Thermische VT 3

Kontakt: sebastian.lebioda@hs-merseburg.de

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Allgemein 3.1.1.1

Wärmestrom

$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_P \cdot \Delta T$	W
für einphasige Systeme	
$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H$	W
für Phasenübergang (z.B. Verdampfen / Kondensieren)	
$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A$	W

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmeleitung 3.1.1.2

Fourier'sche Gleichung der Wärmeleitung (stationär)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad \frac{\mathrm{K}}{s}$$

Wärmestromdichte (differentiell)

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\lambda}{s} \cdot (T_2 - T_1) \qquad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

T2 < T1

Wärmestrom - einschichtige, ebene Wand (Platte)

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = \frac{1}{R_{ges}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \qquad \mathrm{W}$$

T2 < T1

Wärmestrom - einschichtige, einfach gekrümmte Wand (Zylinder)

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{ln \frac{d_a}{d_i}} \cdot l \cdot (T_1 - T_2) \qquad \mathrm{W}$$

Wärmestrom - einschichtige, doppelt gekrümmte Wand (Kugel)

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_a}} \cdot (T_1 - T_2) \qquad \mathrm{W}$$

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmeleitung 3.1.1.2

Wärmestrom - mehrschichtige, ebene Wand (Platte)

$$\dot{Q} = \frac{A}{\sum_k \frac{s_k}{\lambda_k}} \cdot (T_1 - T_2)$$ W

Wärmestrom - mehrschichtige, einfach gekrümmte Wand (Zylinder)

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi}{\sum_k \frac{1}{\lambda_k}\left(ln \frac{d_{a;k}}{d_{i;k}}\right)} \cdot l \cdot (T_1 - T_2)$$ W

Wärmestrom - mehrschichtige, doppelt gekrümmte Wand (Kugel)

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi}{\sum_k \frac{1}{\lambda_k}\left(\frac{1}{d_{i;k}} - \frac{1}{d_{a;k}}\right)} \cdot (T_1 - T_2)$$ W

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmekonvektion 3.1.1.3

Wärmestrom

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$$ W

Erzwungene Konvektion

emp

$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Pr^{C_3}$$ -

Allgemeine Gleichung

emp

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43}$$ - [1]

Re > 10000, 0,6 < Pr < 2500, l_Rohr/d_Rohr > 50

für Strömungen in geraden Rohre im turbulenten Bereich

weitere Gleichungen siehe Vauck, Müller

Freie Konvektion

emp

$$Nu = C_1 \cdot (Gr \cdot Pr)^{C_2}$$ -

Allgemeine Gleichung

emp

$$Nu = 0{,}49 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0{,}25}$$ - [1]

10^3 < Gr*Pr <3,7*10^7

für gerade Rohre (senkrecht oder waagerecht)

1 Vauck/Müller:"Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik":1994, Seite S.430/434, Dt.Verlag Grundstoffindustrie

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmedurchgang 3.1.1.4

Wärmestrom

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad \mathrm{W}$$

Wärmedurchgangskoeffizient - gekr. mehrsch. Wand (Zylinder)

$$\dot{Q} = U_a \cdot A_a \cdot \Delta T_{ln} \quad \mathrm{W}$$

$$U_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{2} \cdot \sum_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \cdot ln\left(\frac{d_{a,k}}{d_{i,k}}\right)\right) + \frac{1}{\alpha_a}} \quad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$$

Bezugsfläche ist Aussenfläche

$$\dot{Q} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_{ln} \quad \mathrm{W}$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i}{2} \cdot \sum_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \cdot ln\left(\frac{d_{a,k}}{d_{i,k}}\right)\right) + \frac{1}{\alpha_a} \cdot \frac{d_i}{d_a}} \quad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$$

Bezugsfläche ist Innenfläche

$$\dot{Q} = U_{Rohr} \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta T_{ln} \quad \mathrm{W}$$

$$U_{Rohr} = \frac{1}{\frac{1}{d_i \alpha_i} + \frac{1}{2} \cdot \sum_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \cdot ln\left(\frac{d_{a,k}}{d_{i,k}}\right)\right) + \frac{1}{d_a \alpha_a}} \quad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m \cdot K}}$$

Wärmedurchgangskoeffizient - gekr. mehrsch. Wand (Kugel)

$$\dot{Q} = U_k \cdot \pi \cdot \Delta T_{ln} \quad \mathrm{W}$$

$$U_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i^2} + \frac{1}{2} \cdot \sum_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \cdot \left(\frac{1}{d_{i,k}} - \frac{1}{d_{a,k}}\right)\right) + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a^2}} \quad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

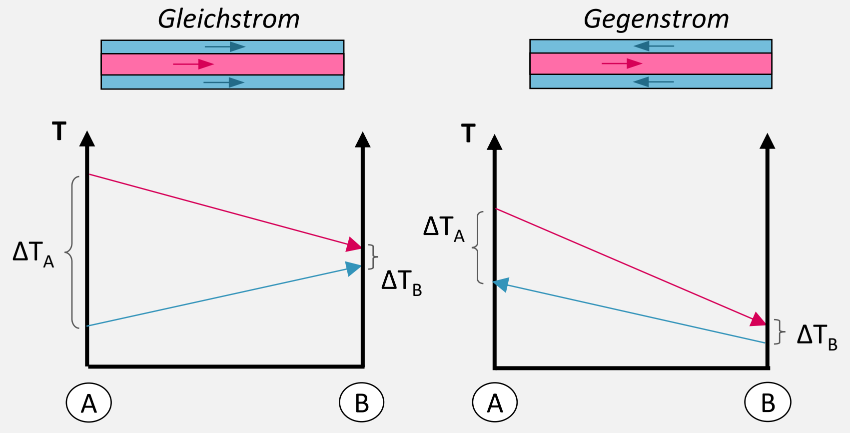
Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmeübertrager 3.1.1.5

Temperaturprofile



Ⓐ Ⓑ Eingänge eines Wärmeübertragers

Wärmestrom

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}$$ W

Mittlere Logarithmische Temperaturdifferenz

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)}$$ K

ΔT_A, ΔT_B: Temperaturdifferenz zwischen den Strömen eines WÜ

Beispiele

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmestrahlung 3.1.1.6

Wärmestrom

$$\dot{Q} = C_{1,2} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \qquad \mathrm{W}$$

T_1 > T_2

Strahlungskonstanten

$$C_S = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \qquad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}^4}$$

$$C_i = \varepsilon_i \cdot C_S$$

für Oberflächen

gilt auch für ↓

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_S}}$$

für zwei parallele Flächen

$$C_{1,Z,2} = \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_Z} - \frac{1}{C_S}\right)}$$

wenn C_1 = C_2

für zwei parallele Flächen mit Zwischenwand

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_S}\right)}$$

für Körper 2 umschließt Körper 1 vollkommen

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{d_1}{d_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_S}\right)}$$

für unendlich lange Zylinder

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{C_S - C_2}{C_2}\right)}$$

für konzentrische Kugeln

$$C_{1,2} = C_1 = \varepsilon \cdot C_S$$

für Einzelkörper ohne im unendlichen Raum

C_S wird oft auch als σ_S angegeben

Beispiele

Urheber: HS Merseburg

Stationäre Wärmeübertragung 3.1.1

Notizen

Wärmestrahlung 3.1.1.6

Kirchhoff Gesetz (Emissionsverhältnis)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_s}$$ -

Planck'sches Strahlungsgesetz

$$I_{s,\lambda}(T) = c_1 \cdot \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1}$$ $\frac{W}{m^3}$

T_1 > T_2

Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$E_{s,T} = \sigma_s \cdot T^4$$ $\frac{W}{m^2}$

Wien'scher Verschiebungssatz

$$\lambda_{max} = \frac{2897{,}8\ \mu m K}{T}$$ µm

Wärmestrom

$$\dot{Q} = A * \alpha_s * (T_1 - T_2)$$ W

T_1 > T_2

Wärmeübertragungskoeffizient

$$\alpha_s = C_{1,2} \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$ $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}$

T_1 > T_2

Wärmestrom - Konvektiv und Strahlung

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha_{ges} \cdot \Delta T$$ W

$$\alpha_{ges} = \alpha_{konvektiv} + \alpha_{Strahlung}$$ $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$

Beispiele

Instationäre Wärmeübertragung 3.1.2

Notizen

Fourier'sche Gleichung der Wärmeleitung (instationär)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{e_q}{\rho \cdot c_p} \qquad \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{s}}$$

Fourier'sche Gleichung (Dimensionslos)

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{n}{\xi} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \qquad -$$

n=0 -> Ebene Platte, n=1 -> Zylinder, n=2 -> Kugel

nicht analytisch lösbar

numerische Lösung durch Fourier-Reihen

Dimensionslose Länge

$$\xi = \frac{x}{L} \qquad -$$

Dimensionslose Zeit

$$Fo = \frac{a_T \cdot t}{l_{Cha}^2} \qquad -$$

Dimensionslose Temperatur

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \qquad -$$

T : Aktuelle Temperatur
T_0 : Anfangstemperatur
T_∞ : Umgebungstemperatur

Sonderfall: Kontakttemperatur zweier Körper

$$T_K = \frac{T_{A,w} + \sqrt{\frac{\lambda_k \cdot \rho_k \cdot c_{p,k}}{\lambda_w \cdot \rho_w \cdot c_{p,w}}} \cdot T_{A,k}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_k \cdot \rho_k \cdot c_{p,k}}{\lambda_w \cdot \rho_w \cdot c_{p,w}}}} \qquad \mathrm{K}$$

T_A,w > T_A,2

nach kurzer Zeit (Fo ist klein)

Beispiele

Allgemein 3.2.1

Notizen

Daltonsche Gesetz

$$p_{ges} = \sum p_{D,i}$$

$$p_{ges} = p_A + p_B = x_A \cdot p_A{}^\circ + (1 - x_A) \cdot p_B{}^\circ$$

Pa

untere Gleichung für 2 Stoffe

Raoultsche Gesetz

$$p_{D,i} = p_i{}^\circ \cdot x_i$$

Pa

für ideales Gasgemisch

Relative Flüchtigkeit bzw. Trennfaktor

$$\alpha = \frac{p_{Ls}{}^\circ}{p_{Ss}{}^\circ}$$

-

Tauliniengleichung im p(x) - Diagramm (T=const.)

$$y_{Ls} = \frac{x_{Ls} \cdot p_{Ls}{}^\circ}{x_{Ls} \cdot p_{Ls}{}^\circ + (1 - x_{Ls}) \cdot p_{Ss}{}^\circ}$$

-

$$y_{Ls} = \frac{\alpha \cdot x_{Ls}}{1 + (\alpha - 1) \cdot x_{Ls}}$$

-

Beispiele

Kontinuierliche Rektifikation 3.2.2

Notizen

Bilanzierung 3.2.2.1

Gesamte Kolonne

$$\dot{n}_D = \frac{x_F - x_S}{x_{Dest} - x_S} \cdot \dot{n}_F \qquad \frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{s}}$$

Rücklaufverhältnis

$$v = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_{Dest}} \qquad -$$

Einlaufverhältnis

$$\varepsilon = \frac{\dot{n}_F}{\dot{n}_{Dest}} \qquad -$$

Bilanzgerade des Verstärkungsteils (Arbeitsgerade)

$$y = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_R + \dot{n}_{Dest}} \cdot x + \frac{\dot{n}_{Dest}}{\dot{n}_R + \dot{n}_{Dest}} \cdot x_{Dest}$$

$$y = \frac{v}{v+1} \cdot x + \frac{1}{v+1} \cdot x_{Dest} \qquad -$$

Bilanzgerade des Abtriebsteils (Arbeitsgerade)

$$y = \frac{\dot{n}_{lq}}{\dot{n}_{lq} - \dot{n}_S} \cdot x - \frac{\dot{n}_S}{\dot{n}_{lq} - \dot{n}_S} \cdot x_S$$

$$y = \frac{v + \varepsilon}{v+1} \cdot x - \frac{\varepsilon - 1}{v+1} \cdot x_S \qquad -$$

Beispiele

Kontinuierliche Rektifikation 3.2.2

Notizen

Kolonne 3.2.2.2

Minimales Rücklaufverhältnis

$$\nu_{min} = \frac{1}{\alpha - 1} \cdot \left(\frac{x_{Dest}}{x_F} - \alpha \cdot \frac{1 - x_{Dest}}{1 - x_F} \right)$$ -

nu,opt ca. 1,1 … 1,5 * nu,min

Minimale Bodenzahl

$$n_{min} = \frac{\log\left(\frac{y_{Dest} \cdot (1 - x_F)}{x_F \cdot (1 - y_{Dest})}\right)}{\log\alpha}$$

$$= \frac{\log\left[\left(\frac{x_{Dest}}{1 - x_{Dest}}\right) \cdot \left(\frac{1 - x_S}{x_S}\right)\right]}{\log\alpha} - 1$$ -

Bodenverstärkungsverhältnis

$$E = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}}$$ -

Praktische Stufenzahl

$$n_{prak} = \frac{n_{th}}{E}$$ -

Thermischer Einlaufzustand

$$\varphi = \frac{h_G - h_F}{h_G - h_L}$$ -

Beispiele

Notizen

Bilanzierung

$$\dot{m}_{TS} \cdot (X_\alpha - X_\omega) = \dot{m}_{TL} \cdot (Y_\omega - Y_\alpha) = \dot{m}_W \qquad \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

TS, TL: wasserfrei

Wärmebedarf idealer Trockner

$$\dot{Q} = \dot{m}_{TL} \cdot (h_2 - h_1) \qquad \text{W}$$

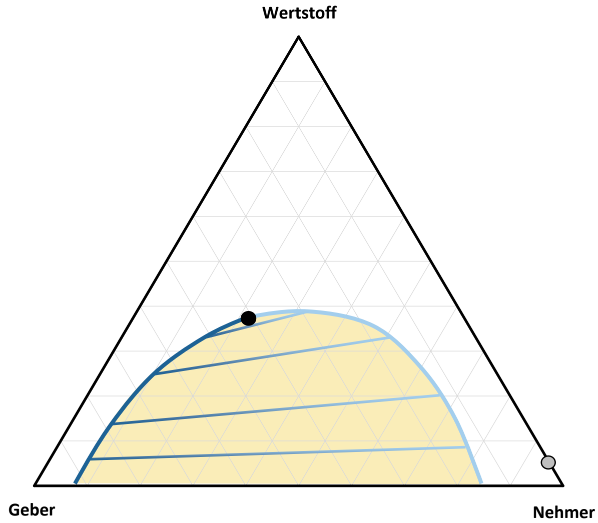
h: für Trockene Luft (Mollier-Diagramm)

Beispiele

Dreiecksdiagramm 3.4.1

Symbolik

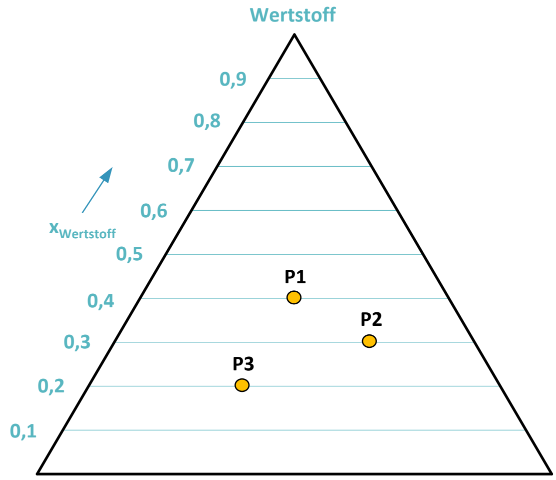
△	1-Phasen Gebiet
	2-Phasen Gebiet (Mischunglücke)
	Eckpunkte: Reinstoffe, Verindungslinie: Binärgemisch
	Binodalkurve
	Konoden
	Raffinatast
	Extraktast
○	Zustandspunkt
●	Kritischer Punkt

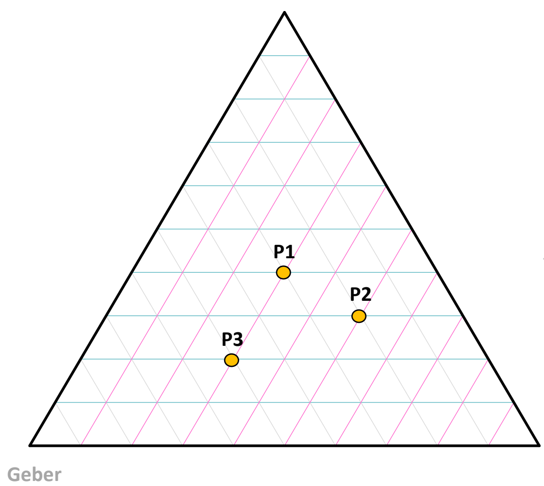


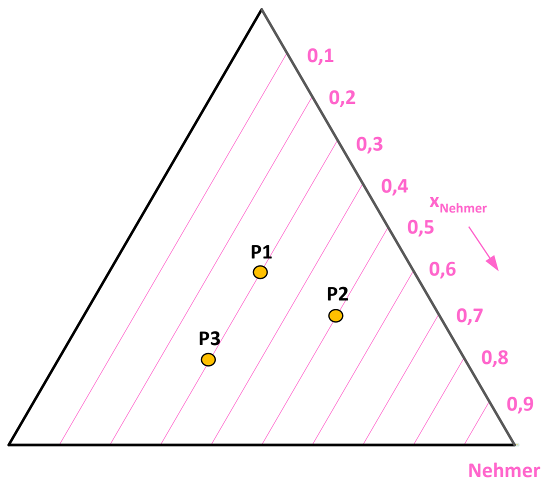
Beispielhafte Zustandspunkte

	P1	P2	P3
G	0,3	0,2	0,5
W	0,4	0,3	0,2
N	0,3	0,5	0,3

Werte in Anteile (-)







Achsenbeschriftung kann auch gegenläufig und gespiegelt sein!

Beispiele

Allgemein 3.4.2

Notizen

Hebelgesetz im Dreiecksdiagramm

$$G_i \cdot \overline{G_i M} = N_i \cdot \overline{N_i M}$$ $kg \cdot m$

für Bestimmung von Geber- oder Nehmerphase im Dreiecksdiagramm

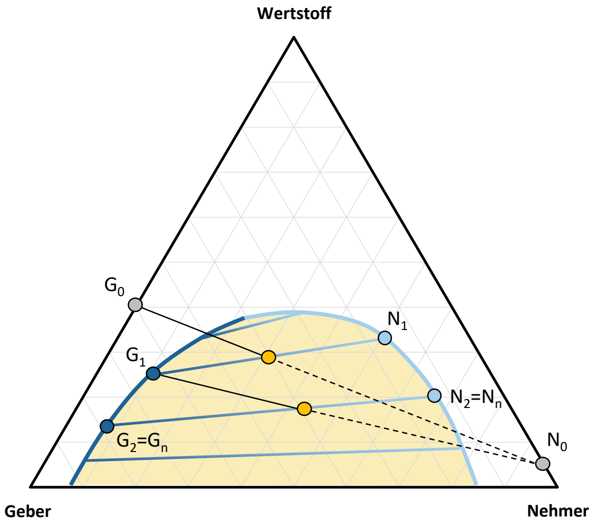
$$M \cdot \overline{G_{i+1} M} = N_{i+1} \cdot \overline{N_{i+1} M}$$ $kg \cdot m$

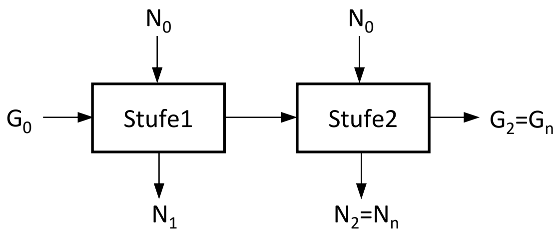
für Bestimmung von Extrakt- oder Raffinatphase im Dreiecksdiagramm

Beispiele

Kreuzstrom 3.4.3

Notizen





Bilanzierung

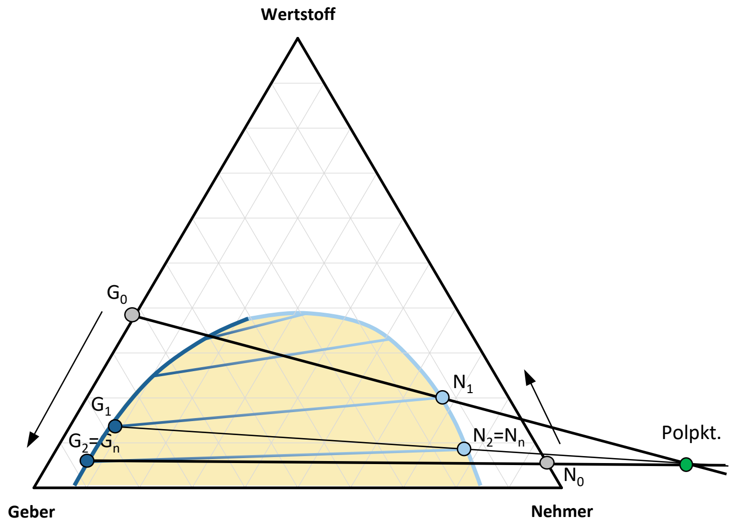
$$G_i + N_i = M = G_{i+1} + N_{i+1} \qquad kg$$

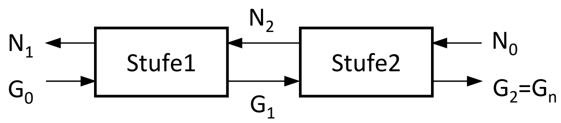
für eine theoretische Stufe

Beispiele

Gegenstrom 3.4.4

Notizen





Bilanzierung

$$G_0 + N_0 = M = G_n + N_n \qquad kg$$

Beispiele

Haben Sie uns etwas mitzuteilen?
Fehler? Vorschläge?

Dann immer her damit

Haben Sie uns etwas mitzuteilen?
Fehler? Vorschläge?

Dann immer her damit

Urheber: HS Merseburg