad

$$\eta_G = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c} = \frac{1,88}{3,74} = 0,5027$$

l) Verflüssigungsleistung

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_{3'})$$

$$h_2 = 729,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{3'} = 292,50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_R = 0,0204 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_c = 0,0204 \cdot (729,76 - 292,50) = 8,92 \text{ kW}$$

75.2 Einstufige Kälteanlage mit Motorverdichter

Bei hermetischen und halbhermetischen Kältemittelverdichtern ist der Elektromotor mit dem Kältemittelverdichter in einem gemeinsamen Gehäuse. Der Motor kann deshalb seine Verlustwärmeenergie – ohne dass hohe Wicklungstemperaturen auftreten würden – nicht an die Umgebung abgeben.

Merke

Ab einer bestimmten Antriebsleistung muss der Motor mit kaltem Saugdampf gekühlt werden.

Die Berechnung erfolgt mit den bekannten Gleichungen, jedoch ist zu beachten, dass:

$$P_i = \dot{m}_R \cdot (h_2 - h_1) \text{ in kW}$$

Es sind also immer die spez. Enthalpie h_1 und h_2 einzusetzen.

Die an das Kältemittel abzugebende Wärmeenergie des Motors führt zu der Beziehung:

$$\dot{Q}_{MOTOR} = P_{MOTOR-AUS} \cdot (1 - \eta_{el}) = \dot{m}_R \cdot (h_1 - h_{1'}) \text{ in kW}$$

η_{el} kann mit 0,8 bis 0,85 angenommen werden. Genauere Daten sind beim Hersteller anzufragen!

Die Temperaturdifferenz des Kältemittels durch den Elektromotor liegt in folgenden Grenzen:

Normalfall: $(T_1 - T_{1'})$ zwischen 10 K und 30 K.

Kapseln und bei sehr tiefen Verdampfungstemperaturen:

$(T_1 - T_{1'})$ zwischen 30 K und 70 K.

Bei zu großer Aufheizung (geringer Kältemittelmassenstrom) kann wegen der zu hoch werdenden Wicklungstemperatur die Saugdampfkühlung nicht angewendet werden (fremdbelüftete Kältemittelverdichter einsetzen)!

Gegeben:

Verflüssigungstemperatur	+45 °C
Unterkühlungstemperatur vor dem Expansionsventil	+43 °C
Verdampfungstemperatur	-10 °C
Temperatur am Verdampferaustritt	-10 °C
Temperatur am Saugstutzen	-5 °C

Beispiel

Verdampfungsleistung	17,5 kW
Schädlicher Raum (angenommen)	0,012
Kältemittel	R-134a

Gesucht:

- Kältemittelmassenstrom!
- Druckverhältnis!
- Liefergrad (Zylinder $50 \text{ m}^3/\text{h}$ Hubvolumenstrom geschätzt)!
- Hubvolumenstrom des Kältemittelverdichters unter der Berücksichtigung des Liefergrads!
- Kältemittelverdichter nach Katalog!
- Tatsächlicher Liefergrad!
- effektiver Kältemittelmassenstrom!
- effektive Kälteleistung des Kältemittelverdichters (Katalogwert)!
- effektiver Gütegrad nach dem *DKV-Arbeitsblatt 3-01*!
- effektive Motorleistung (P_{MOTOR})!
- tatsächlicher elektrischer Wirkungsgrad!

Lösung:

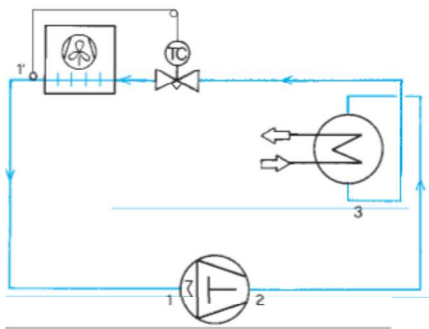


Abb. 75.6: RI-Fließbild

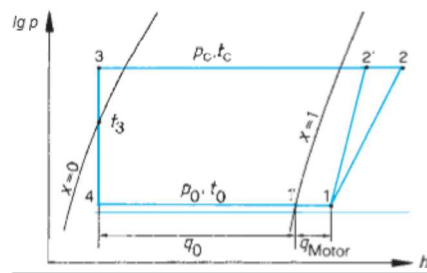


Abb. 75.7: Kältemittelkreislauf

Die Berechnung erfolgt mit der Dampftafel für R-134a, dem lg p,h-Diagramm, dem Verdichterkatalog und dem *DKV-Arbeitsblatt 3-01*.

- a) Kältemittelmassenstrom

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_R \cdot (h_{1'} - h_4) \text{ in kW}$$

Aus der Dampftafel bzw. dem lg p,h-Diagramm für R-134a wird entnommen:

$$h_{1'} = 392,90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ und } h_4 = 261,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Damit wird: } \dot{m}_R = \frac{17,5}{(392,9 - 261,1)} = 0,135 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

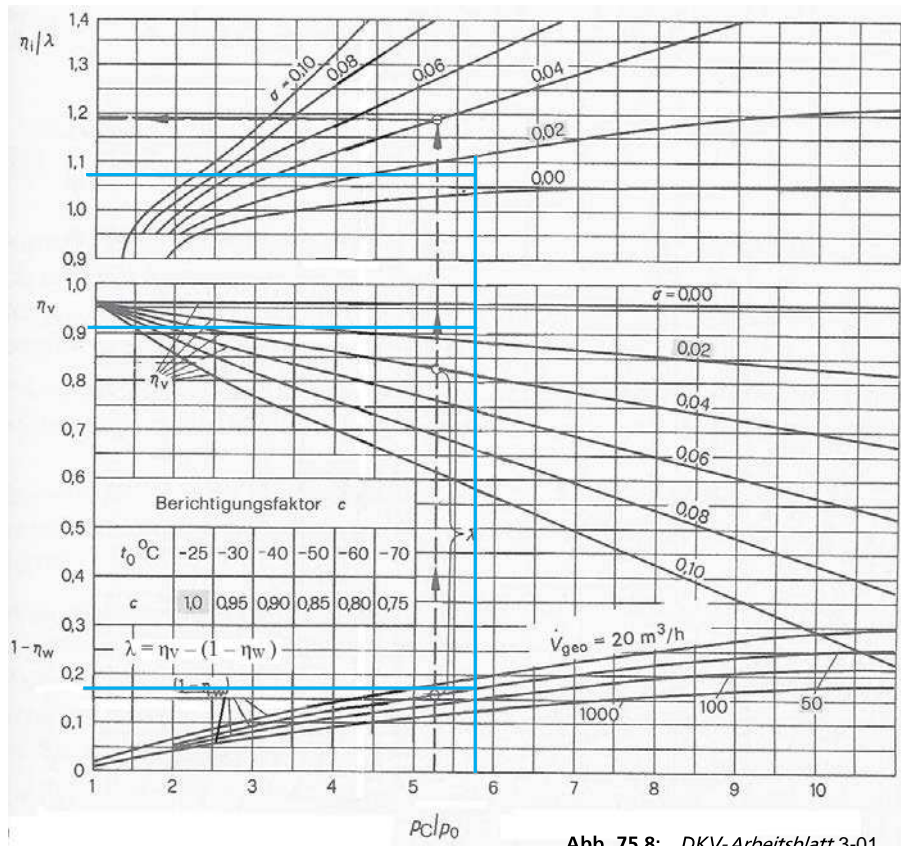
- b) Druckverhältnis

$$p_c = 11,61 \text{ bar, bei } t_c = +45 \text{ °C}$$

$$p_o = 2,01 \text{ bar, bei } t_o = -10 \text{ °C}$$

$$\frac{p_c}{p_o} = \frac{11,61}{2,01} = 5,78$$

c) Liefergrad



Aus dem DKV-Arbeitsblatt 3-01 wird entnommen:

$$\begin{aligned}\eta_v &= 0,91 \\ (1 - \eta_w) &= 0,168 \\ c &= 1,0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Damit wird: } \lambda &= [\eta_v - (1 - \eta_w)] \cdot c \\ \lambda &= [0,91 - 0,168] \cdot 1 = 0,742\end{aligned}$$

d) Erforderlicher Hubvolumenstrom des Kältemittelverdichters

$$\dot{V}_{HUB} = \frac{\dot{m}_R \cdot v_1}{\lambda} \quad \text{in} \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{kg}} = \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$