

1 Thermodynamik

$$\begin{array}{llll}
 \text{isotherm:} & \Delta u = 0 & \Delta T = 0 & \Delta w = +R T \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = -R T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \\
 \text{isobar:} & \Delta w = R \Delta T & \Delta p = 0 \Rightarrow \int v \mathrm{d}p = 0 & \Delta h = \Delta q_a \text{ wenn } \Delta q_R = 0 \\
 \text{isochor:} & & \Delta v = 0 \Rightarrow \int p \mathrm{d}v = 0 & \Delta u = \Delta q_a \text{ wenn } \Delta q_R = 0 \\
 \text{Enthalpie:} & h = u + pv & &
 \end{array}$$

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

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

1.1 Ideales Gas

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

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

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

$$\begin{array}{ll}
 \int p \mathrm{d}v = \frac{1}{\kappa - 1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right] & \int v \mathrm{d}p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \\
 \text{Polytrope analog mit: } n = \frac{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)} & = 1 - \frac{\ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}{\ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right)} \text{ statt } \kappa
 \end{array}$$

1.2 Gemische idealer Gase – Species i

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

1.3 Inkompressible Flüssigkeiten

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

1.4 Gemische mischbarer, inkompressibler Flüssigkeiten – Species i

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

1.5 Nassdampf: u' = Wasser, u'' = Dampf

$$\begin{array}{lll}
 x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{u - u'}{u'' - u'} & & \\
 u = (1 - x) u' + x u'' & u = u' + x (u'' - u') & \text{analog für: } v, h, s
 \end{array}$$

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:

$$T_2 = T_1 \frac{\kappa}{1 + \frac{p_1}{p_u}(\kappa - 1)}$$

$$\Delta m = \frac{m_1 (T_2 - T_1)}{\kappa T_1 - T_2}$$

Einsaugen, Ausstoßen:

$$\Delta W_v = -p \, \Delta V$$

1.9 Ruhende, stationäre, 2-seitig offene Systeme

$$\Delta h + \Delta e_a = \Delta q_a + \Delta w_i$$

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

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

1.10 Wirkungsgrade

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

Durchflussfunktion ψ

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

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

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

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

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

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 $p_a = p_u$

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

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

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

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

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 $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right]$

γ zeigt weg von der Wand.

2.9 Durchströmung

$$\begin{array}{llll}
 NPSH = \frac{p - p_d}{\rho g} & \dot{V} = c_{(y \text{ oder } r)} \, dA & \text{Kanal: } dA = b \, dy & \text{Rohr: } dA = r \, dr \, d\varphi \\
 \text{Reynolds Zahl:} & Re = \frac{\bar{c} \, L_{char} \, \rho}{\mu} = \frac{\bar{c} \, L_{char}}{\nu} & L_{char} = d_h = \frac{4 \, A}{U} & \\
 \text{Reibung:} & \Delta q_R = \frac{\Delta p_v}{\rho} = g \, \Delta h & = \left(\zeta_F + \lambda \frac{L}{d_h} \right) \frac{\bar{c}^2}{2} & \Delta p_v = R_{ges} \, \dot{V}^2 \\
 \text{Widerstand:} & R_i = \frac{\rho}{2} \left(\zeta_{Fi} + \lambda_i \frac{L_i}{d_{hi}} \right) & \text{Seriell: } R_{ges} = \sum R_i & \text{Parallel: } \frac{1}{R_{ges}} = \left[\sum \sqrt{\frac{1}{R_j}} \right]^2
 \end{array}$$

2.10 Laminare Durchströmung

$$\begin{array}{llll}
 Re_{dh} < 2300 & \text{Rohrreibungsbeiwert } \lambda = \frac{64}{Re_{dh}} & \text{Hydrodynamische Einlaufstrecke } \frac{L_e}{d_h} = 0,06 \, Re_{dh} & \\
 \text{Couette Strömung:} & \frac{c(y)}{c_{max}} = \frac{y}{h} & c_{max} = konst. & A = b \, h \quad \bar{c} = \frac{1}{2} c_{max} \\
 \text{Kanal Strömung:} & \frac{c(y)}{c_{max}} = 4 \left[\left(\frac{y}{h} \right) - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] & c_{max} = \frac{1 \, \Delta p_v \, h^2}{\mu \, \Delta L \, 8} & A = b \, h \quad \bar{c} = \frac{2}{3} c_{max} \\
 \text{Rohr Strömung:} & \frac{c(r)}{c_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 & c_{max} = \frac{1 \, \Delta p_v \, R^2}{\mu \, \Delta L \, 4} & A = R^2 \, \pi \quad \bar{c} = \frac{1}{2} c_{max}
 \end{array}$$

2.11 Turbulente Durchströmung

$$\begin{array}{llll}
 Re_{dh} > 4000 & \text{Rohrreibungsbeiwert } \lambda \text{ aus Moody Diagr.} & \text{Hydrodynamische Einlaufstrecke } \frac{L_e}{d_h} = \frac{8}{\sqrt{\lambda}} & \\
 1/7 \text{ Potenzgesetz: } & \frac{c(r)}{c_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1/7} & &
 \end{array}$$

2.12 Strömungsmaschinen

$$\begin{array}{llll}
 \text{Drehzahl } \dot{n} & & \text{Winkelgeschwindigkeit } \omega = 2 \, \pi \, \dot{n} & \\
 \text{Umfangsgeschwindigkeit } u = r \, \omega & & \text{Relativgeschwindigkeit } w & \text{Absolutgeschwindigkeit } c \\
 \text{Index } r \text{ steht für Radialkomponente} & & \text{Index } u \text{ steht für Umfangskomponente} & \\
 \text{MB: } \dot{m} = \rho \, A_1 \, c_{1r} = \rho \, A_2 \, c_{2r} & & \text{EB: } \Delta p = \rho \left[\Delta w - \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) - \Delta q_R \right] & \\
 \text{Euler'sche Momentengleichung aus IMB um Drehachse: } & M_{Antrieb} = \dot{m} (c_{2u} \, r_2 - c_{1u} \, r_1) & & \\
 \text{Leistung: } P = M_{Antrieb} \, \omega = \dot{m} \, \Delta w & & \text{Spez. Stutzenarbeit: } \Delta w = c_{2u} \, u_2 - c_{1u} \, u_1 (= Y) & \\
 \text{Serienschaltung: } \dot{V} = \dot{V}_i & \Delta p = \sum \Delta p_i & \text{Parallelschaltung: } \dot{V} = \sum \dot{V}_i & \Delta p = \Delta p_i
 \end{array}$$

2.13 Umströmung

$$\begin{array}{ll}
 \text{Umschlag von laminar auf turbulent bei } 5 \cdot 10^5 < Re_{Lchar} < 1 \cdot 10^6 & \\
 \text{Widerstandskraft } F_W = c_W \frac{\rho_{fl}}{2} c_{rel}^2 \, A & c_{rel} = c_\infty - c_{Körper}
 \end{array}$$

2.14 Umströmung einer Platte

Char. Länge L_{char} = Umströmte Plattenlänge L bzw. an der Stelle x
 Bezugsfläche $A = b \, L$ = 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
$F_A = c_A \frac{\rho f l}{2} c_{rel}^2 A$	$F_M = c_M \frac{\rho f l}{2} c_{rel}^2 A$	$M_N = F_M L$	$\epsilon = \tan \gamma = \frac{F_W}{F_A} = \frac{c_W}{c_A}$

2.17 Kompressible Flüssigkeiten

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

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:

$$\frac{p_2}{p_{T2}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma_1^2 \right)^{\frac{\kappa}{1 - \kappa}}$$

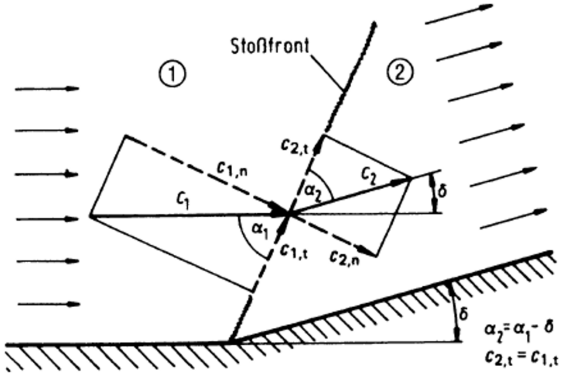
2.20 Schräger Verdichtungsstoß - Verdünnungswellen

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

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

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

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



3 Wärmeübertragung

3.1 Wärmestrom und Wärmewiderstände

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

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

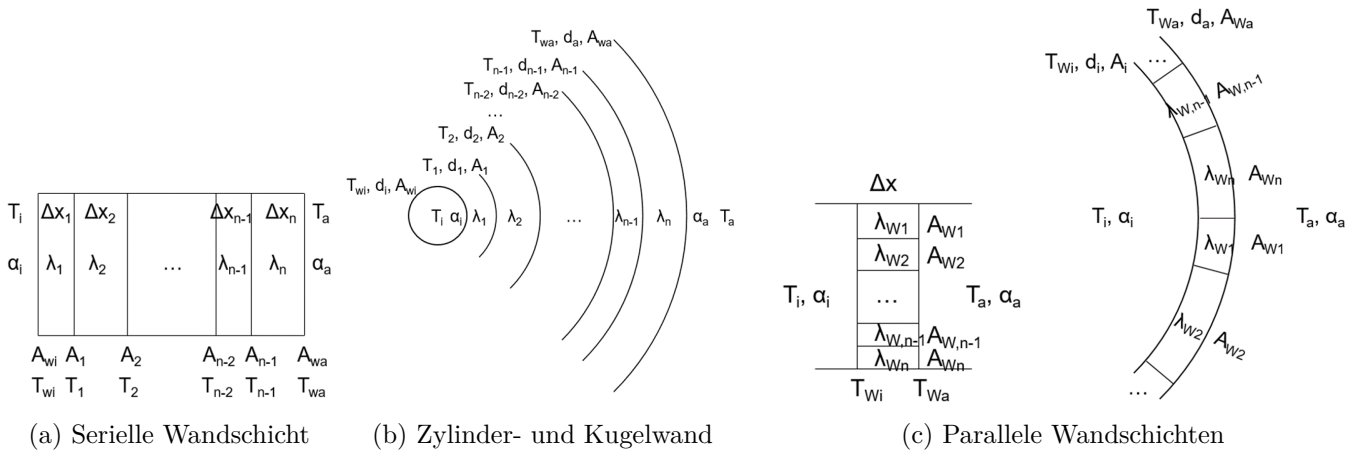
$$A_{wa} = d_a \pi L, \text{ Deckflächen vernachlässigt} \quad R_i = \frac{d_a}{d_i} \frac{1}{\alpha_i} \quad R_{w,j} = \frac{d_a}{a} \frac{1}{\lambda_j} \ln \left(\frac{d_j}{d_{j-1}} \right) \quad R_a = \frac{1}{\alpha_a}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\beta_{ideales Gas} = \frac{1}{T_m} \quad \text{Stoffwerte der WUE bei } T_m = \frac{T_w + T_{fl}}{2}$$

3.9 Erzwungene Konvektion

3.9.1 Durchströmung

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

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

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

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

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

3.9.2 Umströmung

Keine Anströmung: $Re < 0,1$: $Nu_0 = 0,1$ (Platte) $0,3$ (Zylinder) 2 (Kugel)

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

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

$$f_{3,fl} = \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad f_{2,g} = \left(\frac{T}{T_w}\right)^{0,121}$$

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

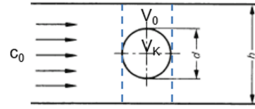
Schräg umströmter Zylinder: Korrekturfaktor f_5 Längs umströmter Zylinder:

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

3.9.3 Umströmung in Durchströmung

Hohlraumanteil:

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



Rohrbündel:

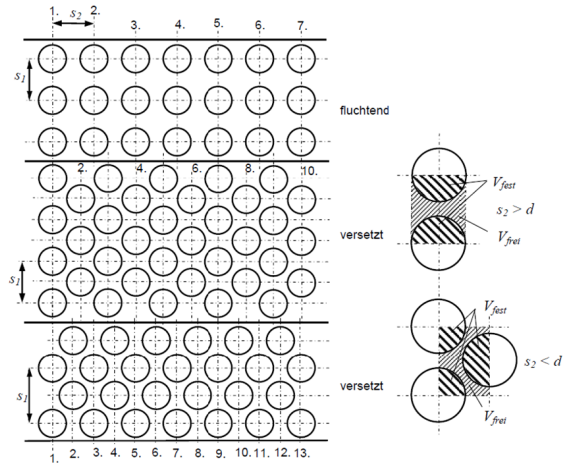
$$a = \frac{s_1}{d} \quad b = \frac{s_2}{d}$$

$$Nu_{Bündel} = Nu_{einzel} f_A$$

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

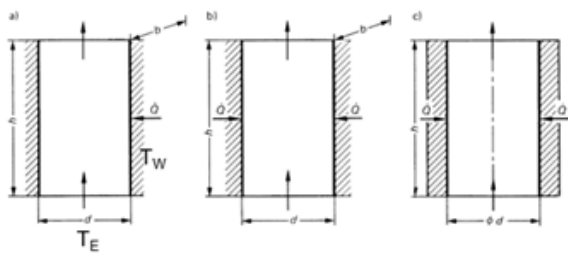
$$f_{A,versetzt} = 1 + \frac{2}{3b}$$

$$n < 10 : f_A = \frac{1 + (n-1)f_A}{n}$$

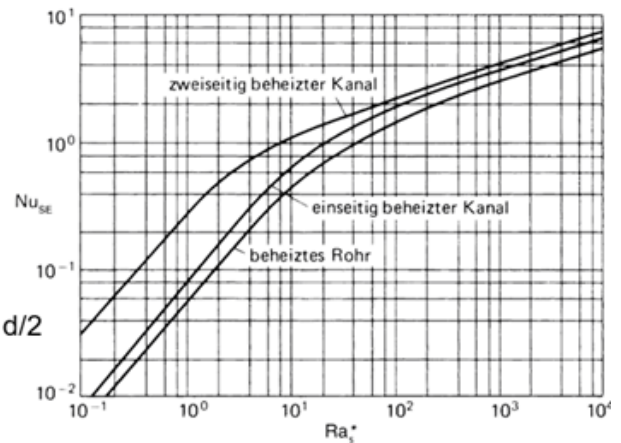


3.10 Freie Konvektion

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 $L_{\text{char}} = r = d/2$



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

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

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

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

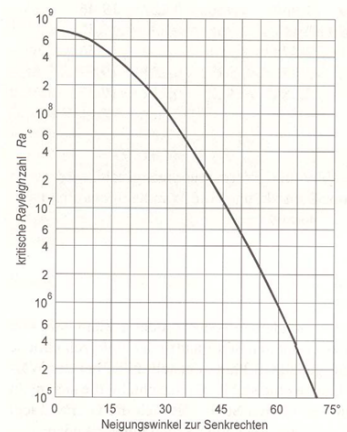
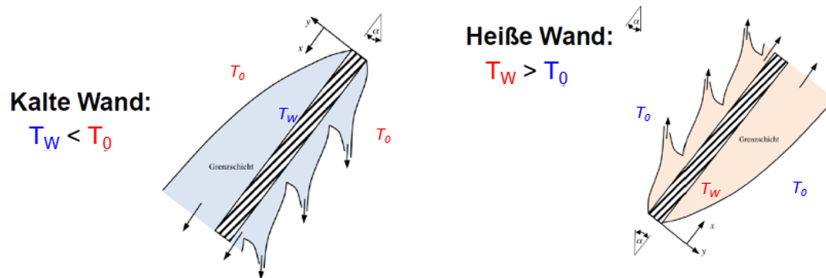
3.10.2 Umströmung

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

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

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

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



Horizontale Wand:

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

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

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

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

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:

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

$$C_s = 5,67$$

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:

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

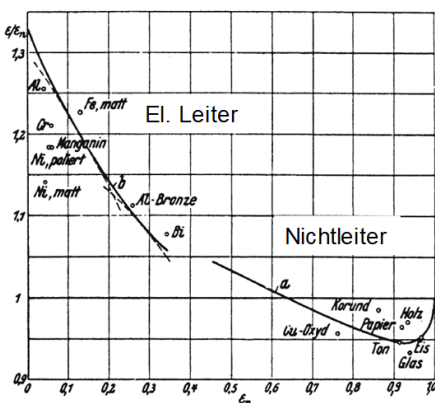
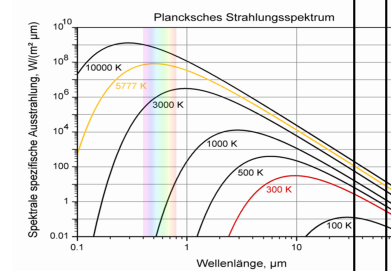
wenn $A_{w2} \gg A_{w1}$:

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

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

Emissionsgrad Umrechnung:

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



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

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:

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_g &= \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} - (\Delta\varepsilon)_g & a_g &= a_{\text{H}_2\text{O}} + a_{\text{CO}_2} - (\Delta\varepsilon)_g \\ a_{\text{H}_2\text{O}} &= \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}(T_w, p_{\text{H}_2\text{O}}^{T_g/T_w}) \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0,45} & a_{\text{CO}_2} &= \varepsilon_{\text{CO}_2}(T_w, p_{\text{H}_2\text{O}}^{T_g/T_w}) \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0,65} \end{aligned}$$

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

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