

1 Thermodynamik

| | | | |
|-------------------|-------------------------|---|--|
| isotherm: | $\Delta u = 0$ | $\Delta T = 0$ | $\Delta w = +R T \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = -R T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$ |
| isobar: | $\Delta w = R \Delta T$ | $\Delta p = 0 \Rightarrow \int v \mathrm{d}p = 0$ | $\Delta h = \Delta q_a$ wenn $\Delta q_R = 0$ |
| isochor: | | $\Delta v = 0 \Rightarrow \int p \mathrm{d}v = 0$ | $\Delta u = \Delta q_a$ wenn $\Delta q_R = 0$ |
| Enthalpie: | $h = u + pv = u + RT$ | Molare Masse: | $M = \frac{m}{n}$ |

1. HS: $\Delta h = \Delta q_a + \Delta q_R + \int v \mathrm{d}p$ $\Delta u = \Delta q_a + \Delta q_R - \int p \mathrm{d}v$ $\Delta Q + \Delta W = \Delta U + \Delta E_a$

2. HS: $\Delta q_{rev} = \Delta q_a + \Delta q_R = \int T \mathrm{d}s$

1.1 Ideales Gas

| | | | |
|--|--|---------------------------|----------------------------|
| $v_{mn} = 22,414 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}}$ | $V_n = n v_{mn}$ | $R = \frac{R_m}{M}$ | $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ |
| $R_m = 8314,47 \frac{\text{J}}{\text{kmol K}}$ | $p v = R T$ | $p V = m R T$ | $p V = n R_m T$ |
| $c_p = \frac{c_{pm}}{M} = R + c_v = R \frac{\kappa}{\kappa - 1}$ | $c_p = c_p _{t_1}^{t_2} = \frac{c_p _0^{t_2} \cdot t_2 - c_p _0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$ | $\Delta u = c_v \Delta T$ | $\Delta h = c_p \Delta T$ |

$$\Delta s = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = c_p \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + c_v \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Isentrope: $\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ $p v^\kappa = p_1 v_1^\kappa = \text{konst.}$

$$\int p \mathrm{d}v = \frac{1}{\kappa - 1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right] \quad \int v \mathrm{d}p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

Polytrope analog mit: $n = \frac{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)} = 1 - \frac{\ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}{\ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right)}$ statt κ

1.2 Gemische idealer Gase – Species i

| | | | |
|---|---|-----------------------------|-------------------------|
| $y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{V_i}{V} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}} = \frac{p_i}{p}$ | $w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = y_i \frac{M_i}{M}$ | $M = \sum y_i M_i$ | $M_i = \frac{m_i}{n_i}$ |
| $c_p = \sum c_{pi} w_i$ | analog für: $c_v, \Delta u, \Delta h, \Delta s$ | $c_{mp} = \sum y_i c_{mpi}$ | $\dot{V} = A c$ |

1.3 Inkompressible Flüssigkeiten

| | | |
|---------------------------|--|---|
| $c_v = c_p$ | $v = \frac{1}{\rho} = \text{konst.}$ | $\dot{m} = \dot{V} \rho$ |
| $\Delta u = c_p \Delta T$ | $\Delta h = c_p \Delta T + v \Delta p$ | $\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$ |

1.4 Gemische mischbarer, inkompressibler Flüssigkeiten – Species i

| | | | |
|---|---|---|-----------------------|
| $m_i = \frac{V_i}{v_i}$ | $v = \sum v_i w_i$ | $m = \sum m_i$ | $w_i = \frac{m_i}{m}$ |
| $c_p = \sum c_{pi} w_i$ | analog für $\Delta u, \Delta h, \Delta s$ | $\Delta s_i = c_{pi} \ln \left(\frac{T_{2i}}{T_{1i}} \right) + R_i \ln \left(\frac{v_{2i}}{v_{1i}} \right)$ | |
| $x_i = w_i \frac{M}{M_i} = \varphi_i \frac{v_i M_i}{v M}$ | $w_i = x_i \frac{M_i}{M} = \varphi_i \frac{v}{v_i}$ | $\varphi_i = x_i \frac{v M}{v_i M_i} = w_i \frac{v_i}{v}$ | |

1.5 Nassdampf: $u' = \text{Wasser}$, $u'' = \text{Dampf}$

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{u - u'}{u'' - u'}$$
$$u = (1 - x) u' + x u'' \quad u = u' + x (u'' - u') \quad \text{analog für: } v, h, s$$

1.6 Geschlossene Systeme

$$\Delta w_v = - \int p \, dv$$

1.7 Offene Systeme

$$\Delta U + \Delta E_a = \Delta Q_a + \Delta W_i + \sum \Delta m_j (h_j + e_{aj})$$

1.8 Einseitig offene Systeme

Einströmung – ideales Gas: $T_2 = T_1 \frac{\kappa}{1 + \frac{p_1}{p_u}(\kappa - 1)} \quad \Delta m = \frac{m_1 (T_2 - T_1)}{\kappa T_1 - T_2}$

Einsaugen, Ausstoßen: $\Delta W_v = -p \, \Delta V$

1.9 Ruhende, stationäre, 2-seitig offene Systeme

$$\Delta h + \Delta e_a = \Delta q_a + \Delta w_i \quad \Delta h = \Delta q_a + \Delta q_R + \int v \, dp \quad \int v \, dp + \Delta q_R + \Delta e_a = \Delta w_i$$

1.10 Wirkungsgrade

Verdichtung: $\eta_{is} = \frac{\Delta w_{s=\text{konst.}}}{\Delta w_i} \quad \eta_{it} = \frac{\Delta w_{T=\text{konst.}}}{\Delta w_i} \quad \eta_a = \frac{\Delta w_i}{\Delta w_{eff}} \quad \eta_{eff} = \eta_i \eta_a$

Entspannung: $\eta_{is} = \frac{\Delta w_i}{\Delta w_{s=\text{konst.}}} \quad \eta_{it} = \frac{\Delta w_i}{\Delta w_{T=\text{konst.}}} \quad \eta_a = \frac{\Delta w_{eff}}{\Delta w_i} \quad \eta_{eff} = \eta_i \eta_a$

Wärmeübertragung: $\eta_{wue} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$

1.11 Ruhende, stationäre, 3-seitig offene Systeme

Mischung der Ströme i: $\sum m_i \Delta h_i = 0$

1.12 Ruhende, stationäre, 4-seitig offene Systeme

Wärmeübertrager: $\sum m_i \Delta h_i = 0$

Verdichter + Turbine: $P_{vi} + P_{T,eff} = 0$ montiert auf einer Welle

1.13 Kreisprozesse

Allgemein: $\eta_{therm} = \frac{|\Delta w_{ab}|}{\Delta q_{zu}} \quad EER = \frac{\Delta q_{zu}}{\Delta w_{zu}} \quad COP = \frac{|\Delta w_{ab}|}{\Delta w_{zu}}$

Carnot: $\eta_{therm} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad EER = \frac{T_{zu}}{T_{ab} - T_{zu}} \quad COP = \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}}$

Joule: $\eta_{therm,max} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

Gütegrad: $\eta_G = \frac{EER}{EER_{Carnot}} \quad \eta_G = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$

1.14 Exergie

Arbeit: $e = \Delta w_{eff}$

Geschlossenes System: $e = u - u_u - T_u (s - s_u) - p_u (v_u - v)$

Fluid Strom: $e = h - h_u - T_u (s - s_u)$

Wärme: $e = \left(1 - \frac{T_u}{T}\right) dq_a \cong \left(1 - \frac{T_u}{T_m}\right) \Delta q_a$

Exergetischer Wirkungsgrad: $\zeta = \frac{e_{ab}}{e_{zu}}$

2 Strömungslehre

Dazu gehört auch die THD Formelsammlung. Notiz: $\rho \neq p = \text{Druck}$, $\nu \neq v$

2.1 Hydrostatik

i kennzeichnet eine beliebige Richtung z.B. x, y, z oder die Richtung einer schrägen Wand s

S kennzeichnet den Schwerpunkt

Druckgradient: $\frac{\partial p}{\partial x_i} = \rho f_i$ Für $f_z = g$ ist der Überdruck $p_{\ddot{u}(z)} = \rho g z$ $g, z \downarrow$

Exzentrizität: $e_{Si} = \frac{I_{Si}}{s_{Si} A}$ Vertikale Wandkraft: $F_{wi} = p_{\ddot{u},S} A_i$

s_{Si} Lage des Flächenschwerpunkts S von Oberfläche in Richtung i

I_{Si} Flächenträgheitsmoment in Richtung i um horizontale Achse durch Schwerpunkt S

Horizontale Wandkraft $F_{wz} = \text{Gewicht des darüberliegenden Fluids}$

Rechteckiger Deckel mit Breite a , Höhe b : $I_{Ss} = \frac{a b^3}{12}$ $A = a b$ $e_{Ss} = \frac{b^2}{12 s_{Ss}}$

Kreisförmiger Deckel mit Radius r : $I_{Ss} = \frac{r^4 \pi}{4}$ $A = r^2 \pi$ $e_{Ss} = \frac{r^2}{4 s_{Ss}}$

Gleichschenkeliges Dreieck, Basis a , Höhe b : $I_{Ss} = \frac{a b^3}{36}$ $A = \frac{a b}{2}$ $e_{Ss} = \frac{b^2}{18 s_{Ss}}$

Statische Auftriebskraft an der Unterseite eines eingetauchten Körpers: $F_A = \rho_{Fl} g V_{K, \text{eingetaucht}}$

Horizontal beschleunigte Flüssigkeiten: $p_{\ddot{u}(x,z)} = -\rho a x - \rho g (z - z_0)$ $z_0 = h_0 + \frac{a}{g} x_S$

Spiegeloberfläche Neigung $\alpha = \arctan \frac{a}{g}$ $z_{(x)} = z_0 - \frac{a}{g} x$

Rotierend beschleunigte Flüssigkeiten: $p_{\ddot{u}(r,z)} = \frac{\rho}{2} r^2 \omega - \rho g (z - z_0)$ $z_0 = h_0 - \frac{I_p \omega^2}{2 g A}$

Spiegeloberfläche $I_p = I_{pS} + r_S^2 A$ $z_{(r)} = z_0 + \frac{r^2 \omega^2}{2 g}$

I_{pS} polare Trägheitsmoment um Schwerpunkt S r_S ist der Abstand vom Schwerpunkt zur Drehachse

2.2 Aerostatik

Standardatmosphäre $n = 1,235$ $p_0 = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$ $T_0 = 15^\circ \text{C} = 288,15 \text{ K}$ $H_0 = 8430 \text{ m}$

$$\frac{p(z)}{p_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{z}{H_0}\right)^{\frac{n}{n-1}} \quad \frac{T(z)}{T_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{z}{H_0}\right) \quad \frac{\rho(z)}{\rho_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{z}{H_0}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

2.3 Massenbilanz MB

$$\sum \dot{m}_{\text{ein}} - \sum \dot{m}_{\text{aus}} = 0 \quad \dot{m} = \rho \dot{V} \quad \dot{V} = A c \quad c \perp A$$

2.4 Energiebilanz EB, siehe auch THD

$$\Delta h + \Delta \frac{c^2}{2} + g \Delta z = \Delta q_a + \Delta w_i \quad \Delta h = \Delta q_a + \Delta q_R + \int v \, dp$$

$$\int v \, dp + \Delta q_R + \Delta \frac{c^2}{2} + g \Delta z = \Delta w_i \quad \text{Inkompressibel: } \frac{\Delta p}{\rho} + \Delta q_R + \Delta \frac{c^2}{2} + g \Delta z = \Delta w_i$$

2.5 Impulsmomentenbilanz um Achse i IB_i

c_i ist die Geschwindigkeitskomponente in Richtung i (relativ zum bewegten Kontrollvolumen)

$$\sum \dot{I}_{ein} - \sum \dot{I}_{ein} + \sum F_{p,i} + \sum F_{R,i} + \sum F_{g,i} = 0 \quad \dot{I} = \dot{m} c_i \quad F_{p,i} = p \ddot{u} A_i \quad F_{R,i} = \tau_W A_{Wi} \quad F_{g,i} = m g_i$$

2.6 Impulsbilanz in Richtung i IB_i

c_n ist die Geschwindigkeit projiziert auf die Normalebene der Achse i

r_i ist der Hebelarm zur Achse i in der Normalebene der Achse i

$$\sum \dot{L}_{ein} - \sum \dot{L}_{ein} + \sum M_{p,i} + \sum M_{R,i} + \sum M_{g,i} = 0 \quad \dot{L} = \dot{m} c_n r_i \quad M_{p,i} = F_p r_i \quad M_{R,i} = F_R r_i \quad M_{g,i} = F_g r_i$$

2.7 Isentrope kompressible Strömungen

Isentrope, ideales Gas, Isentropen-Koeffizient κ : Siehe THD Formelsammlung

Index T kennzeichnet totale Bedingungen bzw. Ruhebedingungen bei $c = 0$

Index k kennzeichnet kritische Bedingungen bei Schallgeschwindigkeit $c = a$

Index u kennzeichnet Umgebungsbedingungen

Geschwindigkeitsfunktion ν

$$\nu\left(\frac{p}{p_T}, \kappa\right) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

$$\text{EB: } c = \sqrt{2 R T_T} \cdot \nu(p/p_T, \kappa)$$

Durchflussfunktion ψ

$$\psi\left(\frac{p}{p_T}, \kappa\right) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

$$\text{MB: } \dot{m} = A \varrho_T \sqrt{2 R T_T} \cdot \psi(p/p_T, \kappa)$$

$$\frac{p_k}{p_T} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \nu_k = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \quad \psi_k = \psi_{max} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad \frac{T_k}{T_T} = \frac{2}{\kappa+1} \quad \frac{\varrho_k}{\varrho_T} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$c_k = a_k = \sqrt{\kappa R T_k} \quad \text{Schallgeschwindigkeit: } a = \sqrt{\frac{dp}{d\varrho}} = \sqrt{\kappa R T} \quad \text{Machzahl: } Ma = \frac{c}{a}$$

Der Druck am Auslass einer einfachen konvergenten Düse $p_a = \max(p_u, p_k)$

Für gegebene Ruhebedingungen ist der Druck am Auslass einer korrekt ausgelegten Laval Düse $p_a = p_u$

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]}$$

$$\frac{\varrho}{\varrho_T} = \left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} Ma^2\right)^{-\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$\frac{p}{p_T} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\frac{T}{T_T} = \left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} Ma^2\right)^{-1}$$

2.8 Viskosität – Wandschubspannung

Dynamische Viskosität μ in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right]$ bzw. [Pa s]

Newton'sches Schubspannungsgesetz $\tau_w = \mu \frac{dc}{dy}$

Kinematische Viskosität $\nu = \frac{\mu}{\varrho}$ in $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$

γ zeigt weg von der Wand.

2.9 Durchströmung

$$NPSH = \frac{p - p_d}{\varrho g}$$

Reynolds Zahl:

Reibung:

Widerstand:

$$\dot{V} = c_{(y \text{ oder } r)} dA$$

$$Re = \frac{\bar{c} L_{char} \varrho}{\mu} = \frac{\bar{c} L_{char}}{\nu}$$

$$\Delta q_R = \frac{\Delta p_v}{\varrho} = g \Delta h$$

$$R_i = \frac{\varrho}{2} \left(\zeta_{Fi} + \lambda_i \frac{L_i}{d_{hi}} \right)$$

$$\text{Kanal: } dA = b dy$$

$$L_{char} = d_h = \frac{4 A}{U}$$

$$= \left(\zeta_F + \lambda \frac{L}{d_h} \right) \frac{\bar{c}^2}{2}$$

$$\text{Seriell: } R_{ges} = \sum R_i$$

$$\text{Rohr: } dA = r dr d\varphi$$

$$\Delta p_v = R_{ges} \dot{V}^2$$

$$\text{Parallel: } \frac{1}{R_{ges}} = \left[\sum \sqrt{\frac{1}{R_j}} \right]^2$$

2.10 Laminare Durchströmung

$$Re_{dh} < 2300 \quad \text{Rohrreibungsbeiwert } \lambda = \frac{64}{Re_{dh}} \quad \text{Hydrodynamische Einlaufstrecke } \frac{L_e}{d_h} = 0,06 Re_{dh}$$

$$\text{Couette Strömung: } \frac{c(y)}{c_{max}} = \frac{y}{h} \quad c_{max} = konst. \quad A = b \cdot h \quad \bar{c} = \frac{1}{2} c_{max}$$

$$\text{Kanal Strömung: } \frac{c(y)}{c_{max}} = 4 \left[\left(\frac{y}{h} \right) - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad c_{max} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p_v}{\Delta L} \frac{h^2}{8} \quad A = b \cdot h \quad \bar{c} = \frac{2}{3} c_{max}$$

$$\text{Rohr Strömung: } \frac{c(r)}{c_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad c_{max} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p_v}{\Delta L} \frac{R^2}{4} \quad A = R^2 \cdot \pi \quad \bar{c} = \frac{1}{2} c_{max}$$

2.11 Turbulente Durchströmung

$$Re_{dh} > 4000 \quad \text{Rohrreibungsbeiwert } \lambda \text{ aus Moody Diag.} \quad \text{Hydrodynamische Einlaufstrecke } \frac{L_e}{d_h} = \frac{8}{\sqrt{\lambda}}$$

$$1/7 \text{ Potenzgesetz: } \frac{c(r)}{c_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1/7}$$

2.12 Strömungsmaschinen

$$\text{Drehzahl } \dot{n} \quad \text{Winkelgeschwindigkeit } \omega = 2 \pi \dot{n}$$

$$\text{Umfangsgeschwindigkeit } u = r \cdot \omega \quad \text{Relativgeschwindigkeit } w \quad \text{Absolutgeschwindigkeit } c$$

$$\text{Index } r \text{ steht für Radialkomponente} \quad \text{Index } u \text{ steht für Umfangskomponente}$$

$$\text{MB: } \dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot c_{1r} = \rho \cdot A_2 \cdot c_{2r} \quad \text{EB: } \Delta p = \rho \left[\Delta w - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - \Delta q_R \right]$$

$$\text{Euler'sche Momentengleichung aus IMB um Drehachse: } M_{Antrieb} = \dot{m} (c_{2u} \cdot r_2 - c_{1u} \cdot r_1)$$

$$\text{Leistung: } P = M_{Antrieb} \cdot \omega = \dot{m} \cdot \Delta w \quad \text{Spez. Stutzenarbeit: } \Delta w = c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1 (= Y)$$

$$\text{Serienschaltung: } \dot{V} = \dot{V}_i \quad \Delta p = \sum \Delta p_i \quad \text{Parallelschaltung: } \dot{V} = \sum \dot{V}_i \quad \Delta p = \Delta p_i$$

2.13 Umströmung

$$\text{Umschlag von laminar auf turbulent bei } 5 \cdot 10^5 < Re_{Lchar} < 1 \cdot 10^6$$

$$\text{Widerstandskraft } F_W = c_W \frac{\rho_{fl}}{2} c_{rel}^2 A \quad c_{rel} = c_\infty - c_{Körper}$$

2.14 Umströmung einer Platte

Char. Länge L_{char} = Umströmte Plattenlänge L bzw. an der Stelle x
 Bezugsfläche $A = b \cdot L$ = Plattenoberfläche
 Einfluss der Rauigkeit: siehe Widerstandsdiagramm der Platte

| | | Laminare Grenzschicht | Turbulente Grenzschicht (glatt) |
|--------------------|--|-----------------------------|---------------------------------|
| Grenzschichtdicke | $\frac{\delta}{x} =$ | $\frac{5}{\sqrt{Re_x}}$ | $\frac{0,37}{\sqrt[5]{Re_x}}$ |
| Verdrängungsdicke | $\frac{\delta_1}{x} =$ | $\frac{1,72}{\sqrt{Re_x}}$ | $\frac{0,046}{\sqrt[5]{Re_x}}$ |
| Impulsverlustdicke | $\frac{\delta_2}{x} =$ | $\frac{0,665}{\sqrt{Re_x}}$ | $\frac{0,036}{\sqrt[5]{Re_x}}$ |
| Wandschubspannung | $\frac{\tau_w}{\rho \cdot u_\infty^2} =$ | $\frac{0,332}{\sqrt{Re_x}}$ | $\frac{0,0296}{\sqrt[5]{Re_x}}$ |
| Widerstandsbeiwert | $c_w =$ | $\frac{1,328}{\sqrt{Re_l}}$ | $\frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_l}}$ |

2.15 Umströmung stumpfer Körper

Char. Länge L_{char} = Hydraulischer Durchmesser der Schattenfläche in Strömungsrichtung

Bezugsfläche A = Schattenfläche in Anströmrichtung

Umströmungsgeschwindigkeit an dickster Stelle (Apex): Zylinder: $c_{Apex} = 2 c_{rel}$ Kugel: $c_{Apex} = 1,5 c_{rel}$

2.16 Dynamischer Auftrieb

Char. Länge L_{char} = Sehnenlänge des Profils L

Bezugsfläche A = Grundfläche des Profils bei Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$

| | | | |
|---|---|--------------------|--|
| Dyn. Auftriebskraft | Kraft am Profilende | Nickmoment um Nase | Gleitzahl ϵ und Gleitwinkel γ |
| $F_A = c_A \frac{\rho_{fl}}{2} c_{rel}^2 A$ | $F_M = c_M \frac{\rho_{fl}}{2} c_{rel}^2 A$ | $M_N = F_M L$ | $\epsilon = \tan \gamma = \frac{F_W}{F_A} = \frac{c_W}{c_A}$ |

2.17 Kompressible Flüssigkeiten

| | | | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Schallgeschwindigkeit: | $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | Flüssigkeit in elastischen Röhren: | $a = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{s} \frac{E}{E_R}}}$ |
| Empfohlene Schließzeit: | $\Delta t > 3 \frac{2 L}{A}$ | Joukowski Stoß: | $\Delta p = \rho a c$ |

2.18 Gas-Flüssig Strömung

| | | | |
|--------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Überdruck in Tröpfchen: | $\Delta p = \frac{4 \sigma}{d}$ | Spez. Zerstäubungsarbeit: | $\Delta w = \frac{6 \sigma}{\rho d}$ |
| Steighöhe in Kapillaren: | $h = \frac{4 \sigma \cos \gamma}{\rho g d}$ | Weber Zahl: | $We = \frac{\rho c^2 d}{\sigma}$ |
| Schallgeschwindigkeit: | $a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{p_0 \kappa \rho_{g0}}{w_g \rho^2} \left[\frac{\rho_{g0}}{w_g} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1 - w_g}{\rho_l} \right) \right]^{-\kappa-1}}$ | | |

2.19 Senkrechter Verdichtungsstoß

| | | | |
|---|-------|--|-------|
| EB: $\frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{\kappa + 1} \left[\kappa - 1 + \frac{2}{Ma_1^2} \right]$ | < 1 | IB: $\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2 \kappa}{\kappa + 1} (Ma_1^2 - 1)$ | > 1 |
|---|-------|--|-------|

| | |
|---|-------|
| MB: $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\kappa + 1) Ma_1^2}{(\kappa - 1) Ma_1^2 + 2}$ | > 1 |
|---|-------|

Mit: $T = \frac{p}{R \rho}$ und $a = \sqrt{\kappa R T}$ folgt:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = 1 + \frac{2 (\kappa - 1) \kappa Ma_1^2 + 1}{(\kappa + 1)^2 Ma_1^2} (Ma_1^2 - 1) > 1$$

$$Ma_2 = \frac{c_2}{a_2} = \sqrt{\frac{(\kappa - 1) Ma_1^2 + 2}{2 \kappa Ma_1^2 - (\kappa - 1)}}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} > 0$$

Neue Ruhebedingungen nach dem Stoß:

$$\frac{p_2}{p_{T2}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma_2^2 \right)^{\frac{\kappa}{1 - \kappa}}$$

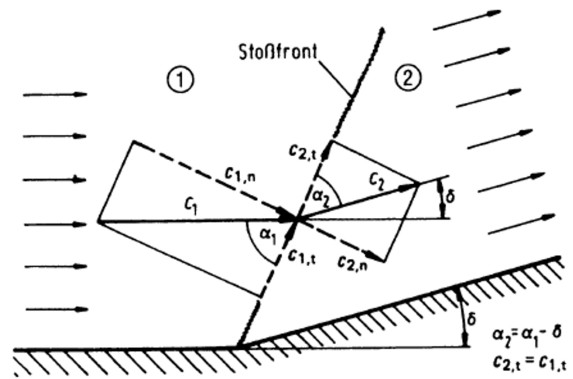
2.20 Schräger Verdichtungsstoß - Verdünnungswellen

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 - \delta)}$$

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan(\alpha_1 - \delta)}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2 \kappa}{\kappa + 1} \left[(Ma_1 \sin \alpha_1)^2 - 1 \right]$$

$$\cot \delta = \tan \alpha_1 \left[\frac{\kappa + 1}{2} \frac{Ma_1^2}{(Ma_1 \sin \alpha_1)^2 - 1} - 1 \right]$$



2.21 Erweiterungen zu Laval-Düse

Index $a \dots$ Auslass; $k \dots$ kritischer/engster Querschnitt; α Winkel der Düse, bezogen auf Strömungsrichtung

$$\frac{A_a}{A_k} = \frac{1}{Ma} \left[1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} (Ma^2 - 1) \right]^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad L = \frac{D_a - D_k}{2 \tan \alpha} \quad \frac{\psi_a}{\psi_k} = \frac{A_k}{A_a}$$

2.22 Näherungen

Abschätzung Reynolds $Re > 1300 \frac{d}{k_s}$

$$\text{Nherung Rohrreibung } 65 \frac{d}{k_s} < Re < 1300 \frac{d}{k_s} \rightarrow \lambda_{\text{Nherung}} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{15}{Re} + \frac{k_s}{3,715 d} \right) \right]^2}$$

3 Wärmeübertragung

3.1 Wärmestrom und Wärmewiderstände

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= R_{ges} \dot{Q} & R_{ges} &= \frac{1}{k A_{wa}} \\
 R &= \frac{1}{k} & &= R_{ges} A_{wa} &= \sum R_{einzel} &= R_i + R_w + R_a & R_w &= \sum_{N_w}^{j=1} R_{w,j} \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R} A_{wa} \Delta T & &= k A_{wa} \Delta T & \Delta T &= T_a - T_i \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R_i} A_{wa} \Delta T_i & &= \alpha_i A_{wi} \Delta T_i & \Delta T_i &= T_{wi} - T_i \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R_a} A_{wa} \Delta T_a & &= \alpha_a A_{wa} \Delta T_a & \Delta T_a &= T_a - T_{wa} \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R_{w,j}} A_{wa} \Delta T_{w,j} & \Delta T_{w,j} &= T_{w,j} - T_{w,j-1} \\
 \dot{Q} &= \dot{m}_H |\Delta h_H| &= \dot{m}_H c_{p,H} |\Delta T_H| &= \dot{W}_H |\Delta T_H| & \Delta T_H &= T_{H2} - T_{H1} \\
 \dot{Q} &= \dot{m}_K \Delta h_K &= \dot{m}_K c_{p,K} \Delta T_H &= \dot{W}_K \Delta T_K & \Delta T_K &= T_{K2} - T_{K1}
 \end{aligned}$$

3.2 Ebene Wände – Platten

$$A_{wa} = A_{wi} = A_{wj} = A_w = \text{konst.}, \text{ Seitenflächen vernachlässigt} \quad R_i = \frac{1}{\alpha_i} \quad R_{w,j} = \frac{\Delta x_j}{\lambda_j} \quad R_a = \frac{1}{\alpha_a}$$

3.3 Rohr – Zylinderwände

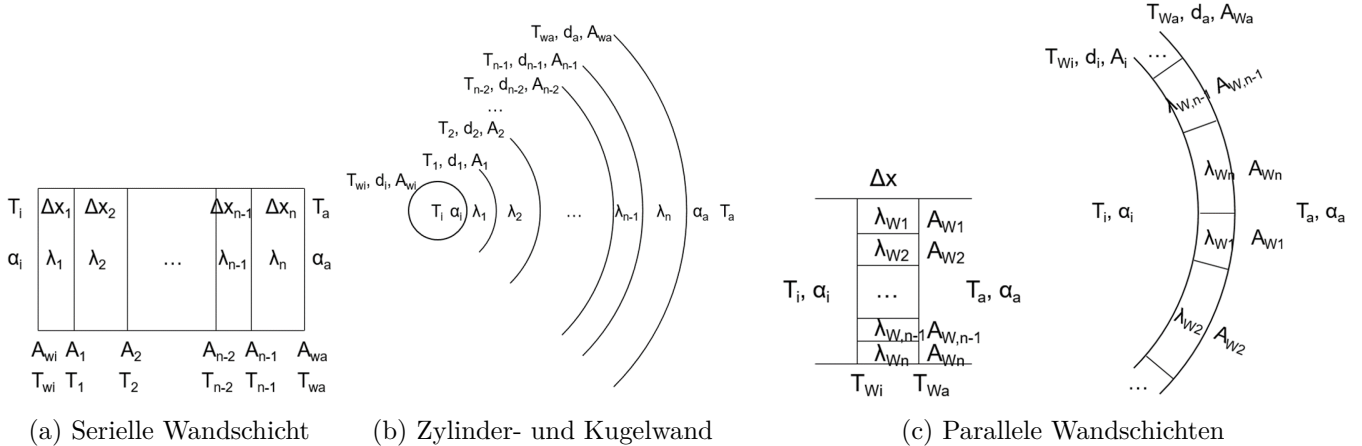
$$A_{wa} = d_a \pi L, \text{ Deckflächen vernachlässigt} \quad R_i = \frac{d_a}{d_i \alpha_i} \quad R_{w,j} = \frac{d_a}{2 \lambda_j} \ln \left(\frac{d_j}{d_{j-1}} \right) \quad R_a = \frac{1}{\alpha_a}$$

3.4 Kugelwände

$$A_{wa} = d_a^2 \pi \quad R_i = \left(\frac{d_a}{d_i} \right)^2 \frac{1}{\alpha_i} \quad R_{w,j} = \frac{d_a^2}{2 \lambda_j} \left(\frac{1}{d_{j-1}} - \frac{1}{d_j} \right) \quad R_a = \frac{1}{\alpha_a}$$

3.5 Parallele Wandschichten

$$\frac{1}{R_w} = \sum_{N_w(j)}^{j=1} \frac{1}{R_{w,j}} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_{w,j} = \sum_{N_w(j)}^{j=1} \dot{Q}_{w,j} \quad R_{w,j} = R_{w,j,seriell} \frac{A_{wa}}{A_{wa,j}}$$



3.6 Rippen

$$\eta_{Ri} = \frac{\dot{Q}_{Ri}}{\dot{Q}_{Ri,max}} = \frac{\tanh(m h)}{m h} \quad m = \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda_{Ri} A}} \quad \text{siehe 2b (nächste Seite)}$$

$$\dot{Q}_{Ri} = \lambda_{Ri} A_{Ri} \Delta T_0 m \tanh(m h) \quad \Delta T_{(x)} = T_{(x)} - T_u = \Delta T_0 \frac{\cosh(m h (1 - \frac{x}{h}))}{\cosh(m h)}$$

$$\frac{A_{w,mit}}{A_{w,ohne}} = 1 - \frac{A_{Ri}}{A_{w,ohne}} + \frac{A_{w,Ri}}{A_{w,ohne}} \quad \frac{\dot{Q}_{mit}}{\dot{Q}_{ohne}} = \frac{\alpha_{mit}}{\alpha_{ohne}} = 1 - \frac{A_{Ri}}{A_{w,ohne}} + \frac{U_{Ri}}{A_{w,ohne}} \frac{\tanh(m h)}{m}$$

3.7 Transiente Wärmeleitung

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad Fo = \frac{a t}{s^2} \quad Bi = \frac{\alpha s}{\lambda} \quad \text{Platten: } s = \frac{\Delta x}{2} \quad \text{Zylinder, Kugeln: } s = \frac{d_a}{a} \quad \Theta = \frac{T - T_u}{T_0 - T_u}$$

3.8 Konvektion

$$\text{Durchströmung: } L_{char} = d_h = \frac{4 A}{U} \quad \text{Umströmung: } L_{char} = L' = \frac{A_w}{U_{proj}}$$

$$Re = \frac{c L_{char}}{\nu} = \frac{c L_{char} \rho}{\mu} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\delta}{\delta_T} \quad Ra = \frac{g L_{char}^3 \beta (T_w - T_{fl})}{\nu a} \quad Nu = \frac{\alpha L_{char}}{\lambda} = \frac{L_{char}}{\delta_T}$$

$$\beta_{ideales Gas} = \frac{1}{T_m} \quad \text{Stoffwerte der WUE bei } T_m = \frac{T_w + T_{fl}}{2} \quad \delta_T = \frac{\lambda}{\alpha} \quad \alpha = \frac{\lambda}{L'} Nu \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

3.9 Erzwungene Konvektion

3.9.1 Durchströmung

$$\text{Laminar } Re < 2300 : \quad Nu_{lam} = \sqrt[3]{3,66^3 + 0,664^3 Pr \left(Re \frac{d_h}{L} \right)^{3/2}}$$

$$\text{Turbulent } Re > 10^4 : \quad Nu_{turb} = \frac{\zeta/8 Re Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\zeta/8} (Pr^{2/3} - 1)} f_1 f_2$$

$$\zeta = (1,8 \log(Re) - 1,5)^{-2} \quad f_1 = 1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{2/3} \quad f_{2,fl} = \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,11} \quad f_{2,g} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^{0,45}$$

$$\text{Übergang: } \gamma = \frac{Re - 2300}{10000 - 2300} \quad Nu = (1 - \gamma) \cdot Nu_{lam, Re=2300} + \gamma \cdot Nu_{turb, Re=10000}$$

$$\text{Ringspaltkorrektur: } Nu_{Rs} = Nu \cdot 0,86 \left(\frac{d_{aa}}{d_{ai}} \right)^{0,16}$$

3.9.2 Umströmung

$$\text{Keine Anströmung: } Re < 0,1 : \quad Nu_0 = 0,1 \text{ (Platte)} \quad 0,3 \text{ (Zylinder)} \quad 2 \text{ (Kugel)}$$

$$\text{laminar: } 1 < Re < 10^5 : \quad Nu_{lam} = 0,664 \sqrt[3]{Pr} \sqrt{Re}$$

$$\text{Turbulent: } 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 : \quad Nu_{turb} = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} f_3$$

$$f_{3,fl} = \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad f_{3,g} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^{0,121}$$

$$\text{Übergang: } 10 < Re < 10^7 \quad Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}$$

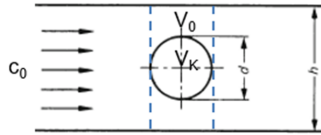
$$\text{Schräg umströmter Zylinder: } \text{Korrekturfaktor } f_5 \quad \text{Längs umströmter Zylinder:}$$

$$Nu = Nu_{Zylinder, 90^\circ} f_5 \quad f_5 = \text{siehe Diag. 2a} \quad Nu = Nu_{Platte} \left(1 + 2,3 \frac{L}{d} Re_L^{-0,5} \right)$$

3.9.3 Umströmung in Durchströmung

Hohlraumanteil:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_K}{V_0} \quad c = \frac{c_0}{\varepsilon}$$



Rohrbündel:

$$a = \frac{s_1}{d} \quad b = \frac{s_2}{d}$$

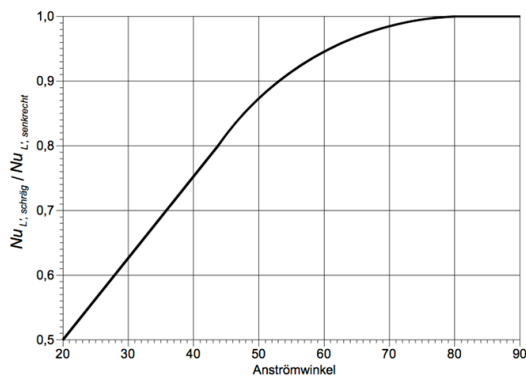
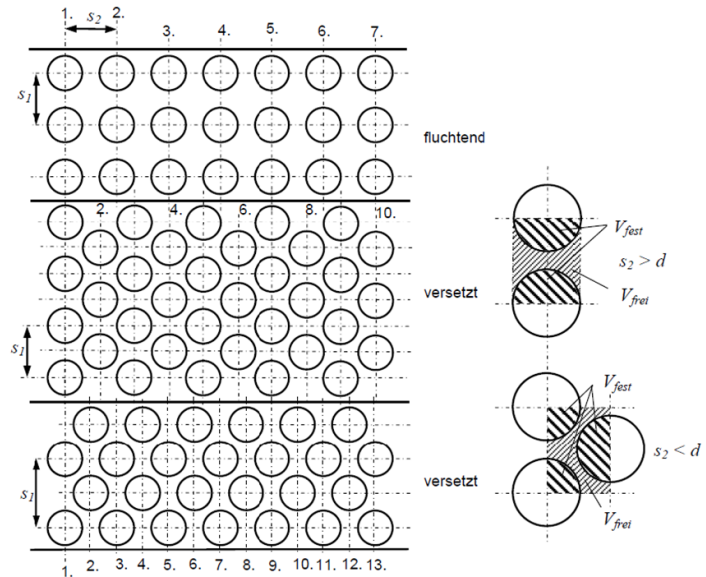
$$Nu_{Bündel} = Nu_{einzel} f_A$$

$$f_{A,fluchtend} = 1 + \frac{0,7(b/a - 0,3)}{\varepsilon^{1,5}(b/a + 0,7)^2}$$

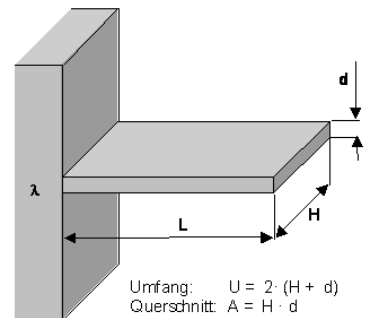
$$f_{A,versetzt} = 1 + \frac{2}{3b}$$

$$n \leq 10: f_{A,10} = \frac{1 + (n-1)f_A}{n}$$

$n \dots$ Reihen



(a) Korrekturfaktor f_5

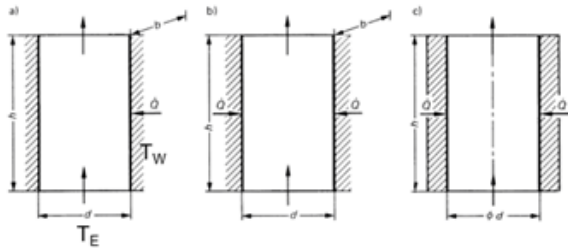


(b) Rippengeometrie (für m)

Abbildung 2: Hilfen etc.

3.10 Freie Konvektion

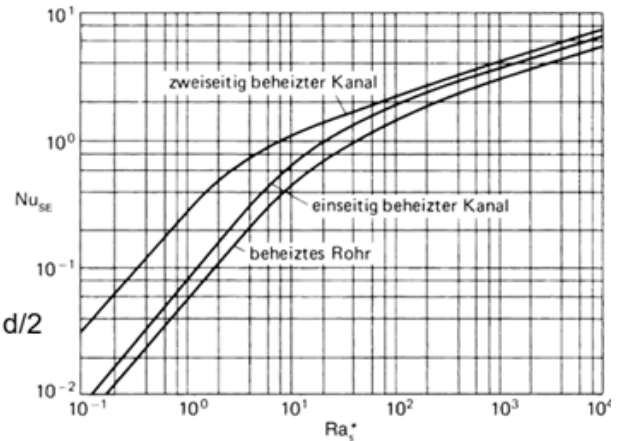
3.10.1 Durchströmung



a) Einseitig beheizter ebener Kanal mit $L_{\text{char}} = d$

b) Zweiseitig beheizter ebener Kanal mit $L_{\text{char}} = d/2$

c) Beheiztes Rohr mit $L_{\text{char}} = r = d/2$



$\dot{Q} = \alpha_E A_W (T_W - T_E)$ mit der Fluid-Eintrittstemperatur T_E !

$$Ra_S^* = \frac{g \beta L_{\text{char}}^3 (T_W - T_E)}{\nu \alpha} \frac{L_{\text{char}}}{h}$$

$$Nu_{SE} = \frac{\alpha_E L_{\text{char}}}{\lambda} = \left[\frac{1}{(C_1 Ra_S^*)^{3/2}} + \frac{1}{[C_2 (Ra_S^*)^{1/4}]^{3/2}} \right]^{-2/3}$$

| | C_1 | C_2 |
|----|-------|-------|
| a) | 1/12 | 0,61 |
| b) | 1/3 | 0,69 |
| c) | 1/16 | 0,52 |

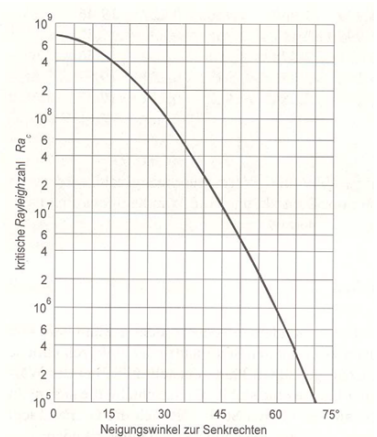
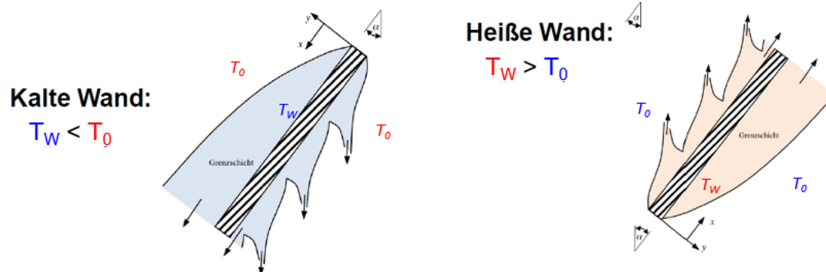
3.10.2 Umströmung

Vertikale Wand: $Nu = (0,825 + 0,387 Ra^{1/6} f_1)^2$ $f_1 = (1 + 0,671 Pr^{-9/16})^{-8/27}$

Geneigte Wand, Winkel α zur Vertikalen: ohne Ablösung: $Ra_\alpha = Ra \cos \alpha$

mit Ablösung: $Nu = 0,56 \sqrt[4]{Ra_{krit} \cos \alpha} + 0,13 \left(\sqrt[3]{Ra} - \sqrt[3]{Ra_{krit}} \right)$

$Ra_{krit} = 10^{(8,9 - 0,013 \alpha - 5,95 \cdot 10^{-4} \alpha^2)}$ mit α in $^\circ$



Horizontale Wand:

$Ra f_2 \leq 7 \cdot 10^4$: $Nu = 0,766 \sqrt[5]{Ra f_2}$ $f_2 = \left(1 + 0,536 Pr^{-11/20} \right)^{-20/11}$

$Ra f_2 > 7 \cdot 10^4$: $Nu = 0,15 \sqrt[3]{Ra f_2}$

Horizontaler Zylinder: $Nu = \left(0,752 + 0,387 \sqrt[6]{Ra f_3} \right)^2$ $f_3 = \left(1 + 0,721 Pr^{-11/20} \right)^{-8/27}$

Kugel: $Nu = 1 + 0,56 \sqrt[4]{\frac{Pr Ra}{0,846 + Pr}}$

3.10.3 Überlagerung mit erzwungener Konvektion

$Nu = \sqrt[3]{Nu_{\text{erzwungen}}^3 \pm Nu_{\text{frei}}^3}$ + ... gleichgerichtete, - ... entgegen-gerichtete Mischkonvektion

3.11 Wärmestrahlung zw. Oberflächen

Strahlungsbilanz:

$$a + r + t = 1$$

Planck'sches Gesetz:

$$i_{s(\lambda, T)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right)}$$

Mit: $C_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$

$$C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ K m}^2$$

Wien'sches Gesetz:

$$\lambda_{s, max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}]$$

Stefan Boltzmann Gesetz: mit $C_s = 5,67$

$$\dot{q}_{s(T)} = \int_{\lambda=0}^{\infty} i_{s(\lambda, T)} d\lambda = C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Graue Bande:

$$\dot{q}_{\lambda, s(T)} = \int_{\lambda=0}^{\lambda} i_{s(\lambda, T)} d\lambda = \varepsilon_{(\lambda)} f_{(\lambda, T)} \dot{q}_{s(T)}$$

Kirchhoff'sches Gesetz:

$$a = \varepsilon$$

Wärmestrom zw. zwei Flächen:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} A_{w1} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Parallele Platten 1 und 2 mit N Platten (ε_s) dazwischen:

$$C_{12} = C_s \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + N \left(\frac{2}{\varepsilon_s} - 1 \right) \right]^{-1}$$

Konzentrische Zylinder/Kugelschalen (1 innen, 2 außen); N Schalen (ε_s) dazwischen:

$$C_{12} = C_s \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_{w1}}{A_{w2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) + \left(\frac{2}{\varepsilon_s} - 1 \right) \sum_{i=1}^N \frac{A_{w1}}{A_{wsi}} \right]^{-1}$$

Beliebig orientierte Flächen:

$$C_{12} = C_s \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{12}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varphi_{12} \varphi_{21}}$$

mit Einstrahlzahlen:

$$\varphi_{12} = A_{w2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2 \pi} = \varphi_{21} \frac{A_{w2}}{A_{w1}}$$

Umschlossener Körper 1:

$$C_{12} = C_s \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_{w1}}{A_{w2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}$$

wenn $A_{w2} \gg A_{w1}$:

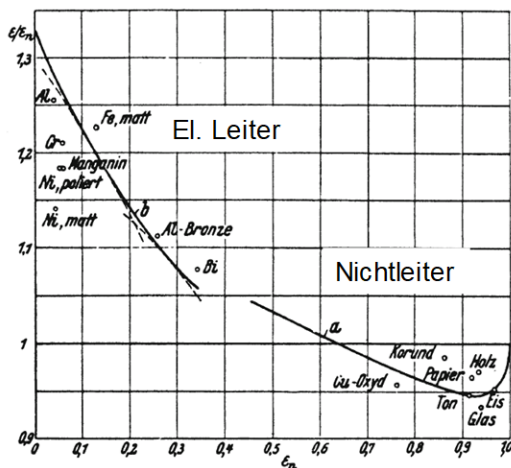
$$C_{12} = \varepsilon_1 C_s$$

Äquivalenter Wärmübergangskoeffizient:

$$\alpha_{Str} = \left| \frac{\dot{q}_{Str}}{T_w - T_{fl}} \right|$$

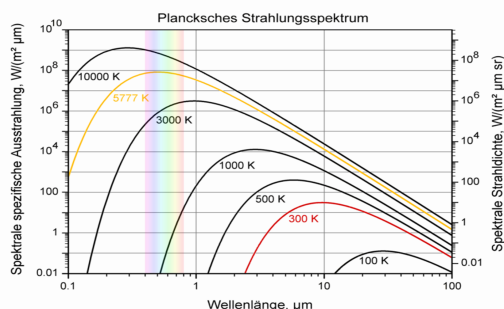
Emissionsgrad Umrechnung:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}$$



| $\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m K}$) | $f_{\lambda}(T)$ |
|---------------------------------------|------------------|
| 200 | 0,000000 |
| 400 | 0,000000 |
| 600 | 0,000000 |
| 800 | 0,000016 |
| 1000 | 0,000321 |
| 1200 | 0,002134 |
| 1400 | 0,007790 |
| 1600 | 0,019718 |
| 1800 | 0,039341 |
| 2000 | 0,066728 |
| 2200 | 0,100888 |
| 2400 | 0,140256 |
| 2600 | 0,183120 |
| 2800 | 0,227897 |
| 2898 | 0,250108 |
| 3000 | 0,273232 |
| 3200 | 0,318102 |
| 3400 | 0,361735 |
| 3600 | 0,403607 |
| 3800 | 0,443382 |
| 4000 | 0,480877 |
| 4200 | 0,516014 |
| 4400 | 0,548796 |
| 4600 | 0,579280 |
| 4800 | 0,607559 |
| 5000 | 0,633747 |
| 5200 | 0,658970 |
| 5400 | 0,680360 |
| 5600 | 0,701046 |
| 5800 | 0,720158 |
| 6000 | 0,737818 |

| $\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m K}$) | $f_{\lambda}(T)$ |
|---------------------------------------|------------------|
| 6200 | 0,754140 |
| 6400 | 0,769234 |
| 6600 | 0,783199 |
| 6800 | 0,796129 |
| 7000 | 0,808109 |
| 7200 | 0,819217 |
| 7400 | 0,829527 |
| 7600 | 0,839102 |
| 7800 | 0,848005 |
| 8000 | 0,856288 |
| 8500 | 0,874608 |
| 9000 | 0,890029 |
| 9500 | 0,903085 |
| 10000 | 0,914199 |
| 10500 | 0,923710 |
| 11000 | 0,931890 |
| 11500 | 0,939959 |
| 12000 | 0,945098 |
| 13000 | 0,955139 |
| 14000 | 0,962898 |
| 15000 | 0,969981 |
| 16000 | 0,973814 |
| 18000 | 0,980860 |
| 20000 | 0,985602 |
| 25000 | 0,992215 |
| 30000 | 0,995340 |
| 40000 | 0,997967 |
| 50000 | 0,998953 |
| 75000 | 0,999713 |
| 100000 | 0,999905 |



3.12 Einseitig konstante Temperatur, Gleichstrom und Gegenstrom

Übertragungseinheit : $N_i = \frac{k A_{wa}}{\dot{m}_i c p_i}$

Mittlere Temperaturdifferenz: $\Delta T = T_H - T_K = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} = \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)}$

Mittlere Wandtemperaturen: $T_{wH} = T_H - \frac{k A_{wa}}{\alpha_H A_{wH}} \Delta T$
 $T_{wK} = T_K + \frac{k A_{wa}}{\alpha_K A_{wK}} \Delta T$

3.13 Einseitig konstante Temperatur

Übertragungseinheit: $N = \frac{k A_{wa}}{\dot{m} c p} = \ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right) > 0$

3.14 Gleichstrom und Gegenstrom

Mittlere Temperaturen: $T_H \cong \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2} \quad T_K \cong \frac{T_{K1} + T_{K2}}{2}$

3.15 Vorgangsweise Auslegung

Gegeben: Geometrie außer Außen-Oberfläche, Einlass-Zustände beidseitig,

eine Ziel-Auslasstemperatur

Gesucht: **Außenoberfläche der wärmeübertragenden Wand,**

davon abgeleitet Länge oder Rohranzahl etc.

Berechnung:

1. Geometrie: Querschnittflächen, char. Abmessungen, etc.
2. Wärmestrom, andere Auslasstemperatur, mittlere Temperaturdifferenz
3. Annahme sinnvoller Wandtemperaturen auf beiden Seiten und zw. Wandschichten
 - a) Bei freier Konvektion, Wärmestrahlung: 1. Annahme: $T_W \neq T_{fl}$
 - b) In Wärmeübertragern: nur erzwungene Konvektion, 1. Annahme: $T_W = T_{fl}$
4. Stoffwerte beidseitig bei Mitteltemperatur zwischen Fluid und Wand
5. Wand-, heißer -, kalter -, Gesamt-Widerstand, Wärmedurchgangskoeffizient
6. Außenoberfläche der wärmeübertragenden Wand etc.
7. Aktualisierung der Wandtemperaturen
8. Übereinstimmung mit angenommenen Wandtemperaturen?
 - a) Ja \rightarrow OK
 - b) Nein \rightarrow zurück zu 4.

3.16 Vorgangsweise Betriebsnachrechnung

Gegeben: vollständige Geometrie, Einlass-Zustände beidseitig

Gesucht: Auslasstemperaturen beidseitig

Berechnung:

1. Vervollständigung geometrischer Daten (z.B. char. Abmessungen) und der Einlass-Zustände
2. Annahme von k bzw. Übernahme von k aus Auslegung, iterative Aktualisierung:

3.16.1 Einseitig konstante Temperatur

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 e^{-N} \quad N \dots \text{siehe 3.13}$$

3.16.2 Gleichstrom

$$T_{H2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1}) \frac{\dot{W}_K}{\dot{W}_H + \dot{W}_K} \left(1 - e^{-\mu k A_{wa}}\right) \quad \mu = \frac{1}{\dot{W}_H} + \frac{1}{\dot{W}_K}$$

$$T_{K2} = T_{K1} - (T_{H1} - T_{K1}) \frac{\dot{W}_K}{\dot{W}_H + \dot{W}_K} \left(1 - e^{-\mu k A_{wa}}\right)$$

3.16.3 Gegenstrom

$$\mu = \left| \frac{1}{\dot{W}_H} - \frac{1}{\dot{W}_K} \right|$$

$$T_{H2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1}) \frac{1 - e^{-\mu k A_{wa}}}{1 - \frac{\dot{W}_H}{\dot{W}_K} e^{-\mu k A_{wa}}} \quad T_{K2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1}) \frac{1 - \frac{\dot{W}_H}{\dot{W}_K}}{1 - \frac{\dot{W}_H}{\dot{W}_K} e^{-\mu k A_{wa}}}$$

3.17 Rekuperatoren allgemein

$$P_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{K1}} \quad P_K = \frac{T_{K2} - T_{K1}}{T_{H1} - T_{K1}} \quad \eta = \max(P_H, P_K)$$

$$R_H = \frac{\dot{W}_H}{\dot{W}_K} = \frac{1}{R_K} \quad \Theta = \frac{T_H - T_K}{T_{H1} - T_{K1}} = F \Theta_{\text{Gegenstrom}}$$

F aus Betriebscharakteristik: $f(P_H, N_H, N_K) = 0$ oder $f(P_H, N_H, R_H) = 0$

3.18 Regeneratoren

$$\Delta Q = \alpha_H A_w (T_H - T_{wH}) \Delta t_H$$

$$\Delta Q = \alpha_K A_w (T_{wK} - T_K) \Delta t_K$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t_H + \Delta t_K} = \dot{Q} = f k_0 A_w (T_H - T_K)$$

$$\Delta T_a = T_{H1} - T_{K2}$$

$$\frac{1}{k_0} = (\Delta t_H + \Delta t_K) \left[\frac{1}{\alpha_H \Delta t_H} + \frac{1}{\alpha_K \Delta t_K} + \frac{\Delta s_w}{\lambda_s} \Phi \left(\frac{1}{\Delta t_H} + \frac{1}{\Delta t_K} \right) \right]$$

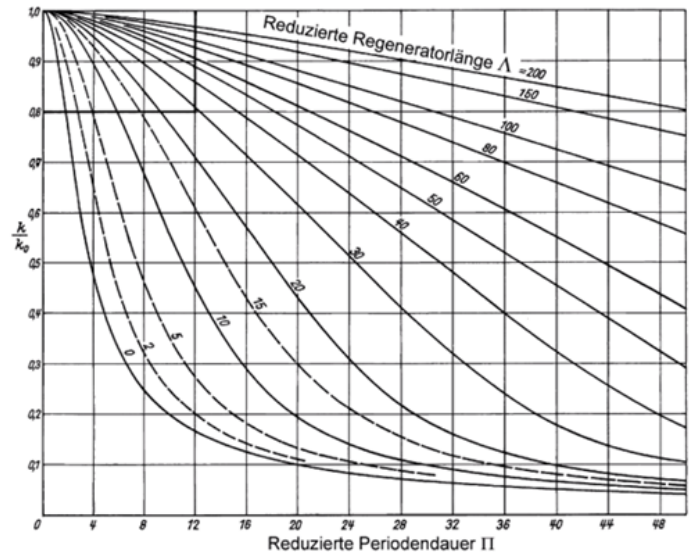
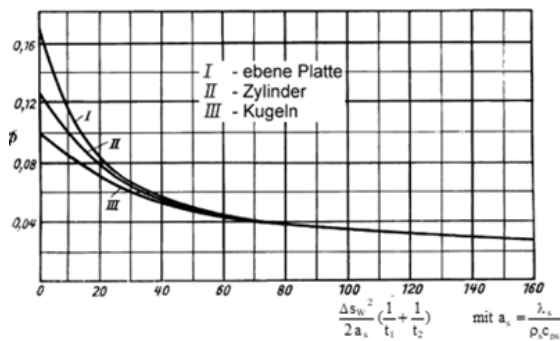
mit f , Φ aus:

$$C_s = V_s \rho_s c_s$$

$$C_{Per} = \frac{1}{2} (\dot{M}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \cdot t_1 + \dot{M}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \cdot t_2)$$

$$A = 2 \cdot \frac{k_0 \cdot (t_1 + t_2) \cdot A}{C_{Per}},$$

$$\Pi = 2 \cdot \frac{k_0 \cdot (t_1 + t_2) \cdot A}{C_s} = \frac{C_{Per}}{C_s} \cdot A$$



3.19 Gasstrahlung

Wärmestrom zw. heißem Gas (Flamme: ε_g , T_g) einerseits und Wänden (T_w , ε_w) und kaltem Gas an Wänden (T_w , a_g) andererseits:

$$\dot{Q} = \frac{\varepsilon_w C_s A_w}{1 - (1 - a_g)(1 - \varepsilon_w)} \left[\varepsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - a_g \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - (\Delta \varepsilon)_g$$

$$a_{H_2O} = \varepsilon_{H_2O}(T_w, p_{H_2O} \cdot T_g/T_w) \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0,45}$$

$$a_g = a_{H_2O} + a_{CO_2} - (\Delta \varepsilon)_g$$

$$a_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2}(T_w, p_{H_2O} \cdot T_g/T_w) \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0,65}$$

Emissionsgrade = Absorptionsgrade aus Diagrammen in Abhängigkeit von Temperatur, Druck, Partialdruck von CO_2 bzw. H_2O , überlappenden Banden und gleichwertiger Schichtdicke s

$$s = 0,9 \frac{4 V_g}{A_w}$$