

ALLGEMEINE BEZIEHUNGENDefinitionen

- Hyperbelfunktion:

Sinus Hyperbolicus:

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Cosinus Hyperbolicus:

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Tangens Hyperbolicus:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = 1 - \frac{2}{e^{2x} + 1}$$

Rechenregeln:

$$\sinh(x-y) = \sinh(x) \cdot \cosh(y) - \cosh(x) \cdot \sinh(y)$$

$$\cosh(x-y) = \cosh(x) \cdot \cosh(y) - \sinh(x) \cdot \sinh(y)$$

$$\tanh(x+y) = \frac{\tanh(x) + \tanh(y)}{1 + \tanh(x) \cdot \tanh(y)}$$

$$\frac{d}{dx}(\sinh x) = \cosh x; \quad \frac{d}{dx}(\cosh x) = \sinh x$$

Geometrische Beziehungen

- Umfang (Perimeter) und Querschnittsfläche eines Kreises:

$$P = \pi \cdot D, \quad S = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (\text{D - Durchmesser})$$

- Oberfläche und Volumen einer Kugel:

$$O = \pi \cdot D^2, \quad V = \frac{\pi}{6} D^3$$

WÄRMEÜBERTRAGUNG IN FESTKÖRPERNDefinitionen

- Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda, \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

- Wärmestrom:

$$\dot{q} \quad \text{oder} \quad \dot{Q}, \quad [W]$$

pro Länge:

$$\dot{q}' = \frac{\dot{q}}{L} \quad \text{oder} \quad \dot{Q}' = \frac{\dot{Q}}{L}, \quad \left[\frac{W}{m} \right]$$

pro Fläche:

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{q}}{L \cdot B} \quad \text{oder} \quad \dot{Q}'' = \frac{\dot{Q}}{L \cdot B}, \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

pro Volumen:

$$\dot{q}''' = \frac{\dot{q}}{L \cdot B \cdot H} \quad \text{oder} \quad \dot{Q}''' = \frac{\dot{Q}}{L \cdot B \cdot H}, \quad \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

- Temperaturleitfähigkeit: (thermische Diffusivität)

$$a = \left(\frac{\lambda}{\rho \cdot c} \right)_{\text{Körper}}, \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

- Innere Energie eines Festkörperelementes:

$$U = \rho \cdot \Delta V \cdot c \cdot T$$

- Übertemperatur:

$$\theta = T - T_\infty$$

- Biot-Zahl:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L_{\text{Körper}}}{\lambda_{\text{Körper}}} \quad (L - \text{charakteristische Länge})$$

- Fourier-Zahl:

$$Fo = \frac{a \cdot t}{L_{Körper}^2}$$

Empirische Gesetze

- Fourier'sches Gesetz: $\dot{q}_{Leit}'' = -\lambda \frac{dT}{dn}$, (n ist die Normale zur Flächen-Isothermen T)

Leitung in x-Richtung:

$$\dot{q}_{Leit}'' = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

- Elektrischer Leitungswiderstand:

$$R_e = \frac{\rho_e \cdot l}{a} \quad (l - \text{Leiterlänge}, a - \text{Leiterquerschnittsfläche}, \rho_e - \text{spez. elektr. Widerstand } [\Omega \cdot m])$$

- Elektrische Wärmequelle:

$$\dot{Q}_{Quellen} = I^2 \cdot R_e \quad (I - \text{Stromstärke})$$

- Elektrische Wärmestromdichte:

$$\dot{Q}_{Quellen}''' = \frac{I^2 \cdot \rho_e}{a^2}$$

Energiebilanzen am Volumenelement

- Wärmeleitungsgleichung:

kartesische Koordinaten:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla} \bullet (\lambda \cdot \bar{\nabla} T) + \dot{Q}_{Quellen}'''$$

Zylinderkoordinaten:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{Quellen}'''$$

Kugelkoordinaten:

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \phi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \dot{Q}_{Quellen}''' \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \dot{Q}_{Quellen}''' \end{aligned}$$

Ersatzschaltwerke (für Körper ohne innere Wärmequellen)

- Wärmewiderstand:

$$R_W, \quad \left[\frac{K}{W} \right]$$

für ebene Wand (Leitung):

$$R_{W,eben} = \frac{1}{A} \frac{b}{\lambda} \quad b: \text{Dicke der Wand}$$

für zylindrische Wand (Leitung):

$$R_{W,zyl} = \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi \cdot \lambda \cdot L} \quad L: \text{Länge des Zylinders}$$

konvektiv:

$$R_{W,kon} = \frac{1}{A} \frac{1}{\alpha}$$

- Wärmedurchgangskoeffizient:

$$k = \frac{1}{A_B \cdot \sum_i R_{Wi}}, \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (A_B - \text{Bezugsfläche})$$

ebene Wand: $A_B = A$)

- Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{ges} = k \cdot A_B \cdot (T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$$

- Linearer Wärmedurchgangskoeffizient: (Zylinder, bezogen auf Zylinderlänge)

$$k_L = \frac{\dot{Q}_{radial}}{L \cdot \Delta T} = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_H \cdot r_H} + \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_K \cdot r_K}}, \quad \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

- Kritischer Rohrradius:

$$r_{2krit} = \frac{\lambda}{\alpha}$$

Eindimensionale Wärmebetrachtungen von Rippen

- Rippenparameter:

$$m^2 = \frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot S} \quad (\text{P} - \text{Umfang (Perimeter); S} - \text{Querschnittsfläche})$$

- Übertemperatur am Rippenfuss:

$$\theta_F = T_F - T_\infty$$

- Allgemeine Rippendifferentialgleichung: (eindimensional)

$$\rho \cdot c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dV}{dx} T \right) = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \cdot c \frac{\partial}{\partial x} (S \cdot u \cdot T) - \frac{dA}{dx} \alpha \cdot (T - T_\infty) \\ + \dot{Q}_{\text{Quellen}} \frac{dV}{dx} - \dot{Q}_{\text{Strahl.}} \frac{dA}{dx}$$

(A – Umfangsfläche; S – Querschnittsfläche)

Vereinfachte Rippengleichung:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \cdot \theta = 0$$

Allgemeine Lösung der vereinfachten Rippengleichung:

$$\theta(x) = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x} \quad \text{oder} \quad \theta(x) = A_1 \cdot \sinh(m \cdot x) + A_2 \cdot \cosh(m \cdot x)$$

Lösung für adiabaten Kopf:

$$\theta(x) = \theta_F \cdot \frac{\cosh[m \cdot (L-x)]}{\cosh(m \cdot L)}$$

Lösung für sehr lange Rippe:

$$\theta(x) = \theta_F \cdot e^{-m \cdot x}$$

- Wärmestrom am Rippenfuss:

$$\dot{Q}_F = -\lambda \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}$$

für vereinfachte Rippe und adiabaten Kopf:

$$\dot{Q}_F = \lambda \cdot S \cdot \theta_F \cdot m \cdot \tanh(m \cdot L)$$

- Rippenwirkungsgrad:

$$\eta_R = \frac{\text{Übertragene Wärmemenge, } \theta_{\text{Oberfläche}} = \theta(x)}{\text{Maximal übertragbare Wärmemenge, } \theta_{\text{Oberfläche}} = \theta_F}$$

$$\eta_R = \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta_F \cdot m \cdot \tanh(m \cdot L)}{\alpha \cdot P \cdot L \cdot \theta_F} = \frac{\tanh(m \cdot L)}{m \cdot L}$$

Instationäre Wärmeleitung

- Instationäre Wärmeleitungsgleichung: (o-dimensional)

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{A \cdot \alpha}{M \cdot c} (T - T_\infty), \quad (\text{A} - \text{Aussenfläche, M} - \text{Masse des Körpers})$$

- Charakteristische Zeitkonstante:

$$\tau = \frac{M \cdot c}{A \cdot \alpha}$$

- Lösung der o-dim., instat. Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left(-\frac{\alpha \cdot A}{M \cdot c} t \right) = \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \quad (T_i - \text{Starttemperatur bei } t = 0)$$

- Diffusionslänge:

$$x_D = \sqrt{a \cdot t_D}$$

WÄRMEÜBERTRAGUNG IN FLUIDEN

Definitionen

- Kinematische Viskosität:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

- Wandschubspannung:

$$\tau_w = \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$$

- Widerstandsbeiwert:

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_\infty^2}$$

- Wandwiderstandskraft:

$$F = B \cdot \int_0^L \tau_w \cdot dx$$

- Spezifischer Wandwärmestrom:

$$\dot{q}_w'' = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$$

- Wandwärmestrom:

$$\dot{Q}_w = B \cdot \int_0^L \dot{q}_w'' \cdot dx$$

- Wärmeübergangskoeffizient:

$$\alpha, \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

über Länge gemittelt:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha(x) dx$$

- Filmtemperatur:

$$T_{Film} = \frac{1}{2} (T_w + T_\infty)$$

- Reynoldszahl:

(Bezugstemperatur für die Stoffwerte ist bei umströmten Körpern die Filmtemperatur!)

$$Re_L = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu}, \quad (\text{lokal: } Re_x = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x}{\mu})$$

- Nusselt-Zahl:

(Bezugstemperatur für die Stoffwerte ist bei umströmten Körpern die Filmtemperatur!)

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot L}{\lambda_{Fluid}}, \quad (\text{lokal: } Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda_{Fluid}})$$

- Prandtl-Zahl:

(Bezugstemperatur für die Stoffwerte ist bei umströmten Körpern die Filmtemperatur!)

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda_{Fluid}} = \frac{\nu}{a_{Fluid}}$$

- Peclét-Zahl:

$$Pe_L = Re_L \cdot Pr$$

Empirische Gesetze

- Konvektives Wärmeübergangsgesetz:

$$\dot{q}_{kon}'' = \alpha \cdot (T_{Wand} - T_\infty)$$

Bilanzen am Volumenelement

- Masse (Kontinuität):

(stationär, inkompressibel)

$$div(\vec{v}) = 0$$

2-dim. kartesische Koordinaten:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

- Impuls:

(stationär, inkompressibel)

$$\rho \cdot (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \mu \cdot \vec{\nabla}^2 \vec{v} + \rho \cdot \vec{g}$$

2-dim. kartesische Koordinaten:

$$\rho \cdot \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho \cdot g_x, \quad (\text{x-Komp.})$$

$$\rho \cdot \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho \cdot g_y, \quad (\text{y-Komp.})$$

- Energie:

(stationär, inkompressibel)

$$\rho \cdot c \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) T = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + \mu \cdot \Phi + \dot{Q}_{Quellen}''' , \quad (\Phi - \text{Dissipation})$$

2-dim. kartesische Koordinaten:

$$\rho \cdot c \cdot \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \cdot \Phi + \dot{Q}_{Quellen}$$

$$\Phi = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Laminare Grenzschicht an der ebenen Wand

- Kritische Re-Zahl:

$$Re_{L,krit} = 10^5$$

- Dicke der Geschwindigkeitsgrenzschicht:

$$\frac{\delta}{x} = 4.92 \cdot Re_x^{-1/2}$$

- Dicke der Temperaturgrenzschicht:

$$\frac{\delta}{\delta_T} = Pr^{1/3}$$

- Lokaler Widerstandsbeiwert:

$$c_{f,x} = 0.664 \cdot Re_x^{-1/2}$$

über Länge gemittelt:

$$\bar{c}_{f,L} = 2 \cdot c_{f,x=L} = 1.328 \cdot Re_L^{-1/2}$$

- Nusselt-Zahl:

$$Nu_x = 0.332 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3}, \quad (Pr > 0.6)$$

$$Nu_x = 0.565 \cdot (Re_x \cdot Pr)^{1/2}, \quad (Pr < 0.6)$$

$$Nu_x = \frac{0.3387 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.0468 / Pr)^{2/3} \right]^{1/4}}, \quad (Pe_x > 100)$$

über Länge gemittelt:

$$\overline{Nu} = 2 \cdot Nu_{x=L}; \quad (\bar{\alpha} = 2 \cdot \alpha_{x=L})$$

Turbulente Grenzschicht an der ebenen Wand

- Lokaler Widerstandsbeiwert:

$$c_{f,x} = 0.0592 \cdot Re_x^{-1/5}, \quad (Re_x \leq 10^7)$$

- Nusselt-Zahl:

$$Nu_x = 0.0296 \cdot Re_x^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$$

Laminare Rohrströmung

- Kritische Re-Zahl:

$$Re_{D,krit} = \left(\frac{\rho \cdot u_m \cdot D}{\mu} \right)_{krit} = 2300$$

- Gemittelte Geschwindigkeit:
(konst. Volumenstrom)

$$u_m = \frac{1}{A} \int_A u(r) dA$$

- Radiales Geschwindigkeitsprofil:

$$u(r) = 2 \cdot u_m \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad u_m = - \frac{r_0^2}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{dp}{dx}$$

- Hydrodynamische Einlauflänge:

$$\left(\frac{X_{D,h}}{D} \right)_{lam} = 0.05 \cdot Re_D \quad (X_{D,h} - \text{Einlauflänge}, D - \text{Rohrdurchmesser})$$

- Druckverlust

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\lambda}{D} \frac{1}{2} \rho \cdot u_m^2, \quad \lambda = \frac{64}{Re_D} \quad (\text{Moody-Reibungsfaktor})$$

- Thermische Einlauflänge

$$\left(\frac{X_{D,T}}{D} \right)_{lam} = 0.05 \cdot Re_D \cdot Pr, \quad (X_{D,T} - \text{Einlauflänge}, D - \text{Rohrdurchmesser})$$

- Temperaturverteilung bei aufgeprägtem Wandwärmestrom \dot{q}_W'' :

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\dot{q}_W'' \cdot U}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot x \quad (T_{m,e} - \text{Temperatur am Eintritt}, U - \text{innerer Rohrumfang})$$

Nusselt-Zahl:

$$Nu_D = 4.36 \quad (\text{ohne Einlaufeffekt})$$

- Temperaturverteilung bei aufgeprägter Wandtemperatur T_s :

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,e}} = \exp\left(-\frac{U \cdot x}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot \bar{\alpha}_x\right), \quad (\bar{\alpha}_x = \bar{\alpha} \text{ falls Einlauflänge klein})$$

Mittlere Temperaturdifferenz:
(logarithmische
Mitteltemperatur)

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_e}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_e)}$$

Nusselt-Zahl:

$$Nu_D = \left[3.66 + \frac{0.067 \cdot \left(Re_D \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{1.33}}{1 + 0.1 \cdot Pr \cdot \left(Re_D \cdot \frac{D}{L} \right)^{0.83}} \right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

(mit Einlaufeffekt; $Pr \approx 1$)

$$Nu_D = 3.66 \quad (\text{ohne Einlaufeffekt})$$

Turbulente Durchströmung von Rohren und Kanälen

- Hydraulischer Durchmesser:

$$d_h = 4 \cdot \frac{\text{durchströmter Querschnitt}}{\text{benetzter Umfang}}$$

- Hydraulische Einlauflänge:

$$10 \leq \left(\frac{X_{D,h}}{D} \right)_{turb} \leq 60$$

- Thermische Einlauflänge

$$10 \leq \left(\frac{X_{D,T}}{D} \right)_{turb} \leq 40$$

- Nusselt-Zahl:

$$Nu_{d_h} = 0.0235 \cdot \left(Re_{d_h}^{0.8} - 230 \right) \cdot \left(1.8 \cdot Pr^{0.3} - 0.8 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Natürliche Konvektion

- Charakteristische Ausdehnung:
(Horizontale Platte)

$$L = \frac{A}{P} \quad (A - \text{Plattenfläche}; P - \text{Plattenumfang})$$

- Thermischer Ausdehnungskoeffizient:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

für ideales Gas:

$$\beta = \frac{1}{T}$$

- Grashof-Zahl:

(Bezugstemperatur für die Stoffwerte ist die Filmtemperatur!) $Gr_H = \frac{g \cdot \beta (T_w - T_\infty) H^3}{\nu^2}$

- Rayleigh-Zahl:

(Bezugstemperatur für die Stoffwerte ist die Filmtemperatur!) $Ra_H = Gr_H \cdot Pr$

- Kritische Rayleigh-Zahl:

$$Ra_{H,krit} = 10^9$$

- Nusselt-Zahl:

$$\overline{Nu}_H = \left(\frac{Pr}{Pr + 0.986 \cdot Pr^{1/2} + 0.492} \right)^{1/4} Ra_H^{1/4} \quad (\text{laminar})$$

$$\overline{Nu}_H = 0.13 \cdot Ra_H^{1/3} \quad (10^9 < Ra_H < 10^{12}; \text{turbulent})$$

VERDAMPFUNG UND KONDENSATIONGefäßssieden

- Wärmestromdichte:

$$\dot{q}'' = \alpha \cdot (T_s - T_{\text{sät}})$$

- Kritische Wärmestromdichte:
(nach Zuber)

$$\dot{q}_{W\max} = 0.149 \cdot h_{fg} \cdot \rho_g \left[\frac{\gamma \cdot g \cdot (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4}$$

(h_{fg} - Verdampfungsenthalpie;
 ρ_f - Flüssigkeitsdichte;
 ρ_g - Dampfdichte;

- Überdruck in Dampfblase:
(Young-Laplace-Gleichung)

$$\Delta p = p_d - p_f = \frac{2 \cdot \gamma}{R}$$

γ - Oberflächenspannung)

Filmkondensation

- Jakob-Zahl

$$Ja = \frac{c_{p,f} \cdot (T_{\text{sät}} - T_W)}{h_{fg}}$$

- Grenzschichtdicke:

$$\delta(x) = \left[\frac{4 \cdot \lambda_f \cdot \mu_f \cdot (T_{\text{sät}} - T_W)}{g \cdot \rho_f \cdot (\rho_f - \rho_g) \cdot h_{fg}} \cdot x \right]^{1/4}$$

- Effektive Verdampfungswärme:

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0.68 \cdot Ja)$$

- Nusselt-Zahl:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot H}{\lambda_f} = 0.943 \cdot \left[\frac{g \cdot \rho_f \cdot (\rho_f - \rho_g) \cdot h'_{fg} \cdot H^3}{\mu_f \cdot \lambda_f \cdot (T_{\text{sät}} - T_W)} \right]^{1/4}$$

STRAHLUNGDefinitionen

- Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{c_0}{v}, \quad c_0 = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- Absorptions-, Reflektions- und Transmissionsvermögen:

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{\dot{q}_\alpha(\lambda, T)}{\dot{q}''(\lambda, T)}; \quad \rho(\lambda, T) = \frac{\dot{q}_\rho(\lambda, T)}{\dot{q}''(\lambda, T)}; \quad \tau(\lambda, T) = \frac{\dot{q}_\tau(\lambda, T)}{\dot{q}''(\lambda, T)}$$

- Emissionsvermögen:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{\dot{q}_\varepsilon(\lambda, T)}{\dot{q}''(\lambda, T)}$$

Gesetze

- Energieerhaltung an der Grenzfläche:

$$\alpha(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1$$

- Kirchhoff'sches Gesetz:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$$

- Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const} = 2898 \mu\text{m} \cdot K$$

- Boltzmann'sches Strahlungsgesetz:

$$\dot{q}_s'' = \sigma \cdot T^4, \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad (\text{Boltzmann-Konstante})$$

- Gesamte Intensität:

$$I_{o,e} = \frac{\dot{q}''}{\pi} = \frac{E}{\pi}, \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot \text{ster}} \right]$$

- Lambert-Beer'sches Absorptionsgesetz:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-a \cdot x}, \quad (a - \text{Absorptionskoeffizient})$$

- Formfaktor:

$$\varphi_{12} = \frac{\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}}{\dot{q}_1'' \cdot A_1}$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2$$

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

$$\sum_{i=1}^n \varphi_{li} = 1$$

- Netto-Strahlungsaustausch:

$$\dot{Q}_{l \leftrightarrow 2}; \quad (C_s = 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}, \text{ modifizierte Boltzmann-Konstante})$$

Schwarze Körper:

$$\dot{Q}_{l \leftrightarrow 2} = A_1 \cdot \varphi_{12} \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Graue, parallele Flächen:

$$\dot{Q}_{l \leftrightarrow 2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Graue, umschliessende Körper:

$$\dot{Q}_{l \leftrightarrow 2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \cdot A_1 \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$