

## **E-PUMP**

### **Simulationsprogramm für elektrische Wärmepumpe**

Mit dem TRNSYS-Unterprogramm kann eine elektrische Wärmepumpe simuliert werden. Der Kreisprozeß, der dem Berechnungsverfahren für die Wärmepumpe zugrundegelegt ist, besteht aus den folgenden Zustandsänderungen (siehe Bild 1):

- Irreversibel adiabate Verdichtung vom überhitzten Zustand (1-2),
- isobare Wärmeabgabe vom Verdichter an die Umgebung und an das Heizwasser im Zylinderkopf (2-2'),
- isobare Abkühlung des Dampfes, Kondensation und Kondensatunterkühlung im Kondensator (2'-3),
- isenthalpe Drosselung (3-4),
- isobare Verdampfung und Überhitzung (4-1).

Das Programm enthält Stoffdaten für das Arbeitsmittel R12. Mit dem Verfahren wird der stationäre Betrieb berechnet.

Bild 1: Kreisprozeß im Berechnungsverfahren für Wärmepumpen

Da die Verdampfungs- und die Kondensationstemperatur  $T_0$  und  $T$  nicht direkt berechnet werden können, muß iterativ vorgegangen werden. Diese Temperaturen werden in erster Näherung mit den Eintrittstemperaturen des Heizwassers ( $T_{Kond,i}$ ) und des Wärmeträgerfluids der Wärmequelle ( $T_{Verd,i}$ ) abgeschätzt:

$$T = T_{Kond,i} + 8 \text{ K} \quad (1)$$

$$T_0 = T_{Verd,i} - 8 \text{ K} \quad (2)$$

Daraus werden der Kondensationsdruck  $p$  und der Verdampfungsdruck  $p_0$  aus der Dampftafel sowie das Druckverhältnis  $\pi = p/p_0$  bestimmt. Für den Liefergrad des Verdichters wird der quadratische Ansatz

$$\lambda_{Vd} = a_0 + a_1 \cdot \pi + a_2 \cdot \pi^2 \quad (3)$$

gewählt, wodurch die Kurve für  $\lambda_{Vd}$  aus /1/ (Bild 2) gut nachgebildet werden kann. Die Werte  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  können für einen Verdichter experimentell bestimmt und in das Simulationsprogramm eingegeben werden.

Bild 2: Liefergrad über dem Druckverhältnis nach /1/

Der Kältemittelmassenstrom  $\dot{m}_{KM}$  und die Kälteleistung  $\dot{Q}_{Verd}$  werden nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\dot{m}_{KM} = \frac{\dot{V}_{Hub} \cdot \lambda_{Vd}}{v_1} = \frac{n \cdot V_{Hub} \cdot \lambda_{Vd}}{v_1} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{Verd} = \dot{m}_{KM} (h_1 - h_3) \quad (5)$$

Der Verdichter kann in bis zu drei Leistungsstufen betrieben werden. Für jede Leistungsstufe muß der Hubvolumenstrom  $\dot{V}_{Hub} = n \cdot V_{Hub}$  eingegeben werden. Damit kann sowohl ein Verdichter mit Drehzahlregelung (Verdichterdrehzahl  $n$  variabel) als auch einer mit Zylinderabschaltung durch Saugventilabhebung ( $V_{Hub}$  variabel) berechnet werden. Die Sauggasüberhitzung  $\theta_U = T_1 - T_0$  und die Kondensatunterkühlung  $\theta_U = T'(p) - T_3$  werden als konstante Werte in das Programm eingegeben. Der Zustand 1 wird mit  $T_1$  näherungsweise nach dem idealen Gasgesetz berechnet (isobare Erwärmung). Für  $h_3$  wird näherungsweise  $h_3 \approx h'(T_3)$  verwendet.

Die elektrische Antriebsleistung des Verdichters beträgt:

$$P_{el} = \frac{1}{\eta_{eff}} (h_{2,rev} - h_1) \dot{m}_{KM} \quad (6)$$

wobei

$$h_{2,rev} - h_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_0 \cdot v_1 \left[ (p / p_0)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right] \quad (7)$$

die spezifische Enthalpiedifferenz bei reversibler Verdichtung ist. Der Isentropenexponent für R12 beträgt nach [1]  $\kappa = 1,15$ .

Der effektive Gütegrad des Verdichters  $\eta_{eff} = \eta_{el} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{ind}$  wird als Funktion des Druckverhältnisses  $\pi$  eingegeben:

$$\eta_{eff} = a_0' + a_1' \cdot \pi + a_2' \cdot \pi^2 + a_3' \cdot \pi^3 + a_4' \cdot \pi^4 \quad (8)$$

Bei der Berechnung der Heizleistung

$$\dot{Q}_{Heiz} = 0,97 (P_{el} + \dot{Q}_{Verd}) \quad (9)$$

wurde angenommen, daß 3 % der im Verdampfer und Verdichter zugeführten Energie als Wärme an die Umgebung abgegeben werden.

Mit der Kälte- und der Heizleistung werden zusammen mit den bekannten Eigabegrößen  $\mathcal{G}_{Verd,i}$ ,  $\mathcal{G}_{Kond,i}$ ,  $\dot{m}_{Verd}$  und  $\dot{m}_{Kond}$  die Temperaturen  $\mathcal{G}_{Verd,o}$  und  $\mathcal{G}_{Kond,o}$  berechnet. Daraus werden mit den Wärmeübertragungsvermögen  $(k \cdot A)_{Verd}$  und  $(k \cdot A)_{Kond}$  sowie den mittleren logarithmischen Temperaturdifferenzen die Temperaturen  $T_0$  und  $T$  berechnet. Weicht eine dieser berechneten Temperaturen um mehr als 0,2 K vom vorher angenommenen Wert  $T_0$  bzw.  $T$  ab, so wird die Berechnung mit den neuen Werten  $T_0$  und  $T$  wiederholt.

Ein konstantes Wärmeübertragungsvermögen ergibt beim Verdampfer nur eine grobe Näherung, da der kältemittelseitige Wärmeübergangskoeffizient beim Blasensieden nach

$$\alpha_{Verd} = C \cdot \dot{q}_{Verd}^n \quad n = 0,5 \dots 0,8 \quad (10)$$

von der Wärmestromdichte abhängt [2]. Bei Rohrbündelverdampfern mit Verdampfung in den Rohren kann der kältemittelseitige Wärmeübergangskoeffizient im Teillastbetrieb bis etwa 1/10 des Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion außen am Rohr abfallen. Daher wird für das Wärmeübertragungsvermögen des Verdampfers folgender Ansatz gewählt:

$$(k \cdot A)_{Verd} = C \cdot \dot{Q}_{Verd}^n \quad (11)$$

Beim Kondensator hat ebenfalls der kältemittelseitige Wärmeübergangswiderstand den größten Anteil am Wärmedurchgangswiderstand. Nach /3/ hängt der kältemittelseitige Wärmeübergangskoeffizient bei laminarer Filmkondensation nach

$$\alpha_{Kond} = C \cdot \dot{q}_{Kond}^{-1/3} \quad (12)$$

von der Wärmestromdichte ab. Wegen dieser geringen Abhängigkeit wird beim Kondensator mit konstantem Wärmeübertragungsvermögen gerechnet. Ist die Wärmepumpe abgeschaltet, so wird ihr die elektrische Heizleistung für die Ölwanneheizung, die als fester Wert in das Programm eingegeben wird, zugeführt.

## Literatur

- /1/ Linge, K.: Berechnungsgrundlagen von Kolbenkompressoren. In: Plank, R. (Hrsg.): Handbuch der Kältetechnik, Fünfter Band, Springer-Verlag, Berlin, 1966
- /2/ VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag, 4. Auflage, Düsseldorf, 1984
- /3/ Jungnickel, H., R. Agsten, W.E. Kraus: Grundlagen der Kältetechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, 1980.

Parameter	Programm-variable	Beschreibung	Einheit
1	KAVFAC	Konstante in Gleichung für Wärmeübertragungsvermögen des Verdampfers $(kA)_{Verd} = KAVFAC \cdot Q_{Verd}$	$[(kJ/h)^{(1-KAVEXP)}/K]$
2	KAVEXP	Exponent in Gleichung für Wärmeübertragungsvermögen des Verdampfers	[-]
3	KACOND	Wärmeübertragungsvermögen des Kondensators	[kJ/hK]
4	NSTMAX	Anzahl der Leistungsstufen des Verdichters (maximal 3)	[-]
5	TSH	Sauggasüberhitzung	[K]
6	TSC	Kondensatunterkühlung	[K]
7	CPVERD	spezifische Wärmekapazität des Wärmequellenfluids	[kJ/kg K]

Für jede der maximal 3 Leistungsstufen NSTEP:

9·NSTEP - 1	VGEO(NSTEP)	Hubvolumenstrom	[m <sup>3</sup> /h]
9·NSTEP	L0(NSTEP)	} Koeffizienten für die Gleichung des Liefergrads des Verdichters	[-]
9·NSTEP + 1	L1(NSTEP)		[-]
9·NSTEP + 2	L2(NSTEP)	} $\lambda_{vd} = L0 + L1 \cdot \pi + L2 \cdot \pi^2$	[-]
9·NSTEP + 3	G0(NSTEP)	} Koeffizienten für die Gleichung des effektiven Gütegrads des Verdichters	[-]
9·NSTEP + 4	G1(NSTEP)		[-]
9·NSTEP + 5	G2(NSTEP)	} $\eta_{eff} = G0 + G1 \cdot \pi + G2 \cdot \pi^2 + G3 \cdot \pi^3 + G4 \cdot \pi^4$	[-]
9·NSTEP + 6	G3(NSTEP)		[-]
9·NSTEP + 7	G4(NSTEP)		[-]
9·NSTMAX + 8	PEL0	elektrische Leistung der Ölwanneheizung	[kJ/h]
9·NSTMAX + 9	PMAX	maximal mögliche elektrische Leistung des Verdichters	[kJ/h]

Eingabegröße	Programm-variable	Beschreibung	Einheit
1	TVERDI	Eintrittstemperatur des Wärmequellenfluids in den Verdampfer	[°C]
2	MVERD	Massenstrom des Wärmequellenfluids durch den Verdampfer	[kg/h]
3	TCONDI	Eintrittstemperatur des Heizwassers in den Kondensator	[°C]
4	MCOND	Massenstrom des Heizwassers durch den Kondensator	[kg/h]
5	NSTEP	Leistungsstufe des Verdichters	[-]

<b>Ausgabegröße</b>	<b>Programm- variable</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Einheit</b>
1	TVERDO	Austrittstemperatur des Wärmequellenfluids aus dem Verdampfer	[°C]
2	MVERD	Massenstrom des Wärmequellenfluids durch den Verdampfer	[kg/h]
3	TCONDO	Austrittstemperatur des Heizwassers aus dem Kondensator	[°C]
4	MCOND	Massenstrom des Heizwassers durch den Kondensator	[kg/h]
5	QCOND	Heizleistung	[kJ/h]
6	QVERD	Kälteleistung	[kJ/h]
7	PEL	elektrische Antriebsleistung	[kJ/h]
8	COP	Leistungszahl	[-]
9	TVERD	Verdampfungstemperatur	[°C]
10	TCOND	Kondensationstemperatur	[°C]
11	PVERD	Verdampfungsdruck	[bar]
12	PCOND	Kondensationsdruck	[bar]
13	LG	Liefergrad	[-]
14	MKM	Massenstrom des Kältemittels	[kg/h]
15	H1	spezifische Enthalpie im Ansaugzustand	[kJ/kg]
16	H3	spezifische Enthalpie am Kondensatoraustritt	[kJ/kg]
17	V1	spezifisches Volumen im Ansaugzustand	[m <sup>3</sup> /kg]
18	ETAVD	Gütegrad des Verdichters	[-]
19	H2REV	spezifische Enthalpie nach reversibler Verdichtung	[kJ/kg]