1. Kinetik der Wärmeübertragung

Wärmeübertragung von Ort 1 zum Ort 2:

Fourier: $\dot{q} = -\lambda \dfrac{\partial T}{\partial s}$; integral folgt: $\dot{Q} = A_m \dfrac{\lambda}{s}(T_1 - T_2)$

Wärmedurchgang: $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \overline{(T_1 - T_2)}$

Wärmedurchgangskoeffizient:

$$\frac{1}{k \cdot A} = \sum_i \left(\frac{1}{\alpha \cdot A}\right)_i + \sum_j \left(\frac{s}{\lambda \cdot A_m}\right)_j$$

Zylinderschale (auch Rohrwand!):

$$A_m = 2\pi \cdot r_m \cdot L = \frac{A_a - A_i}{\ln(A_a/A_i)}\,; \quad r_m = \frac{r_a - r_i}{\ln(r_a/r_i)}$$

Kugelschale: $A_m = 4\pi \cdot r_m^2 = \sqrt{A_a A_i}$; $r_m = \sqrt{r_a r_i}$

Gleich-, Gegenstrom, Rührkessel: $\overline{(T_1 - T_2)} = \Delta T_{LM}$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T(z=0) - \Delta T(z=L)}{\ln \dfrac{\Delta T(z=0)}{\Delta T(z=L)}}$$

2. Wirkungsgrad, mittlerer Temperaturunterschied

Normierung der Temperatur: $\theta = \dfrac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$

Wirkungsgrad = normierte Temperaturänderung:

$\theta_{x,ein} = 1$; $\theta_{y,ein} = 0$; $\varepsilon_x = 1 - \theta_{x,aus}$; $\varepsilon_y = \theta_{y,aus}$

norm. mittl. Temperaturunterschied: $\Theta = \dfrac{\overline{T_x - T_y}}{T_{\max} - T_{\min}}$

$\varepsilon_x = \Theta \cdot NTU_x$; $\varepsilon_y = R \cdot \varepsilon_x$; $R = NTU_y / NTU_x$

Number of **T**ransfer **U**nits: $NTU_i = k \cdot A / (\dot{M}_i \cdot c_{p,i})$

Kurzformeln für $1/\Theta$ mit $NTU_x = X$ und $NTU_y = Y$

und damit: $\varepsilon_x = X/(1/\Theta)$; $\varepsilon_y = Y/(1/\Theta)$

Hilfsfunktion: $\varphi(x) = \dfrac{x}{1 - \exp(-x)}$

Rührkessel, beidseitig*: $1/\Theta = X + 1 + Y$

Rührkessel, einseitig*: $1/\Theta = X + \varphi(Y)$

Gleichstrom: $1/\Theta = \varphi(X + Y)$

Gegenstrom: $1/\Theta = \varphi(X - Y) + Y$

Kreuzstrom**: $1/\Theta = \varphi(X/\varphi(Y)) \cdot \varphi(Y)$

*längsvermischt; **einseitig quervermischt

3. Wärmeleitung in Gasen (Kinetische Gastheorie)

$$\dot{q} = \alpha_{mol}(T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{s}(T_1 - T_2)\,; \quad \lambda = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \overline{w} \cdot \Lambda_{mol}$$

$\overline{w}$ – Geschwindigkeit der Moleküle

Λ_{mol} – freie Weglänge

$$\overline{w}_i = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{\tilde{R}T}{\tilde{M}_i}}\,; \quad \Lambda_{mol} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma_{mol}^2 \cdot \tilde{\rho} \cdot N_A}$$

σ_{mol} – Durchmesser der Moleküle

$\tilde{\rho}$ für ideales Gas aus: $\tilde{\rho} = p/(\tilde{R}T)$

$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} \dfrac{\text{Moleküle}}{\text{mol}}$; $\tilde{R} = 8{,}314 \dfrac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

4. Wärmeleitung instationär (WA Abschn. Ec)*

Kalorische Mitteltemperatur:

$$\overline{T}(t) = T_\infty + (T_A - T_\infty) \cdot \exp(-NTU_i)$$

$$NTU_i = \frac{k \cdot A}{\rho \cdot V \cdot c_p} \cdot t = \frac{a^* \cdot Fo}{1/Bi + 1/Nu_i} \quad \text{mit: } a^* = \frac{A \cdot L_c}{V}$$

$$Nu_i = \sqrt{Nu_{i\infty}^2 - b^2 + (Nu_{i0} + b)^2} \qquad b = 0{,}4$$

$$Nu_{i\infty} = \frac{4 + a^* + Bi}{1 + Bi/Nu_{\infty\infty}} \qquad \text{Langzeitasymptote}$$

$$Nu_{i0} = \frac{\sqrt{\pi} + 10Bi\sqrt{Fo}}{1 + 5Bi\sqrt{\pi \cdot Fo}} \cdot \frac{1}{\sqrt{Fo}} \qquad \text{Kurzzeitasymptote}$$

	Platte	Zylinder	Kugel
a^*	2	4	6
$Nu_{\infty\infty}$	$\pi^2/2$	5,78	$2\pi^2/3$
L_c	Plattendicke	Durchmesser	Durchmesser

Temperatur an der Oberfläche:

$$T_W(t) = T_\infty + \frac{(\overline{T}(t) - T_\infty)}{1 + Bi/Nu_{it}} \quad \text{(momentaner Wert } Nu_{i\,t}\text{)}$$

$$Nu_{it} = \sqrt{Nu_{i\infty}^2 - b_t^2 + (Nu_{it0} + b_t)^2} \qquad b_t = -0{,}4$$

$$Nu_{it0} = \frac{2{,}3\sqrt{\pi} + 2Bi\sqrt{Fo}}{2{,}3 + Bi\sqrt{\pi \cdot Fo}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{Fo}}$$

Nachhinken der Temperatur in der Mitte:

$$T_M(t) = \overline{T}(t - \Delta t)\,; \qquad \Delta t = \frac{\Delta Fo \cdot L_c^2}{\kappa} \quad \text{(Totzeit)}$$

$$\Delta Fo = \left(\frac{1}{\Delta Fo_\infty^m} + \frac{1}{Fo^m}\right)^{-1/m} \qquad m \approx 4$$

$$\frac{1}{\Delta Fo_\infty} = 16 + \frac{4a^*(12 + a^* + 2Bi)}{12 + a^* + Bi \cdot (2{,}71 + 0{,}015 \cdot a^*)}$$

Achtung: im Wa sind alle Kennzahlen mit $L_c/2$ gebildet

5. Strahlung (WA Abschn. Ka)*

Stefan-Boltzmann: $\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$

Linearisierte Form: $\dot{q}_{12} = \alpha_{rad}(T_1 - T_2)$; $\alpha_{rad} \approx 4 \cdot C_{12} \cdot T_m^3$

$$C_{12} = \frac{\varphi_{12} \cdot C_S}{1 + \varphi_{12} \cdot \{(1/\varepsilon_1 - 1) + (A_1/A_2) \cdot (1/\varepsilon_2 - 1)\}}$$

Schwarzer Strahler: $\varepsilon = 1$

$C_S = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W/(m^2K^4)$

Oft gilt für das Winkelverhältnis: $\varphi_{12} = 1$ (wenn A_1 vollständig von A_2 umschlossen und A_1 nicht konkav ist).

Allgemein gilt:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1}\int_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{s^2}\, dA_1\, dA_2$$

β_i - Winkel zw. Strahlungsrichtung und Flächennormale

Weiterhin gilt die Reziprozitätsbeziehung:

$A_1 \cdot \varphi_{12} = A_2 \cdot \varphi_{21}$

**VDI-Wärmeatlas 9. Auflage*

6. Wärmeübertragung an bewegte Festkörper

Wenn Längsleitung vernachlässigbar ist ($Pe >> 1$), erfolgt die Berechnung analog zur instationären Wärmeleitung mit Kontaktzeit: $t = L/u$ (s. Abschn. 5)

7. Rohr-, Kanalströmung (WA Abschn. Ga, Gb)*

Hier gilt für alle Kennzahlen: $L_c = d_h = 4f/U$

mit: d_h – hydraulischer Durchmesser;
f – Strömungsquerschnitt; U – benetzter Umfang

Rohr: $d_h = d_i$; Ebener Spalt: $d_h = 2s$ (Spaltweite s)

Laminare Strömung ($Re < 2300$)

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_1^3 + b^3 + (Nu_2 - b)^3 + Nu_3^3}$$

	b	Nu_1	Nu_2	Nu_3
Rohr	0,7	3,66	$1{,}615 \cdot \sqrt[3]{Gz}$	$\sqrt[6]{\dfrac{2}{1+22\cdot Pr}} \cdot \sqrt{Gz}$
Spalt	0,0	7,54	$1{,}849 \cdot \sqrt[3]{Gz}$	

Turbulente Strömung ($Re > 10^4$) (Gnielinski-Formel)

$$Nu = \frac{(\xi/8)\cdot Re \cdot Pr}{1 + 12{,}7(\xi/8)^{1/2}\left(Pr^{2/3} - 1\right)} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right)$$

$$\xi = (1{,}8 \cdot \lg Re - 1{,}5)^{-2}$$

Übergangsbereich ($2300 < Re < 10^4$)

lineare Interpolation zw. Nu_{lam} und Nu_{turb}:

$$Nu = (1-\gamma)\cdot Nu_{lam}(Re = 2300) + \gamma \cdot Nu_{turb}(Re = 10^4)$$

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} \qquad (0 \le \gamma \le 1)$$

8. Überströmte Einzelkörper (WA Abschn. Fe, Gd, Gf)*

Hier gilt für alle Kennzahlen:

$$L_c = \frac{\text{Wärmeübertragungsfläche}}{\text{Umfang der Projektionsfläche in Strömungsrichtung}}$$

$$Nu = Nu_{\min} + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}$$

	Platte*	Zylinder**	Kugel
$Nu_{\min}$	0	0,3	2
L_c	L	$\pi \cdot d_Z / 2$	d_K

** unendlich breite, dünne Platte* *** wenn gilt: $d_Z << L_Z$*

$$Nu_{lam} = \left(\frac{2}{1 + 22\cdot Pr}\right)^{1/6} \sqrt{Re_{res}\cdot Pr}$$

$$Nu_{turb} = \frac{0{,}037 \cdot Re_{res}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2{,}443 \cdot Re_{res}^{-0,1}\left(Pr^{2/3} - 1\right)}$$

$$Re_{res} = \sqrt{Re^2 + 0{,}4 \cdot Gr} \qquad Gr = \frac{g \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_\infty - \rho_W}{\rho_\infty}$$

wenn gilt: $\dfrac{\rho_\infty - \rho_W}{\rho_\infty} = \beta \cdot \Delta T$, dann für id. Gas: $\beta = \dfrac{1}{T_m}$

$$T_m = 0{,}5 \cdot (T_\infty + T_W)$$

Schleichende Strömung ($Re < 10$)

$Nu \ge 0{,}75 \cdot \sqrt[3]{Pe}$ (Zylinder) $\qquad Pe = Re_{res} \cdot Pr$

$Nu \ge 0{,}99 \cdot \sqrt[3]{Pe}$ (Kugel)

(Bei $Re < 10$ überprüfen, ob die Formel für schleichende Strömung nicht einen größeren Wert für Nu liefert.)

9. WÜ in Haufwerken (WA Abschn. Gj)*

$Nu_{HW} = f_a(\psi) \cdot Nu_{Einzelkörper}$ mit $\bar{u} = \dfrac{\dot{V}}{f \cdot \psi}$

Kugel: $f_a(\psi) = 1 + 1{,}5 \cdot (1 - \psi)$ Porosität: $\psi = \dfrac{V_{Lücken}}{V_{Gesamt}}$

10. Behältersieden (WA Abschn. Hab)*

$$\dot{q}_i = \alpha_i (T_W - T_S)$$

i = konvektives Sieden (K) oder Blasensieden (B)

hier gilt für alle Kennzahlen: L_c aus Abschn. 8

$Ra < 16{,}8 \cdot 10^6 \Rightarrow Nu_K = 0{,}60 \cdot (Ra)^{1/4}$ (laminar)

$Ra > 16{,}8 \cdot 10^6 \Rightarrow Nu_K = 0{,}15 \cdot (Ra)^{1/3}$ (turbulent)

$$\alpha_B = C_B \cdot \dot{q}^n$$

$n = 0{,}9 - 0{,}3 \cdot (p/p_C)^{0,3}$; für Wasser: $(p/p_C)^{0,15}$

p_C – kritischer Druck

Am Umschlagpunkt (ΔT_{Um}) ist $\alpha_B = \alpha_K$.

11. Kondensation reiner Dämpfe (WA Abschn. Ja)*

$Nu_K = \dfrac{\alpha \cdot \ell}{\lambda}$; char. Filmdicke: $\ell = \sqrt[3]{\left(\dfrac{\nu^2}{g}\right)}$; $Re = \dfrac{\dot{M}_K}{U \cdot \eta}$

$Nu_K = \sqrt[1,2]{(f_{Well} \cdot Nu_{lam})^{1,2} + Nu_{turb}^{1,2}}$ *U - Umfang d. Films*

$f_{Well} = Re^{0,04}$ ($Re \ge 1$); $\qquad f_{Well} = 1$ ($Re < 1$)

$$Nu_{lam} = \frac{4}{3\sqrt{2}} \cdot (X_\theta)^{-1/4} = \frac{4}{3} \cdot (3 \cdot Re)^{-1/3}$$

$X_\theta = \dfrac{\lambda(T_S - T_W)}{\eta \cdot \Delta h_V} \cdot \dfrac{L}{\ell} = \dfrac{Ph}{Pr} \cdot Ga^{1/3}$ L ist die Filmlänge

$$Nu_{turb} = \frac{0{,}02 \cdot Re^{7/24} Pr^{1/3}}{1 + 20{,}52 \cdot Re^{-3/8} Pr^{-1/6}}$$

Waagerechtes Rohr: $Nu_w = Nu(L = d_a) \cdot 0{,}77$

12. Verbesserung der Wärmeübertragung (Rippen)

Rippenwirkungsgrad: $\eta_R = \dfrac{T_G - \overline{T}_R}{T_G - T_W}$

Kinetik, lokal: $\dot{Q} = \alpha_G \cdot (\eta_R \cdot A_R + A_W) \cdot (T_G - T_W)$

ebene Rippe: $\eta_R = \dfrac{\tanh \zeta_h}{\zeta_h}$; $\zeta_h = h \cdot \sqrt{\dfrac{\alpha_G \cdot A_R}{\lambda_R \cdot V_R}}$

T_G	Gastemperatur
$\overline{T}_R$	integrale mittlere Rippentemperatur
T_W	Temperatur am Rippenfuß (Rohr)
h	Rippenhöhe
α_G	Wärmeübergangskoeffizient (Gas - Rippe)
A_R	Rippenoberfläche
A_W	freie Rohroberfläche (zwischen den Rippen)
λ_R	Wärmeleitfähigkeit des Rippenmaterials
V_R	Rippenvolumen

zum Wärmerohr (*heatpipe*) sie *WA Abschn. Ml**

**VDI-Wärmeatlas 9. Auflage*

13. Kinetik der Stoffübertragung *(WA Abschn. A*)*

Fick'sches Gesetz (Diffusionsstromdichte):

binär: $j_1 = -\delta_{12} \cdot \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial s}$

ideales Gas: $j_1 = -\delta_{12} \cdot \tilde{\rho}_g \cdot \frac{\partial \tilde{y}_1}{\partial s}$

Flüssigphase: $j_1 \approx -\delta_{12} \cdot \overline{\tilde{\rho}}_l \cdot \frac{\partial \tilde{x}_1}{\partial s}$

Gasphase: $\tilde{z}_i \equiv \tilde{y}_i$ Flüssigphase: $\tilde{z}_i \equiv \tilde{x}_i$

Stoffstromdichte: $\dot{n}_i = j_i + \dot{n}_{ges} \cdot \tilde{z}_i$

Stefan-Maxwell: $\tilde{\rho} \cdot \frac{\partial \tilde{z}_i}{\partial s} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\delta_{ij}} \cdot \left(\tilde{z}_i \cdot \dot{n}_j - \tilde{z}_j \cdot \dot{n}_i\right)$

binär erhält man: $\dot{n}_1 = -\delta_{12} \cdot \tilde{\rho} \cdot \frac{\partial \tilde{z}_1}{\partial s} + \dot{n} \cdot \tilde{z}_1$

daraus folgt: $\dot{n}_1 = \dot{r}_1 \cdot \underbrace{\frac{\delta_{12}}{s}}_{\beta_{12}} \cdot \tilde{\rho} \cdot ln\left(\frac{\dot{r}_1 - \tilde{z}_{1,s}}{\dot{r}_1 - \tilde{z}_{1,0}}\right)$; $\dot{r}_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}}$

Für polynäre Systeme gilt, wenn alle δ_{ij} gleich sind:

$$\dot{n} = \beta_{ij} \cdot \tilde{\rho} \cdot ln\left(\frac{\dot{r}_i - \tilde{z}_{i,s}}{\dot{r}_i - \tilde{z}_{i,0}}\right) \Rightarrow \dot{n}_i = \dot{r}_i \cdot \dot{n}$$

äquimolare Diffusion oder $\tilde{z}_1 \rightarrow 0$:

$$\dot{n}_1 = \beta_{12} \cdot \tilde{\rho} \cdot \left(\tilde{z}_{1,0} - \tilde{z}_{1,s}\right)$$

einseitige Diffusion $\dot{r}_1 = 1$ und $\dot{n}_1 = \dot{n}$:

$$\dot{n}_1 = \beta_{12} \cdot \tilde{\rho} \cdot ln\left(\frac{1 - \tilde{z}_{1,s}}{1 - \tilde{z}_{1,0}}\right)$$

Achtung: Integration von ***0*** nach ***s*** immer in Richtung der in der Bilanz angenommenen Stoffstromrichtung.

Stefan-Korrektur: Überführung des logarithmischen Ansatzes auf linearen Ansatz:

$$\Rightarrow \dot{n}_i = \dot{n}_{i,lin} \cdot K_S \text{ mit: } K_S = \frac{\dot{r}_i \cdot ln\left(\frac{\dot{r}_i - \tilde{z}_{i,s}}{\dot{r}_i - \tilde{z}_{i,0}}\right)}{\tilde{z}_{i,0} - \tilde{z}_{i,s}}$$

Ackermann-Korrektur: Berücksichtigt den Einfluss der Stoffübertragung (zusätzl. Enthalpiestrom) auf den Wärmeübergang (z.B. Verdunstung, Kondensation,…)

$$\Rightarrow \dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot K_A \cdot \left(T_0 - T_s\right)$$

mit: $K_A = \frac{\Phi}{1 - e^{-\Phi}}$ und $\Phi = \frac{\sum \dot{n}_i \cdot \tilde{c}_{p,i}}{\alpha}$

$\Phi < 0$ wenn Stoffstrom antiparallel zum Wärmestrom

14. Thermodynamische Grundlagen

ideales Gas: $p = \tilde{\rho} \cdot \tilde{R} \cdot T$

Dalton: $p_i = \tilde{y}_i \cdot p$

Raoult: $p_i = \gamma_i \cdot \tilde{x}_i \cdot p_i^*(T) = a_i \cdot p_i^*(T)$

Näherung für $p_i^*(T)$ z. B. durch Antoine-Gleichung

Henry: $p_i = \tilde{x}_i \cdot H_i$

Relative Feuchte: $\varphi_i(T) = p_i / p_i^*(T)$

15. Gasdiffusion durch Membranen von $A \rightarrow B$

$\dot{N}_i = A_{Poren} \cdot \beta_i^\theta \cdot \left(\tilde{C}_i^A - \tilde{C}_i^B\right)$

$\dot{N}_i = A_{Poren} \cdot \beta_i^\theta \cdot \tilde{\rho} \cdot \left(\tilde{y}_i^A - \tilde{y}_i^B\right)$ (wenn: $\tilde{\rho} = const.$)

$A_{Poren} = \psi_{Membran} \cdot A_{Membran}$, $d = d_{Pore}$, $L = L_{Pore}$

$\overline{w}_i = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{\tilde{R}T}{\tilde{M}_i}}$; $\Lambda_{mol} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma_{mol}^2 \cdot \tilde{\rho} \cdot N_A}$

weitere Definitionen siehe Abschnitt 3.

Knudsen-Diffusion:

$\underline{d << \Lambda_{mol}, L << \Lambda_{mol}}$: $\beta_i^\theta = {}_{\max}\beta_i^\theta = \frac{1}{4} \cdot \overline{w}_i$

$\underline{d << \Lambda_{mol}, L >> \Lambda_{mol}}$: $\beta_i^\theta = \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{L} \cdot {}_{\max}\beta_i^\theta = \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{L} \cdot \overline{w}_i$

$\underline{d >> \Lambda_{mol}}$: siehe Abschn. 13

16. Analogie Wärme- und Stoffübertragung

Impuls	$"\gamma" = \tau_W / \Delta u$	η	Po	1	$Fo = \nu \cdot t / L_c^2$
Wärme	$\alpha = \dot{q}_W / \Delta T$	λ	Nu	Pr	$Fo = \kappa \cdot t / L_c^2$
Stoff	$\beta = \dot{n}_W / \Delta\tilde{c}$	δ	Sh	Sc	$Fo = \delta \cdot t / L_c^2$

Po=*Po*(*Re*); *Nu*=*f*(*Re*, *Pr*, d_h/L); *Sh*=*f*(*Re*, *Sc*, d_h/L)

oder:

Re=*Re*(*Hg*); *Nu*=*f*(*Hg*, *Pr*, d_h/L); *Sh*=*f*(*Hg*, *Sc*, d_h/L)

Analogie Impuls/Wärme und Impuls/Stoff:
Prandtl-Analogie: (klassisch) für ausgebildete turbulente Rohrströmung (siehe Abschn. 8)
Lévêque-Analogie: (***neu***, seit 1996) gut geeignet für räumlich periodische Anlaufvorgänge in Schüttungen, Rohrbündeln, Stabbündeln, Plattenwärmeübertragern, etc.

$$Nu / Pr^{1/3} = Sh / Sc^{1/3} = 0{,}404 \cdot \left[\left(2x_f\right) \cdot Hg \cdot d_h / L\right]^{1/3}$$

x_f - Reibungsanteil, meist gilt: $2x_f \approx 1$

Analogie Wärme/Stoff:
Zur Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten $\boldsymbol{\beta}$ werden die gleichen Korrelationen verwendet, wie für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\boldsymbol{\alpha}$. Dabei wird lediglich ***Nu*** durch ***Sh*** und ***Pr*** durch ***Sc*** ersetzt.

Lewis'sches Gesetz: $\frac{\alpha}{\beta} = \tilde{\rho} \cdot \tilde{c}_p \cdot Le^{1-n}$

mit: $n = 1/3$ für *Re* = laminar
$n = 0{,}42$ für *Re* = turbulent

und: $\tilde{c}_p = \sum_{i=1}^{n} \tilde{y}_i \cdot \tilde{c}_{p,i}$

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\kappa}{\delta_{ij}} = \frac{\lambda}{\tilde{\rho} \cdot \tilde{c}_p \cdot \delta_{ij}}$$

17. Dimensionslose Kennzahlen (WA Abschn. Ba)*

$Bi = \alpha_a \cdot L_c / \lambda_i$	Biot-Zahl	
$Fo = \kappa \cdot t / L_c^2$	Fourier-Zahl	$\kappa = \lambda / (\rho \cdot c_p)$
$Ga = g \cdot L_c^3 / \nu^2$	Galilei-Zahl	
$Gr = g \cdot L_c^3 \cdot \Delta\rho / (\rho \nu^2)$	Grashof-Zahl	
$Gz = Re \cdot Pr \cdot d_h / L$	Graetz-Zahl	
$Hg = (\Delta p / \Delta z) \cdot L_c^3 / (\rho \nu^2)$	Hagen-Zahl	
$Le = Sc / Pr$	Lewis-Zahl	
$Nu = \alpha \cdot L_c / \lambda$	Nusselt-Zahl	
$Pe = Re \cdot Pr$	Peclet-Zahl	
$Ph = c_p (T_S - T_W) / \Delta h_V$	Phasenumwandlungszahl	
$Po = "\gamma" \cdot L_c / \eta$	Poisseuille-Zahl	
$Pr = \nu / \kappa$	Prandtl-Zahl	$\kappa = \lambda / (\rho \cdot c_p)$
$Ra = Gr \cdot Pr$	Rayleigh-Zahl	
$Re = \bar{u} \cdot L_c / \nu$	Reynolds-Zahl	
$Sc = \nu / \delta$	Schmidt-Zahl	
$Sh = \beta \cdot L_c / \delta$	Sherwood-Zahl	

18. Umrechnung Konzentrationen (binär)

	$\tilde{x}_1$	$\tilde{X}_1$	x_1	X_1
$\tilde{x}_1$	$\dfrac{n_1}{\sum n_i}$	$\dfrac{\tilde{X}_1}{1+\tilde{X}_1}$	$\dfrac{x_1}{x_1\left(1-\frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2}\right)+\frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2}}$	$\dfrac{X_1}{X_1+\frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2}}$
$\tilde{X}_1$	$\dfrac{\tilde{x}_1}{1-\tilde{x}_1}$	$\dfrac{n_1}{n_2}$	$\dfrac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} \cdot \dfrac{x_1}{1-x_1}$	$\dfrac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1} \cdot X_1$
x_1	$\dfrac{\tilde{x}_1}{\tilde{x}_1\left(1-\frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1}\right)+\frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1}}$	$\dfrac{\tilde{X}_1}{\tilde{X}_1+\frac{\tilde{M}_2}{\tilde{M}_1}}$	$\dfrac{M_1}{\sum M_i}$	$\dfrac{X_1}{1+X_1}$
X_1	$\dfrac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} \cdot \dfrac{\tilde{x}_1}{1-\tilde{x}_1}$	$\dfrac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} \cdot \tilde{X}_1$	$\dfrac{x_1}{1-x_1}$	$\dfrac{M_1}{M_2}$

19. Berechnung der Gemischdichte

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \sum_i \frac{z_i}{\rho_i}$$ (Gasphase: $z_i \equiv y_i$; Flüssigphase: $z_i \equiv x_i$)

20. Geometrische Zusammenhänge

	Volumen	Oberfläche
Kugel	$V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 = \frac{\pi}{6} d^3$	$A = 4\pi \cdot r^2 = \pi \cdot d^2$
Zylinder	$V = \pi r^2 L = \frac{\pi}{4} d^2 L$	$A = 2\pi r \cdot L = \pi \cdot d \cdot L$

	Fläche	Umfang
Kreis	$A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi}{4} d^2$	$U = 2\pi \cdot r = \pi \cdot d$

21. Symbolverzeichnis

A	[m]	Oberfläche
a^*	[-]	geometrischer Faktor
$\tilde{C}$	[mol/m³]	molare Konzentration
c_p	[J/kg·K]	isobare spez. Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser
$\dot{E}$	[W]	Energiestrom
f	[m²]	Querschnitt
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
Δh_v	[J/kg]	Verdampfungsenthalpie
j	[mol/(m²·s)]	Diffusionsstromdichte
k	[W/m²K]	Wärmedurchgangskoeffizient
L_c	[m]	charakteristische Länge
L	[m]	Länge
$\tilde{M}$	[kg/mol]	Molmasse
$\dot{M}$	[kg/s]	Massenstrom
$\dot{m}$	[kg/(m²·s)]	Massenstromdichte
$\dot{N}$	[mol/s]	molarer Stoffstrom
$\dot{n}$	[mol/(m²·s)]	Stoffstromdichte
p	[Pa]	Druck
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$\dot{q}$	[W/m²]	Wärmestromdichte
r	[m]	Radius
$\dot{r}$	[-]	relativer Stoffstrom
s	[m]	Abstand, Dicke
T	[K]	Temperatur
t	[s]	Zeit
U	[m]	Umfang
u	[m/s]	Geschwindigkeit
V	[m³]	Volumen
$\tilde{X}$	[-]	molare Beladung Flüssigkeit
$\tilde{x}$	[-]	Molenbruch Flüssigkeit
$\tilde{Y}$	[-]	molare Beladung Gasphase
$\tilde{y}$	[-]	Molenbruch Gasphase
z	[m]	Ortskoordinate
α	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient
β_{ij}	[m/s]	Stoffübergangskoeffizient
β	[K^{-1}]	Ausdehnungskoeffizient
$"\gamma"$	[Pa·s/m]	“Impulsübergangskoeffizient“
δ_{ij}	[m²/s]	Diffusionskoeffizient
ε	[-]	Wirkungsgrad
ε	[-]	Emissionsgrad (bei Strahlung)
φ	[-]	relative Luftfeuchte
η	[Pa·s]	dynamische Viskosität
κ	[m²/s]	Temperaturleitfähigkeit
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
ν	[m²/s]	kinematische Viskosität
θ	[-]	normierte Temperatur
ξ	[-]	Widerstandsbeiwert
ρ	[kg/m³]	Dichte
ψ	[-]	Porosität