

Wärmeübergang

Natürliche Strömung

In unbegrenzten Raum:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

Gültig: Gr·Pr	C	n
1·10 ⁻⁴ - 1·10 ⁻³	0,5	0
1·10 ⁻³ - 5·10 ²	1,18	1/8
5·10 ² - 2·10 ⁷	0,54	1/4
2·10 ⁷ - 1·10 ¹³	0,135	1/3

Charakteristische Länge:

- für Kugeln und horizontale Rohre: Ausendurchmesser,
- für vertikale Platten und Rohre: Höhe,
- für horizontale Platten: kürzere Kante,
- falls Wärmeübergang auf der oberen Seite der horizontalen Platten geschieht, dann die Wärmeübergangszahl mit 30 % erhöht werden muss, falls Wärmeübergang auf der unteren Seite der horizontalen Platten geschieht, dann die Wärmeübergangszahl mit 30 % verringert werden muss.

Charakteristische Temperatur:

$$t = \frac{1}{2} \cdot (t_W - t_\infty),$$

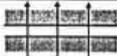
wo t_W die Temperatur der Oberfläche und t_∞ die Temperatur des Mediums fern von der Oberfläche sind.

In begrenzten Raum:

Nach NIEMAN: Wärmestromdichte in der Lücke zwischen ebenen Platten oder Zylinderoberflächen, die nah zu einander legen:

$$\dot{q} = \frac{\lambda_e}{\delta} \cdot (t_1 - t_2), \quad \text{wo} \quad \frac{\lambda_e}{\lambda} = 1 + \frac{m \cdot (Gr \cdot Pr)^r}{(Gr \cdot Pr) + n},$$

wo δ die Größe der Lücke und auch die charakteristische Länge und λ die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes in der Lücke sind. Charakteristische Temperatur ist die mittlere Temperatur des Mediums. Die Werte der Konstanten m , n und r für einigen Fällen:

Gültig: (Gr·Pr) < 10 ⁸		m	n	r
I.		0,119	1,45·10 ⁴	1,27
II.		0,07	0,32·10 ⁴	1,333
III.		0,0236	1,01·10 ⁴	1,393
IV.		0,043	0,41·10 ⁴	1,360
V.		0,025	1,30·10 ⁴	1,360

Erzwungene Strömung in Rohren und Kanälen

$$\text{Nu} = \max \left\{ \left[3,66^3 + 1,61^3 \left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{d}{l} \right) \right]^{1/3}, \frac{X}{Y} \right\} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_W} \right)^{0,11},$$

wo

$$X = \left(\frac{\xi}{8} \right) \cdot (\text{Re} - 1000) \cdot \text{Pr} \cdot \left(1 + \frac{d}{l} \right)^{2/3},$$

nach GNIELINSKI:

$$Y = 1 + 12,7 \cdot \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}},$$

nach FILONENKO:

$$\xi = \frac{1}{(1,82 \cdot \log_{10} \text{Re} - 1,64)^2}.$$

Gültig: $0 < \text{Re} < 10^6$, $0 < \frac{d}{l} < 1$, $0,5 < \text{Pr} < 1000$.

Charakteristische Größe ist der Innendurchmesser des Rohres.

Charakteristische Temperatur ist die mittlere Temperatur des Mediums.

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der Strömung.

Im Fall von Strömungen in nichtkreisquerschnittliche Rohren muss man einen äquivalente Durchmesser d_e benutzen:

$$d_e = 4 \cdot \frac{A}{U},$$

wo A der Strömungsquerschnitt und U der nässliche Umfang sind.

Im Fall von gebogenen Rohren die Wärmeübergangszahl erhöht sich:

$$\alpha_R = \left(1 + 1,77 \cdot \frac{d}{R} \right) \cdot \alpha_{\text{gerade}},$$

wo R die Krümmungsradius und d der Durchmesser des Rohres sind.

Wärmeübergang umströmter Körper bei erzwungener Strömung

Wärmeübergang bei Strömung neben ebener Platten

Die Nusselt-Zahl kann mit den folgenden Formeln abhängig von Reynolds-Zahl bestimmt werden:

$$\text{Re} < 10^5 : \text{Nu}_{\text{lam}} = 0,664 \cdot \sqrt{\text{Re}} \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}}, \quad \text{Re} > 5 \cdot 10^5 : \text{Nu}_{\text{turb}} = \frac{0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}}{1 + 2,443 \cdot \text{Re}^{-0,1} (\text{Pr}^{0,66} - 1)},$$

und in dem Intervall $10 < \text{Re} < 10^7$ ist die folgende Formel nach GNIELINSKI anwendbar:

$$\text{Nu} = \sqrt{\text{Nu}_{\text{lam}}^2 + \text{Nu}_{\text{turb}}^2} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_W} \right)^{0,25}.$$

Charakteristische Größe ist die Länge in der Richtung der Strömung.

Charakteristische Temperatur ist die Temperatur der ungestörten Strömung.

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der ungestörten Strömung.

Pr_W ist die Prandtl-Zahl des Mediums auf der Temperatur der Wand.

Wärmeübergang bei Strömung senkrecht zu einem einzigen Zylinder mit Kreisquerschnitt

Die Nusselt-Zahl kann mit der folgenden Formel abhängig von Reynolds-Zahl bestimmt werden:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\Psi.$$

Re	C	n
10...10 ³	0,5	0,5
10 ³ - 2·10 ⁵	0,25	0,6

Die Werte des Korrektionsfaktors ε_Ψ in der Funktion des Strömungswinkels Ψ :

Ψ	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_Ψ	1,00	1,00	0,98	0,94	0,87	0,76	0,66	0,60	0,56

Charakteristische Größe ist der Ausendurchmesser des Rohres.

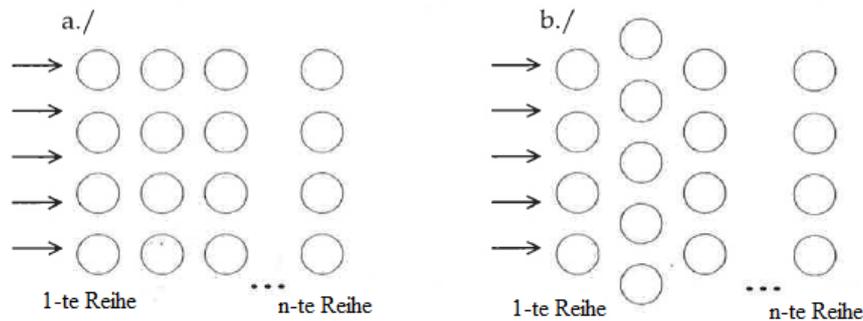
Charakteristische Temperatur ist die Temperatur der ungestörten Strömung.

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der ungestörten Strömung.

Pr_W ist die Prandtl-Zahl des Mediums auf der Temperatur der Wand.

Ψ ist der Strömungswinkel (der Winkel zwischen der Richtung der Strömung und der Achse des Rohres).

Wärmeübergang bei Strömung senkrecht zu einem Bündel besteht aus Röhre mit Kreisquerschnitt



Reihen Arrangement (a):

Schachbrett Arrangement (b):

$$Nu = 0,23 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\Psi,$$

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\Psi,$$

$$\alpha_{\text{Bündel}} = \frac{0,6 \cdot A_1 + 0,9 \cdot A_2 + A_3 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots} \cdot \alpha.$$

$$\alpha_{\text{Bündel}} = \frac{0,6 \cdot A_1 + 0,7 \cdot A_2 + A_3 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots} \cdot \alpha.$$

Gültig: $2 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Charakteristische Größe ist der Ausendurchmesser eines Rohres der Bündel.

Charakteristische Temperatur ist die mittlere Temperatur des Mediums.

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit in dem engsten Querschnitt.

A_i ist die Oberfläche der i -ter Rohrreihe.

Wärmeübergang mit Phasenänderung

Blasenverdampfen von Wasser in großen Volumen

Nach MIHEJEV: gültig für $\dot{q}_W < \dot{q}_{\text{krit}}$ und $p_S = 0, 2 \dots 100$ bar:

$$\alpha = 2.656 \cdot p^{0,176} \cdot \dot{q}_W^{0,7},$$
$$\alpha = 25.95 \cdot p^{0,587} \cdot (t_W - t_S)^{2,333}.$$

Maßeinheiten: $\alpha : \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, $\dot{q}_W : \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $p : \text{bar}$, weiterhin t_S ist die Sättigungstemperatur und t_W ist die Wandtemperatur.

Kritische Wärmebelastung in Funktion von Sättigungsdruck für Wasser:

p, bar	0,2	1	10	20	30	40	50	100
$\dot{q}_{\text{krit}} \cdot 10^{-6}, \text{W/m}^2$	0,55	1,2	1,8	2,4	3	3,5	3,9	3,7

Blasenverdampfen von beliebiger Flüssigkeit in großen Volumen

Nach BORISANSZKI:

$$\alpha = 0,1011 \cdot p_C^{0,69} \cdot \dot{q}_W^{0,7} \cdot f(p_R),$$
$$\alpha = 4,81 \cdot 10^{-4} \cdot p_C^{2,30} \cdot (t_W - t_S)^{2,333} \cdot [f(p_R)]^{3,333},$$

wo für Freons:

$$f(p_R) = 0,7 + 2 \cdot p_R \cdot \left(4 + \frac{1}{1 - p_R}\right),$$

und für andere Medien:

$$f(p_R) = 1,8 \cdot p_R^{0,17} + 4 \cdot p_R^{1,2} + 10 \cdot p_R^{10},$$

hier p_C ist der kritische Druck des Mediums und $p_R = \frac{p}{p_C}$ ist der reduzierte Druck.

Maßeinheiten: $\alpha : \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, $\dot{q}_W : \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $p : \text{bar}$.

Wärmeübergang bei Kondensation von Dämpfen

Falls die Reibung auf der Dampf-Flüssigkeit Oberfläche vernachlässigbar und der Flüssigkeitsfilm laminar ist, dann die durchschnittliche Wärmeübergangszahl ist nach NUSSELT mit der folgenden Formel bestimmbar:

$$\alpha_H = 0,943 \cdot \left(\frac{1}{H \cdot \Delta t} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot r}{\mu} \right)^{1/4}.$$

Gültig: $(H \cdot \Delta t) < (H \cdot \Delta t)_{\text{lam}}$.

Grenzwerten für Wasser:

t_S	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$(H \cdot \Delta t)_{\text{lam}}$	590	310	200	140	108	85	70	59	52	45,5
t_S	130	150	170	190	200	250	300	350	374	
$(H \cdot \Delta t)_{\text{lam}}$	34	25	20	16,5	15	11	8,1	4,9	0	

Falls der Wert von $(H \cdot \Delta t)$ ist größer als der Grenzwert in der obenen Tabelle, dann die durchschnittliche Wärmeübergangszahl ist nach GRIGULL mit der folgenden Formel bestimmbar:

$$\alpha_H = 0,003 \cdot (H \cdot \Delta t)^{1/2} \cdot \left(\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g}{r \cdot \mu^3} \right)^{1/2}.$$

Gültig: $(H \cdot \Delta t) > (H \cdot \Delta t)_{\text{lam}}$.

Notationen:

Charakteristische Temperatur: $t = \frac{1}{2}(t_W + t_S)$,

α_H durchschnittliche Wärmeübergangszahl,

H vertikale Länge der Bildung von Flüssigkeitsfilm (bei horizontalen Rohren die Ausendurchmesser, dann $\alpha_{\text{wahr}} = 0,77 \cdot \alpha_{\text{berechnet}}$),

$\Delta t = (t_S - t_W)$, t_S die Sättigungstemperatur und t_W die Temperatur der Oberfläche sind,

μ dynamische Viskosität,

λ die Wärmeleitzahl der Flüssigkeit auf der charakteristische Temperatur,

ρ die Dichte der Flüssigkeit auf der charakteristische Temperatur,

r die Verdampfungswärme auf der Sättigungstemperatur t_S .