1 Thermodynamik

isotherm: $\Delta u = 0$ $\quad \Delta T = 0$ $\quad \Delta w = +R\ T \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) = -R\ T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$

isobar: $\Delta w = R\ \Delta T$ $\quad \Delta p = 0 \Rightarrow \int v \mathrm{d}p = 0$ $\quad \Delta h = \Delta q_a$ wenn $\Delta q_R = 0$

isochor: $\Delta v = 0 \Rightarrow \int p \mathrm{d}v = 0$ $\quad \Delta u = \Delta q_a$ wenn $\Delta q_R = 0$

Enthalpie: $h = u + pv$

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

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

1.1 Ideales Gas

$v_{mn} = 22,414\ \frac{\mathrm{Nm}^3}{\mathrm{kmol}}$ $\quad V_n = n\ v_{mn}$ $\quad R = \frac{\mathrm{R_m}}{M}$ $\quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$

$\mathrm{R_m} = 8314{,}47\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kmol\,K}}$ $\quad p\ v = R\ T$ $\quad p\ V = m\ R\ T$ $\quad p\ V = n\ \mathrm{R_m}\ T$

$c_p = \frac{c_{pm}}{M} = R + c_v = R\frac{\kappa}{\kappa - 1}$ $\quad c_p = c_p\big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_p\big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_p\big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$ $\quad \Delta u = c_v\ \Delta T$ $\quad \Delta h = c_p\ \Delta T$

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

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

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

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

1.2 Gemische idealer Gase – Species i

$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{V_i}{V} = \frac{\dot V_i}{\dot V} = \frac{p_i}{p}$ $\quad w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\dot m_i}{\dot m} = y_i \frac{M_i}{M}$ $\quad M = \sum y_i\ M_i$ $\quad M_i = \frac{m_i}{n_i}$

$c_p = \sum c_{pi}\ w_i$ $\quad$ analog für: $c_v,\ \Delta u,\ \Delta h,\ \Delta s$ $\quad c_{mp} = \sum y_i\ c_{mpi}$ $\quad \dot V = A\ c$

1.3 Inkompressible Flüssigkeiten

$c_v = c_p$ $\quad v = \frac{1}{\varrho} = \text{konst.}$ $\quad \dot m = \dot V\ \varrho$

$\Delta u = c_p \Delta T$ $\quad \Delta h = c_p \Delta T + v \Delta p$ $\quad \Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

1.4 Gemische mischbarer, inkompressibler Flüssigkeiten – Species i

$m_i = \frac{V_i}{v_i}$ $\quad v = \sum v_i w_i$ $\quad m = \sum m_i$ $\quad w_i = \frac{m_i}{m}$

$c_p = \sum c_{pi} w_i$ $\quad$ analog für$\Delta u,\ \Delta h,\ \Delta s$ $\quad \Delta s_i = c_{pi} \ln\left(\frac{T_{2i}}{T_{1i}}\right) + R_i \ln\left(\frac{v_{2i}}{v_{1i}}\right)$

$x_i = w_i \frac{M}{M_i} = \varphi_i \frac{v_i\ M_i}{v\ M}$ $\quad w_i = x_i \frac{M_i}{M} = \varphi_i \frac{v}{v_i}$ $\quad \varphi_i = x_i \frac{v\ M}{v_i\ M_i} = w_i \frac{v_i}{v}$

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

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{u - u'}{u'' - u'}$$

$u = (1 - x)\ u' + x u''$ $\quad u = u' + x\ (u'' - u')$ $\quad$ 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: $T_2 = T_1 \ \dfrac{\kappa}{1 + \dfrac{p_1}{p_u}(\kappa - 1)}$ $\qquad \Delta m = \dfrac{m_1 \ (T_2 - \ T_1)}{\kappa \ T_1 - \ T_2}$

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

1.9 Ruhende, stationäre, 2-seitig offene Systeme

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

1.10 Wirkungsgrade

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

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

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

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

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

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

Gütegrad: $\eta_G = \dfrac{\mathrm{EER}}{\mathrm{EER}_{Carnot}}$ $\quad \eta_G = \dfrac{\mathrm{COP}}{\mathrm{COP}_{Carnot}}$

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

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

2 Strömungslehre

Dazu gehört auch die THD Formelsammlung. Notiz: rho = $\varrho \neq p$ = Druck, nü = $\nu \neq v$

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 $p_{ü(z)} = \rho g z \quad g,\ z \downarrow$

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

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} = 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: $F_A = \varrho_{Fl}\ g\ V_{K,eingetaucht}$

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

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

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

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 $p_0 = 1\,\text{atm} = 101\,325\,\text{Pa}$ $T_0 = 15\,°\text{C} = 288{,}15\,\text{K}$ $H_0 = 8430\,\text{m}$

$$\frac{p_{(z)}}{p_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n}\frac{z}{H_0}\right)^{\frac{n}{n-1}} \qquad \frac{T_{(z)}}{T_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n}\frac{z}{H_0}\right) \qquad \frac{\varrho_{(z)}}{\varrho_0} = \left(1 - \frac{n-1}{n}\frac{z}{H_0}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

2.3 Massenbilanz MB

$$\sum \dot m_{ein} - \sum \dot m_{aus} = 0 \qquad \dot m = \varrho\ \dot V \qquad \dot V = A\ c \qquad c \perp A$$

2.4 Energiebilanz EB, siehe auch THD

$$\Delta h + \Delta \frac{c^2}{2} + g\ \Delta z = \Delta q_a + \Delta w_i \qquad \Delta h = \Delta q_a + \Delta q_R + \int v\ \mathrm{d}p$$

$$\int v\ \mathrm{d}p + \Delta q_R + \Delta \frac{c^2}{2} + g\ \Delta z = \Delta w_i \qquad \text{Inkompressibel: } \frac{\Delta p}{\varrho} + \Delta q_R + \Delta \frac{c^2}{2} + g\ \Delta z = \Delta w_i$$

2.5 Impulsbilanz in Richtung i IB$_i$

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

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

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

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

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

Durchflussfunktion ψ

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

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

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

$c_k = a_k = \sqrt{\kappa\ R\ T_k}$ Schallgeschwindigkeit $a = \sqrt{\frac{dp}{d\varrho}} = \sqrt{\kappa\ R\ T}$ 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 $p_a = p_u$

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

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

2.8 Viskosität – Wandschubspannung

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

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

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

γ zeigt weg von der Wand.

2.9 Durchströmung

$NPSH = \frac{p - p_d}{\varrho\ g}$ $\quad \dot{V} = c_{(y \text{ oder } r)}\ dA$ $\quad$ Kanal: $dA = b\ dy$ $\quad$ Rohr: $dA = r\ dr\ d\varphi$

Reynolds Zahl: $Re = \frac{\bar{c}\ L_{char}\ \varrho}{\mu} = \frac{\bar{c}\ L_{char}}{\nu}$ $\quad L_{char} = d_h = \frac{4\ A}{U}$

Reibung: $\Delta q_R = \frac{\Delta p_v}{\varrho} = g\ \Delta h = \left(\xi_F + \lambda \frac{L}{d_h}\right)\frac{\bar{c}^2}{2}$ $\quad \Delta p_v = R_{ges}\ \dot{V}^2$

Widerstand: $R_i = \frac{\varrho}{2}\left(\xi_{Fi} + \lambda_i \frac{L_i}{d_{hi}}\right)$ $\quad$ Seriell: $R_{ges} = \sum R_i$ $\quad$ Parallel: $\frac{1}{R_{ges}} = \left[\sum \sqrt{\frac{1}{R_j}}\right]^2$

2.10 Laminare Durchströmung

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

Couette Strömung:	$\frac{c_{(y)}}{c_{max}} = \frac{y}{h}$	$c_{max} = konst.$	$A = b\ h$	$\bar{c} = \frac{1}{2} c_{max}$
Kanal Strömung:	$\frac{c_{(y)}}{c_{max}} = 4\left[\left(\frac{y}{h}\right) - \left(\frac{y}{h}\right)^2\right]$	$c_{max} = \frac{1}{\mu}\frac{\Delta p_v}{\Delta L}\frac{h^2}{8}$	$A = b\ h$	$\bar{c} = \frac{2}{3} c_{max}$
Rohr Strömung:	$\frac{c_{(r)}}{c_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$	$c_{max} = \frac{1}{\mu}\frac{\Delta p_v}{\Delta L}\frac{R^2}{4}$	$A = R^2\ \pi$	$\bar{c} = \frac{1}{2} c_{max}$

2.11 Turbulente Durchströmung

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

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

2.12 Strömungsmaschinen

Drehzahl $\dot{n}$

Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\ \pi\ \dot{n}$

Umfangsgeschwindigkeit $u = r\ \omega$

Relativgeschwindigkeit w

Absolutgeschwindigkeit c

Index r steht für Radialkomponente

Index u steht für Umfangskomponente

MB: $\dot{m} = \varrho\ A_1\ c_{1r} = \varrho\ A_2\ c_{2r}$

EB: $\Delta p = \varrho\left[\Delta w - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - \Delta q_R\right]$

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

Leistung: $P = M_{Antrieb}\ \omega = \dot{m}\ \Delta w$

Spez. Stutzenarbeit: $\Delta w = c_{2u}\ u_2 - c_{1u}\ u_1 (= Y)$

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

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

2.13 Umströmung

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

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

2.14 Umströmung einer Platte

Char. Länge L_{char} = Umströmte Plattenlänge L bzw. an der Stelle x

Bezugsfläche $A = b\ L$ = 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	$\frac{\tau_w}{\varrho \cdot u_\infty^2} =$	$\frac{0,332}{\sqrt{Re_x}}$	$\frac{0,0296}{\sqrt[5]{Re_x}}$
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 $\alpha = 0°$

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

2.17 Kompressible Flüssigkeiten

Schallgeschwindigkeit: $a = \sqrt{\frac{E}{\varrho}}$ Flüssigkeit in elastischen Rohren: $a = \frac{\sqrt{\frac{E}{\varrho}}}{\sqrt{1 + \frac{d\ E}{s\ E_R}}}$

Joukowski Stoß: $\Delta p = \varrho\ a\ c$ 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: $\Delta w = \frac{6\ \sigma}{\varrho\ d}$

Steighöhe in Kapillaren: $h = \frac{4\ \sigma \cos\gamma}{\varrho\ g\ d}$ Weber Zahl: $We = \frac{\varrho\ c^2\ d}{\sigma}$

Schallgeschwindigkeit: $a = \sqrt{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\varrho}} = \sqrt{\frac{p_0\ \kappa\ \varrho_{g0}}{w_g\ \varrho^2}\left[\frac{\varrho_{g0}}{w_g}\left(\frac{1}{\varrho} - \frac{1-w_g}{\varrho_l}\right)\right]^{-\kappa-1}}$

2.19 Senkrechter Verdichtungsstoß

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

MB: $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{(\kappa+1)\ Ma_1^2}{(\kappa-1)\ Ma_1^2 + 2} \quad > 1$

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

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

$$Ma_2 = \frac{c_2}{a_2} = \sqrt{\frac{(\kappa-1)\ Ma_1^2 + 2}{2\ \kappa\ Ma_1^2 - (\kappa-1)}}$$ $$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1} \quad > 0$$

Neue Ruhebedingungen nach dem Stoß: $\frac{p_2}{p_{T2}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2}\ Ma_2^2\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}}$

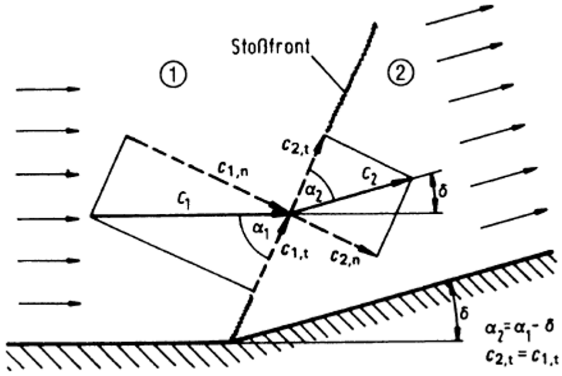
2.20 Schräger Verdichtungsstoß - Verdünnungswellen

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

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

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

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



3 Wärmeübertragung

3.1 Wärmestrom und Wärmewiderstände

$$\Delta T = R_{ges}\ \dot{Q} \qquad\qquad R_{ges} = \frac{1}{k\ A_{wa}}$$

$$R = \frac{1}{k} = R_{ges}\ A_{wa} = \sum R_{einzel} = R_i + R_w + R_a \qquad R_w = \sum_{N_w}^{j=1} R_{w,j}$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R} A_{wa}\ \Delta T = k\ A_{wa}\ \Delta T \qquad \Delta T = T_a - T_i$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_i} A_{wa}\ \Delta T_i = \alpha_i\ A_{wa}\ \Delta T \qquad \Delta T_i = T_{wi} - T_i$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_a} A_{wa}\ \Delta T_a = \alpha_a\ A_{wa}\ \Delta T \qquad \Delta T_a = T_a - T_{wa}$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_{w,j}} A_{wa}\ \Delta T_{w,j} \qquad \Delta T_{w,j} = T_{w,j} - T_{w,j-1}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_H\ |\Delta h_H| = \dot{m}_H\ c_{p,H}\ |\Delta T_H| = \dot{W}_H\ |\Delta T_H| \qquad \Delta T_H = T_{H2} - T_{H1}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_K\ \Delta h_K = \dot{m}_K\ c_{p,K}\ \Delta T_H = \dot{W}_K\ \Delta T_K \qquad \Delta T_K = T_{K2} - T_{K1}$$

3.2 Ebene Wände – Platten

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

3.3 Rohr – Zylinderwände

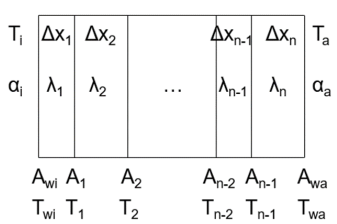
$A_{wa} = d_a\ \pi\ L$, Deckflächen vernachlässigt $\quad R_i = \dfrac{d_a}{d_i}\dfrac{1}{\alpha_i} \quad R_{w,j} = \dfrac{d_a}{a}\dfrac{1}{\lambda_j}\ln\left(\dfrac{d_j}{d_{j-1}}\right) \quad R_a = \dfrac{1}{\alpha_a}$

3.4 Kugelwände

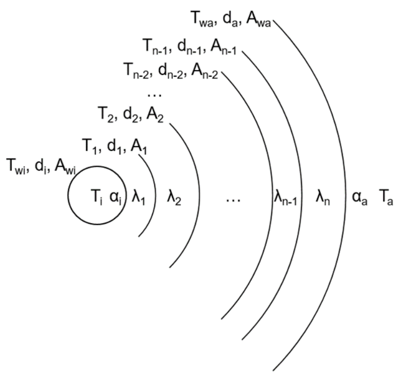
$$A_{wa} = d_a^2\ \pi \qquad R_i = \left(\frac{d_a}{d_i}\right)^2 \frac{1}{\alpha_i} \qquad R_{w,j} = \frac{d_a^2}{2\ \lambda_j}\left(\frac{1}{d_{j-1}} - \frac{1}{d_j}\right) \qquad R_a = \frac{1}{\alpha_a}$$

3.5 Parallele Wandschichten

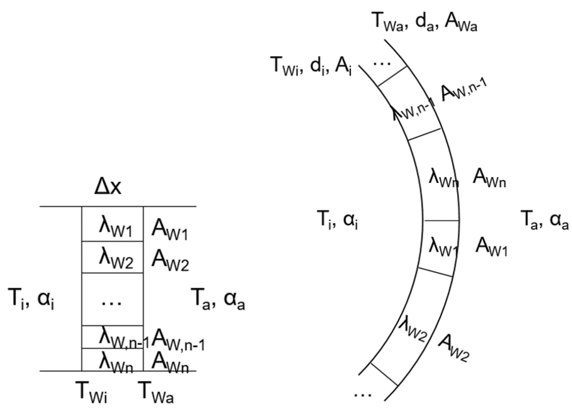
$$\frac{1}{R_w} = \sum_{N_{w(j)}}^{j=1} \frac{1}{R_{w,j}} \qquad \dot{Q} = \dot{Q}_{w,j} = \sum_{N_{w(j)}}^{j=1} \dot{Q}_{w,j} \qquad R_{w,j} = R_{w,j,seriell}\ \frac{A_{wa}}{A_{wa,j}}$$



(a) Serielle Wandschicht



(b) Zylinder- und Kugelwand



(c) Parallele Wandschichten

3.6 Rippen

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

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

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

3.7 Transiente Wärmeleitung

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

3.8 Konvektion

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

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

$\beta_{ideales\ Gas} = \dfrac{1}{T_m}$ $\qquad$ Stoffwerte der WUE bei $T_m = \dfrac{T_w + T_{fl}}{2}$

3.9 Erzwungene Konvektion

3.9.1 Durchströmung

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

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

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

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

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

3.9.2 Umströmung

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

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

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

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

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

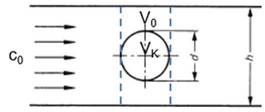
Schräg umströmter Zylinder: $\qquad$ Korrekturfaktor f_5 $\qquad$ Längs umströmter Zylinder:

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

3.9.3 Umströmung in Durchströmung

Hohlraumanteil:

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



Rohrbündel:

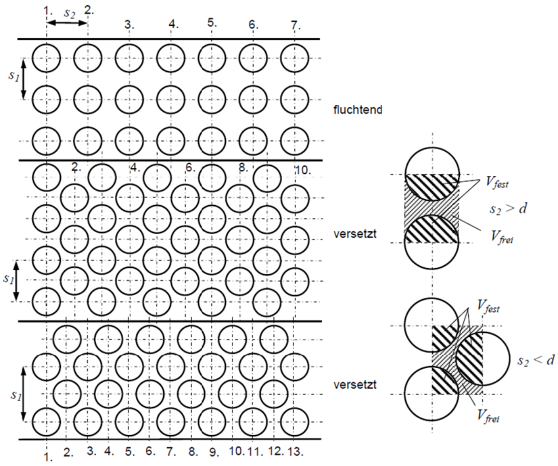
$$a = \frac{s_1}{d} \qquad b = \frac{s_2}{d}$$

$$Nu_{Bündel} = Nu_{einzel} \;\; f_A$$

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

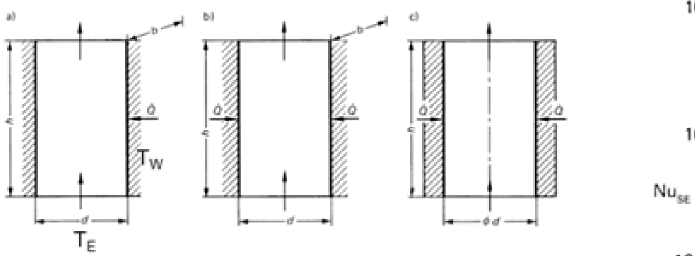
$$f_{A,versetzt} = 1 + \frac{2}{3\;b}$$

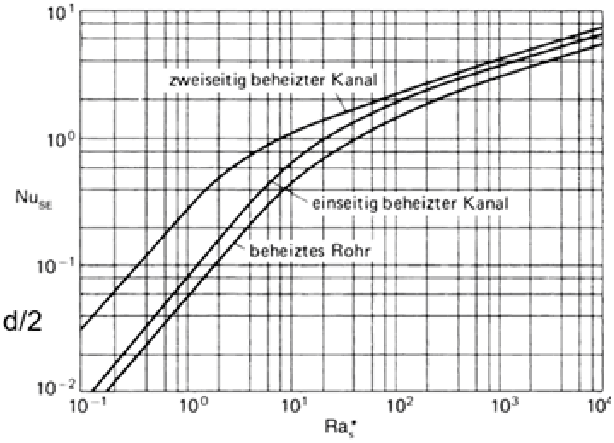
$$n < 10: f_A = \frac{1 + (n-1)f_A}{n}$$



3.10 Freie Konvektion

3.10.1 Durchströmung





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

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

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

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

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

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

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

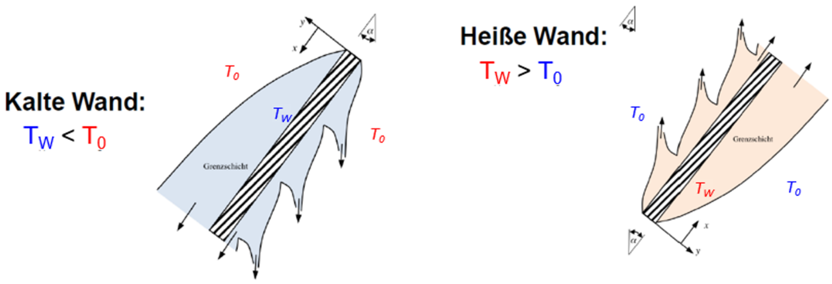
3.10.2 Umströmung

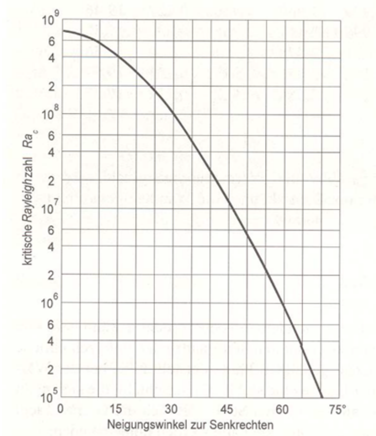
Vertikale Wand: $Nu = (0,825 + 0,387\, Ra^{1/6}\; f_1)$ $\qquad f_1 = (1 + 0,671\, Pr^{-9/16})^{-8/27}$

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 °





Horizontale Wand:

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

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

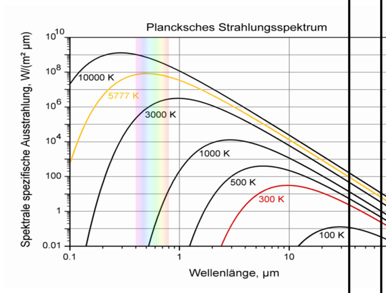
Horizontaler Zylinder: $\qquad Nu = \left(0,752 + 0,387\,\sqrt[6]{Ra}\, f_3\right)^2$ $\qquad f_3 = \left(1 + 0,721\, Pr^{-11/20}\right)^{-8/27}$

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

3.10.3 Überlagerung mit erzwungener Konvektion

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

3.11 Wärmestrahlung zw. Oberflächen



Strahlungsbilanz: $a + r + t = 1$

Planck'sches Gesetz: $i_{s(\lambda,T)} = \dfrac{\mathrm{C}_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\dfrac{\mathrm{C}_2}{\lambda\ T}\right) - 1 \right)}$

Mit: $\mathrm{C}_1 = 3{,}7418 \cdot 10^{-16}\,\mathrm{W\,m^2}$ $\quad \mathrm{C}_2 = 1{,}438 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{K\,m^2}$

Wien'sches Gesetz: $\lambda_{s,max} = \dfrac{2898}{T} [\mu\mathrm{m}]$

Stefan Boltzmann Gesetz: $\dot{q}_{s(T)} = \int_{\lambda=0}^{\infty} i_{s(\lambda,T)}\ \mathrm{d}\lambda = \mathrm{C_s} \left(\dfrac{T}{100}\right)^4$ $\quad \mathrm{C_s} = 5,67$

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

Kirchhoff'sches Gesetz: $a = \varepsilon$

Wärmestrom zw. zwei Flächen: $\dot{Q}_{12} = C_{12}\ A_{w1} \left[\left(\dfrac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\dfrac{T_2}{100}\right)^4 \right]$

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

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

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

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

Beliebig orientierte Flächen: $C_{12} = \mathrm{C_s} \dfrac{\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \varphi_{12}}{1 - (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\,\varphi_{12}\ \varphi_{21}}$

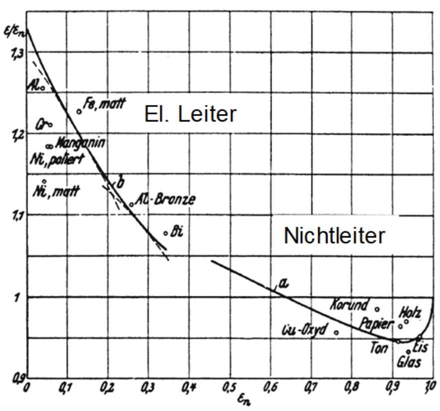
mit Einstrahlzahlen: $\varphi_{12} = A_{w2} \dfrac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{r^2\ \pi} = \varphi_{21} \dfrac{A_{w2}}{A_{w1}}$

Umschlossener Körper 1: $C_{12} = \mathrm{C_s} \left[\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{A_{w1}}{A_{w2}} \left(\dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}$

wenn $A_{w2} \gg A_{w1}$: $C_{12} = \varepsilon_1\ \mathrm{C_s}$

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

Emissionsgrad Umrechnung: $\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_n}$



3.12 Einseitig konstante Temperatur, Gleichstrom und Gegenstrom

Übertragungseinheit : $N_i = \dfrac{k\ A_{wa}}{\dot{m}_i\ cp_i}$

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

Mittlere Wandtemperaturen: $T_{wH} = T_H - \dfrac{k\ A_{wa}}{\alpha_H\ A_{wH}}\Delta T$

$$T_{wK} = T_K + \frac{k\ A_{wa}}{\alpha_K\ A_{wK}}\Delta T$$

3.13 Einseitig konstante Temperatur

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

3.14 Gleichstrom und Gegenstrom

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

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 → OK
   b) Nein → 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

$$\Delta T_2 = \Delta T_1\ \mathbf{e}^{-N} \qquad N \ldots \text{ siehe 3.13}$$

3.16.2 Gleichstrom

$$T_{H2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1})\,\frac{\dot W_K}{\dot W_H + \dot W_K}\left(1 - \mathbf{e}^{-\mu\ k\ A_{wa}}\right) \qquad \mu = \frac{1}{\dot W_H} + \frac{1}{\dot W_K}$$

$$T_{K2} = T_{K1} - (T_{H1} - T_{K1})\,\frac{\dot W_K}{\dot W_H + \dot W_K}\left(1 - \mathbf{e}^{-\mu\ k\ A_{wa}}\right)$$

3.16.3 Gegenstrom

$$\mu = \left|\frac{1}{\dot W_H} - \frac{1}{\dot W_K}\right|$$

$$T_{H2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1})\,\frac{1 - \ \mathbf{e}^{-\mu\ k\ A_{wa}}}{1 - \frac{\dot W_H}{\dot W_K}\ \mathbf{e}^{-\mu\ k\ A_{wa}}} \qquad T_{K2} = T_{H1} - (T_{H1} - T_{K1})\,\frac{1 - \frac{\dot W_H}{\dot W_K}}{1 - \frac{\dot W_H}{\dot W_K}\ \mathbf{e}^{-\mu\ k\ A_{wa}}}$$

3.17 Rekuperatoren allgemein

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

$$R_H = \frac{\dot W_H}{\dot W_K} = \frac{1}{R_K} \qquad \Theta = \frac{T_H - T_K}{T_{H1} - T_{K1}} = F\ \Theta_{Gegenstrom}$$

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: $\varepsilon_g,\ T_g$) einerseits und Wänden ($T_w,\ \varepsilon_w$)
und kaltem Gas an Wänden ($T_w,\ a_g$) andererseits:

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

mit $\varepsilon_g = \varepsilon_{H2O} + \varepsilon_{CO2} - (\Delta\varepsilon)_g$
Emissionsgrade = Absorptionsgrade aus Diagrammen in Abhängigkeit von Temperatur, Druck, Partialdruck von CO2 bzw. H2O, überlappenden Banden und gleichwertiger Schichtdicke s