

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Gasvolumen

Normkubikmeter:

$\text{Nm}^3 \Rightarrow \text{m}^3$ im Normzustand, d.h. 1 bar und 20°C

Ideale Gase

(bezogen auf $T=273\text{ K}$ und $p=101,3\text{ kPa}=760\text{ Torr}$):

Mol. Normvolumen: $V_m = R_0 T/p = 22,41\text{ (m}^3/\text{kmol)}$

mol. Gaskonstante: $R_0 = 8,31\text{ (J/mol }^\circ\text{K)}$

individuelle Gaskonstante: $R_i = R_0/M_i\text{ (J/g }^\circ\text{K)}$
mit $M_i\text{ (kg/kmol)}$

Dichte $\rho\text{ (kg/m}^3)$

Flüssigkeitsgemische (Bsp. 3 Komp.):

$$\rho = (m_1+m_2+m_3) / [(m_1/\rho_1) + (m_2/\rho_2) + (m_3/\rho_3)]$$

Gasgemische:

$$\rho_{Da} = 0,012 \times M \times P\text{ (mbar)} / [T\text{ (}^\circ\text{K)} \times Z]$$

M (kg/kmol) Molekulargewicht

T (°K) Thermodyn. Temp. in Kelvin = $t\text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$

Z = 1 als Näherung bei niedrigen Drücken: $p < 10\text{ bar}$

Z (dim'los) Realgasfaktor = $f(T/T_c)$, s. Lit.14; VDI-

Wärmeatlas (Kap. Da15)

$T_c\text{ (K)}$ Kritische Temperatur

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Dynamische Viskosität $\eta\text{ (Ns/m}^2)$

1 Pa s	1 kg/ms = 1/9,81 kps/m ²
	1 Ns/m ² = 10 ³ cP
1 kps/m ²	9,81 Pa s = 9,81 kg/ms
	9,81 Ns/m ² = 9.810 cP
1 cP	10 ⁻³ Pa s = 1 mPas
	10 ⁻³ Ns/m ² = 10 ⁻³ kg/ms
	101,9 x 10 ⁻⁶ kps/m ²
1 P	1 g/cms = 100 cP

Kinematische Viskosität $\nu\text{ (m}^2/\text{s)}$ $\nu = \eta/\rho$

1 St	1 cm ² /s = 100 cSt
1 cSt	1 x 10 ⁻⁶ m ² /s
1 cSt	= $\eta\text{ (cP)} / \rho\text{ (kg/dm}^3)$
	= $\eta\text{ (10}^{-6}\text{ kg/ms)} / \rho\text{ (kg/m}^3)$

Flüssigkeitsgemische (s.a. Lit. 01)

Dyn. Viskosität $\ln \eta = \sum x_i \ln \eta_i$

$$\eta = e^{\sum x_i \ln \eta_i}$$

Bl. ES01

aktualisiert 2020-11-11

Bl. ES02

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Temperatur Flüssigkeitsgemische, Bsp. 2 Komp.

$$t_M = (m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2) / (m_1 c_1 + m_2 c_2)$$

m(kg); c = c_p(J/kg °K); t(°C)

Umrechnung (Bsp. 3 Komp.):

Gew'anteile a in Mol'anteile x_a:

$$x_a = (a/M_a) / [(a/M_a) + (b/M_b) + (c/M_c)]$$

Mol'anteile x in Gew'anteile a:

$$a = x_a M_a / (x_a M_a + x_b M_b + x_c M_c)$$

Überschlägige Stoffwerte (s. Lit. 02)

Dichte Flüss.: $\rho_i = f(T)$ durch Simulation $\rho_i = a - b T$
aus Meßwerten

Verdampfungswärme: $r\text{ (J/mol)} = 50 [(3 T_c/2) - T]$

Verdampfungswärme (Trouton-Regel 1884, s. Lit. 05):

$$M r / T_s = C$$

$$C = 88\text{ J/(mol}^\circ\text{K)},$$

$$T_s\text{ (}^\circ\text{K)} \text{ Siedetemp. bei 1 bar}$$

gilt eingeschränkt für nichtpolare Flüssigkeiten,

$$r = 88 T_s / M\text{ (kJ/kg)}$$

Dampfdruck: $\ln(p/p_c) = 9 [(T/T_c) - 1]$ (s. Lit. 02)

Bl. ES03

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Vereinfachte VLE-Näherungsberechnungen

(für Dampf-Flüssig-Gleichgewichte)

Siedepunktsgleichung

$$x_a p_a + x_b p_b + x_c p_c + \dots = P$$

Zweistoffgemisch ($x_a + x_b = 1$), Raoult-Dalton, ideal:

$$x'_a = (P - p_b) / (p_a - p_b) \quad \text{Flüss.-Molanteil}$$

$$x''_a = x'_a p_a / P \quad \text{Dampf-Molanteil}$$

Dampfdruck

$$\lg p_i = A_i - B_i / (C_i + t) \quad (\text{s. Lit. 11})$$

p_i (Torr), Dampfdruck der reinen Komponente
 t (°C), Siedetemp.

A, B und **C**, Antoine-Konst. s. Lit. 03 bzw. lassen sich annähernd aus 3 Paaren zusammengehöriger p- und t-Werte berechnen

oder **Dampfdruck** für Vielstoffgemische

$$\ln p_i = A_i + B_i / t \quad (\text{nach August, 1828})$$

z.B. für Fettsäuren $C_i = 10 \dots 24$ aus VLE-Daten (s. Lit. 04) approximiert

$$A_i = -43,35 C_i^{-0,3174} + 28,22$$

$$B_i = -142 C_i + 1078$$

Bl. ES04

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Enthalpie

Wird dem Stoff mit seiner inneren Energie (U) eine Arbeitsleistung (pV) zugefügt, so ergibt sich ein Energiestrom: $E = m (U + pV)$. R. Mollier führte 1904 die

Enthalpie $i = u + pv$ (kJ/kg)

als neue kalorische Zustandsgröße ein. Die Enthalpie ist eine vorteilhafte Rechengröße, wenn Stoffströme durch thermische Bilanzgebiete geführt werden. Der Energiestrom ergibt: **E (kW) = m (kg/s) * i (kJ/kg)**

Zur Berechnung von i wird die Stoffkonstante **Spezifische Wärme c_p** benutzt, denn bei $p = \text{const.}$ der Zustandsänderung wird im Energieerhaltungssatz $dq_p = (\partial i / \partial T)_p dT \equiv c_p dT$ und

$$i = c_p * \Delta t \text{ (kJ/kg)}$$

Für die meisten technischen Anwendungen wird die Enthalpieskala ab $i_0 = 0$ kJ/kg bei $t = 0$ °C gerechnet.

Flüssigkeit: $i = c_p * t$; Dampf: $i = c_p * t + r$

Beispiel: Wasser bei $t=0$ °C wird $i_0 = 0$ kJ/kg,
Wasser bei 80°C; $c_p = 4,19$ kJ/kgK; $i = 4,19 * 80 = 335$ kJ/kg
Wasserdampf bei 80°C: $i = 335 + 2309 = 2644$ kJ/kg

Bl. ES05

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Energiebilanz

zugeführt: $m_1 c_{p1} t_1 = m_1 i_1$

$m_2 c_{p2} t_2 = m_2 i_2$

Wärme q

abgeführt: $m_3 c_{p3} t_3 = m_3 i_3$

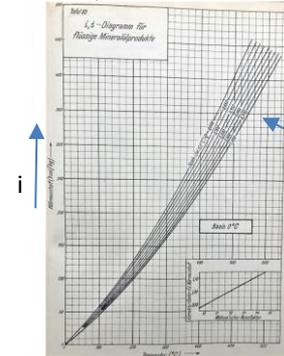
Bilanz: $m_1 i_1 + m_2 i_2 + q = m_3 i_3$

$i_3 = (m_1 i_1 + m_2 i_2 + q) / m_3$

Beispiel: Wasser 2 m³/h; 20 °C plus Wasser 3 m³/h; 30 °C plus Wärme $q = 5$ kW

$i_3 = [0,56 \text{ (kg/s)} * 83,7 \text{ (kJ/kg)} + 0,83 \text{ (kg/s)} * 125 \text{ (kJ/kg)} + 5 \text{ (kJ/s)}] / 1,39 \text{ (kg/s)}$

$i_3 = 112 \text{ (kJ/kg)}$ $t_3 = i_3 / c_p = 112 / 4,18 = 26,8$ °C



Dichte
0,6 – 1,0

i-t Diagramm flüss. Mineralölprodukte, s. Lit. (1)

Bl. ES06

aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung

Entropie

s.Lit. (32) S.66

Damit Wärme in Arbeit verwandelt werden kann bzw. um von einem Körper auf einen anderen übertragen zu werden, muss ein Temperaturgefälle vorliegen. Als Maß für diesen Ordnungszustand setzte Clausius (1865) die kalorische Zustandsgröße S als Entropie ein:

$$dQ/T \equiv ds \quad \dots \quad ds \geq 0$$

Die Entropie eines abgeschl. Systems kann nur zunehmen oder im Grenzfall umkehrbarer Vorgänge höchstens konstant bleiben.

Berechnung: $ds = c_p (dT/T) - R (dp/p)$;

Integration liefert: $s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$;

für $p = \text{const.}$ wird $s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2/T_1)$;

Entropieskala ab $s_0 = 0$ kJ/kgK bei $t=0$ °C berechnet:

$$s = c_p \ln(T/273) \text{ (kJ/kgK)}$$

Beispiel: Wasser bei $t=0$ °C wird $s_0 = 0$ kJ/kgK,

Wasser bei 80°C; $c_p = 4,19$ kJ/kgK;

$s = 4,19 * \ln(353/273) = 1,08$ kJ/kgK

Wasserdampf gesättigt bei 80°C:

$s = c_p \ln(T/273) + r/T = 4,19 * \ln(353/273) + 2308/353$

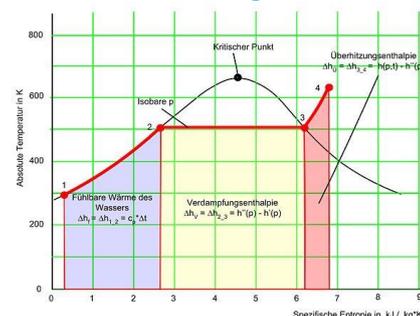
$s = 7,62$ kJ/kgK

Bl. ES07

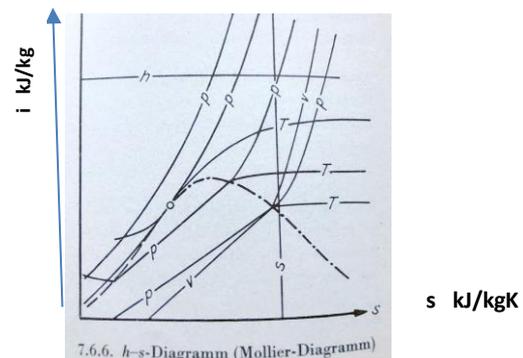
aktualisiert 2020-11-11

Hilfsblätter für den Anlagenbauer

ES Stoffwerte-Berechnung



T-s-Diagramm für Wasser



i-s-Diagramm (Mollier-Diagramm) s.Lit. (05) S.412

Bl. ES08

aktualisiert 2020-11-11

