

Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eines Gasgemisches als Funktion der Temperatur und der Zusammensetzung

Verwendung: $\lambda_{GG}(\vartheta_{GG}, x_{GG})$

ϑ_{GG} in $^{\circ}\text{C}$ und x_{GG} als Vektor mit den Komponenten: CO_2 , H_2O , Ar, O_2 und N_2

Literatur: [1] FDBR-Handbuch, Vulkan Verlag, Essen 1980
 [2] Baehr, H. D.: Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen. 10 erweiterte Auflage, Springer Verlag, 2000

$\text{W} \equiv 0.001 \cdot \text{kW}$ $\text{kJ} \equiv \text{kW} \cdot \text{sec}$ $\text{bar} := 10^5 \cdot \text{Pa}$ $^{\circ}\text{C} \equiv \text{K}$ $\text{h} \equiv 3600 \cdot \text{sec}$

Definition der Polynomkoeffizienten nach [1] Seite 4.2.6-2.1:

	CO_2	H_2O	Ar	O_2	N_2
PolyKoeffWaermeleit :=	$0.144153 \cdot 10^{-1}$	$0.151270 \cdot 10^{-1}$	$0.163607 \cdot 10^{-1}$	$0.245662 \cdot 10^{-1}$	$0.242362 \cdot 10^{-1}$
	$0.799242 \cdot 10^{-4}$	$0.893329 \cdot 10^{-4}$	$0.511038 \cdot 10^{-4}$	$0.735218 \cdot 10^{-4}$	$0.675179 \cdot 10^{-4}$
	$-0.595206 \cdot 10^{-8}$	$0.258382 \cdot 10^{-7}$	$-0.279306 \cdot 10^{-7}$	$-0.173951 \cdot 10^{-7}$	$-0.301456 \cdot 10^{-7}$
	$-0.754376 \cdot 10^{-11}$	$-0.176029 \cdot 10^{-10}$	$0.127885 \cdot 10^{-10}$	$0.821291 \cdot 10^{-11}$	$0.168347 \cdot 10^{-10}$
	$0.189975 \cdot 10^{-14}$	$0.530991 \cdot 10^{-14}$	$-0.260257 \cdot 10^{-14}$	$-0.261576 \cdot 10^{-14}$	$-0.475435 \cdot 10^{-14}$

Gaskonstanten nach [2] Seite 595:

$$R_{\text{H}_2\text{O}} := 0.46152 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad R_{\text{O}_2} := 0.25984 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad R_{\text{Ar}} := 0.20813 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{CO}_2} := 0.18892 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad R_{\text{N}_2} := 0.29680 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{w}} := \begin{pmatrix} R_{\text{CO}_2} \\ R_{\text{H}_2\text{O}} \\ R_{\text{Ar}} \\ R_{\text{O}_2} \\ R_{\text{N}_2} \end{pmatrix}$$

$$\vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas}) := \frac{\vartheta_{Gas}}{1 \cdot ^\circ C}$$

$$\lambda_{Komp}(\vartheta_{Gas}) := \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^4 \left(\text{PolyKoeffWaermeleit}_{i,0} \cdot \vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas})^i \cdot \frac{W}{m \cdot K} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\text{PolyKoeffWaermeleit}_{i,1} \cdot \vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas})^i \cdot \frac{W}{m \cdot K} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\text{PolyKoeffWaermeleit}_{i,2} \cdot \vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas})^i \cdot \frac{W}{m \cdot K} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\text{PolyKoeffWaermeleit}_{i,3} \cdot \vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas})^i \cdot \frac{W}{m \cdot K} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\text{PolyKoeffWaermeleit}_{i,4} \cdot \vartheta_{RG}(\vartheta_{Gas})^i \cdot \frac{W}{m \cdot K} \right) \end{array} \right] \quad \text{Gl 4.2.6-2/1}$$

Gaskonstante des Gases:

$$R_{RG}(x_{RG}) := \sum_{j=0}^4 (x_{RG_j} \cdot R_j)$$

Wärmeleitfähigkeit des Gases:

Gl 4.3.5-1/6

$$\lambda_{GG}(\vartheta_{Gas}, x_{RG}) := \left[1 + \frac{x_{RG_1} \cdot \frac{R_{H2O}}{R_{RG}(x_{RG})} \cdot \left(1 - x_{RG_1} \cdot \frac{R_{H2O}}{R_{RG}(x_{RG})} \right)}{3.5} \right] \cdot \frac{1}{R_{RG}(x_{RG})} \cdot \sum_{i=0}^4 (x_{RG_i} \cdot R_i \cdot \lambda_{Komp}(\vartheta_{Gas})_i)$$

$$x_{Luft} := \begin{pmatrix} 0.0696065 \\ 0.0570586 \\ 0.0124845 \\ 0.1290940 \\ 0.7317564 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{CO}_2 \\ \text{H}_2\text{O} \\ \text{Ar} \\ \text{O}_2 \\ \text{N}_2 \end{array}$$

$$x_{RG2} := \begin{pmatrix} 0.21288 \\ 0.11923 \\ 0.01 \\ 0.032 \\ 0.626 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{GG}(616.907 \cdot ^\circ C, x_{Luft}) = 0.062 \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

$$x_{Luft2} := \begin{pmatrix} 0.0696065 \\ 0.0570586 \\ 0.0124845 \\ 0.1290940 \\ 0.7317564 \end{pmatrix}$$

Berechnung der dynamischen Viskosität von Rauchgas

als Funkt. der Temperatur und der Zusammensetzung

Verwendung: $\eta_{RG}(\vartheta_{RG}, x_{RG})$

Temperatur ϑ_{RG} in °C; Zusammensetzung x_{RG} als Vektor mit den Komponenten: CO₂, H₂O, Ar, O₂ und N₂

Literatur: [1] FDBR-Handbuch, Vulkan Verlag, Essen 1980

W \equiv 0.001·kW kJ \equiv kW·sec $\frac{\text{bar}}{\text{mmHg}} := 10^5 \cdot \text{Pa}$ °C \equiv K h \equiv 3600·sec

ϑ_{RG} in
°C

Definition der Polynomkoeffizienten nach [1] Seite 4.2.7-2/1:

$$\text{PolyKoeffdynViskos} := \begin{pmatrix} \text{CO}_2 & \text{H}_2\text{O} & \text{Ar} & \text{O}_2 & \text{N}_2 \\ 0.136329 \cdot 10^{-4} & 0.859010 \cdot 10^{-5} & 0.211685 \cdot 10^{-4} & 0.194950 \cdot 10^{-4} & 0.166491 \cdot 10^{-4} \\ 0.494988 \cdot 10^{-7} & 0.358189 \cdot 10^{-7} & 0.602035 \cdot 10^{-7} & 0.494604 \cdot 10^{-7} & 0.438522 \cdot 10^{-7} \\ -0.273651 \cdot 10^{-10} & 0.157541 \cdot 10^{-10} & -0.304153 \cdot 10^{-10} & -0.175948 \cdot 10^{-10} & -0.217973 \cdot 10^{-10} \\ 0.134596 \cdot 10^{-13} & -0.192169 \cdot 10^{-13} & 0.130055 \cdot 10^{-13} & 0.6040725 \cdot 10^{-14} & 0.906502 \cdot 10^{-14} \\ -0.289031 \cdot 10^{-17} & 0.505944 \cdot 10^{-17} & -0.244202 \cdot 10^{-17} & -0.110837 \cdot 10^{-17} & -0.162384 \cdot 10^{-17} \end{pmatrix}$$

Molare Masse der Rauchgasbestandteile nach [1] Seite 4.2.2-2 in kg/kmol:

$M_{\text{CO}_2} := 44.010$ $M_{\text{H}_2\text{O}} := 18.015$ $M_{\text{Ar}} := 39.944$ $M_{\text{O}_2} := 32.0$ $M_{\text{N}_2} := 28.016$

$$\text{MolMasse}_{RG} := \begin{pmatrix} M_{\text{CO}_2} \\ M_{\text{H}_2\text{O}} \\ M_{\text{Ar}} \\ M_{\text{O}_2} \\ M_{\text{N}_2} \end{pmatrix}$$

$$\eta_{\text{Koeff}}(x_{\text{RG}}) := \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^4 \left(\frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}} \cdot \text{PolyKoeffdynViskos}_{0,i} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}} \cdot \text{PolyKoeffdynViskos}_{1,i} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}} \cdot \text{PolyKoeffdynViskos}_{2,i} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}} \cdot \text{PolyKoeffdynViskos}_{3,i} \right) \\ \sum_{i=0}^4 \left(\frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}} \cdot \text{PolyKoeffdynViskos}_{4,i} \right) \end{array} \right]$$

$$\eta_{\text{Koeff}_2}(x_{\text{RG}}) := \sum_{i=0}^4 \frac{x_{\text{RG}_i}}{\sqrt{\text{MolMasse}_{\text{RG}_i}}}$$

Dynamische Viskosität des Rauchgases:

$$\eta_{\text{RG}}(\vartheta_{\text{RG}}, x_{\text{RG}}) := \frac{\sum_{i=0}^4 \left[\eta_{\text{Koeff}}(x_{\text{RG}})_i \cdot \left(\frac{\vartheta_{\text{RG}}}{1 \cdot ^\circ\text{C}} \right)^i \right]}{\eta_{\text{Koeff}_2}(x_{\text{RG}})} \cdot \text{Pa} \cdot \text{sec}$$

Gl 4.3.6-2/1

$$x_{\text{Luft}} := \begin{pmatrix} 0.21288 \\ 0.11923 \\ 0.01 \\ 0.032 \\ 0.626 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{CO}_2 \\ \text{H}_2\text{O} \\ \text{Ar} \\ \text{O}_2 \\ \text{N}_2 \end{array}$$

$$x_{\text{RG2}} := \begin{pmatrix} 0.21288 \\ 0.11923 \\ 0.01 \\ 0.032 \\ 0.626 \end{pmatrix}$$

$$\eta_{\text{RG}}(616.907 \cdot ^\circ\text{C}, x_{\text{Luft}}) = 3.682 \times 10^{-5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$x_{\text{Luft2}} := \begin{pmatrix} 0.0696065 \\ 0.0570586 \\ 0.0124845 \\ 0.1290940 \\ 0.7317564 \end{pmatrix}$$

Berechnung der lokalen und der mittleren integralen spez. Wärmekapazität von Rauchgas als Funkt. der Temperatur und der Zusammensetzung

Verwendung: $cp_{RG}(T_{RG}, x_{RG})$

$cpm_{RG}(T_{RG}, x_{RG})$ (K.Ponweiser, 27.12.2005)

Temperatur T_{RG} in K; Zusammensetzung x_{RG} als Vektor mit den Komponenten: CO₂, H₂O, Ar, O₂ und N₂

Literatur: [1] Brandt, F.: "Wärmeübertragung in Dampferzeugern und Wärmetauschern"
FDBR-Fachbuchreihe Band 2, 2. Auflage, Vulkan Verlag, Essen 1995

W ≡ 0.001·kW kJ ≡ kW·sec $\bar{m} := 10^5 \cdot \text{Pa}$ °C ≡ K h ≡ 3600·sec

	CO ₂	H ₂ O	Ar	O ₂	N ₂
PolyKoefStoffwert :=	$0.2171539 \cdot 10^1$	$0.4159259 \cdot 10^1$	$0.2501658 \cdot 10^1$	$0.3721461 \cdot 10^1$	$0.3694063 \cdot 10^1$
	$0.1038499 \cdot 10^{-1}$	$-0.1725577 \cdot 10^{-2}$	0.0	$-0.2518398 \cdot 10^{-2}$	$-0.1334139 \cdot 10^{-2}$
	$-0.1074106 \cdot 10^{-4}$	$0.5702012 \cdot 10^{-5}$	0.0	$0.8589429 \cdot 10^{-5}$	$0.2652067 \cdot 10^{-5}$
	$0.6350127 \cdot 10^{-8}$	$-0.4596049 \cdot 10^{-8}$	0.0	$-0.8305377 \cdot 10^{-8}$	$-0.9775312 \cdot 10^{-9}$
	$-0.1629149 \cdot 10^{-11}$	$0.1424309 \cdot 10^{-11}$	0.0	$0.2710013 \cdot 10^{-11}$	$-0.9983837 \cdot 10^{-13}$
	$-0.4838467 \cdot 10^5$	$-0.3030886 \cdot 10^5$	$-0.7458694 \cdot 10^3$	$-0.1058373 \cdot 10^4$	$-0.1063539 \cdot 10^4$
	$0.1067246 \cdot 10^2$	$-0.6866177 \cdot 10^0$	$0.4369004 \cdot 10^1$	$0.3910662 \cdot 10^1$	$0.2289015 \cdot 10^1$
	$-0.9159472 \cdot 10^3$	$-0.1104501 \cdot 10^4$	$-0.6833280 \cdot 10^3$	$-0.9701834 \cdot 10^3$	$-0.9758881 \cdot 10^3$
	$0.4415854 \cdot 10^1$	$0.2672525 \cdot 10^1$	$0.2501658 \cdot 10^1$	$0.3600001 \cdot 10^1$	$0.2856469 \cdot 10^1$
	$0.3194408 \cdot 10^{-2}$	$0.3033723 \cdot 10^{-2}$	0.0	$0.7819742 \cdot 10^{-3}$	$0.1598692 \cdot 10^{-2}$
	$-0.1298684 \cdot 10^{-5}$	$-0.8540818 \cdot 10^{-6}$	0.0	$-0.2240152 \cdot 10^{-6}$	$-0.6260775 \cdot 10^{-6}$
	$0.2416346 \cdot 10^{-9}$	$0.1179867 \cdot 10^{-9}$	0.0	$0.4251833 \cdot 10^{-10}$	$0.1132336 \cdot 10^{-9}$
	$-0.167541 \cdot 10^{-13}$	$-0.6201465 \cdot 10^{-14}$	0.0	$-0.334824 \cdot 10^{-14}$	$-0.7694805 \cdot 10^{-14}$
	$-0.4897651 \cdot 10^5$	$-0.2990882 \cdot 10^5$	$-0.7458694 \cdot 10^3$	$-0.1193583 \cdot 10^4$	$-0.8907648 \cdot 10^3$
	$-0.7292411 \cdot 10^0$	$0.6888405 \cdot 10^1$	$0.4369004 \cdot 10^1$	$0.3751753 \cdot 10^1$	$0.6394526 \cdot 10^1$
	$-0.1507784 \cdot 10^4$	$-0.7044583 \cdot 10^3$	$-0.683328 \cdot 10^3$	$-0.1105397 \cdot 10^4$	$-0.8031145 \cdot 10^3$
	44.0098	18.0152	39.948	31.9988	28.0134
	213	775	116	88	79.8

$$\bar{R}_{H_2O} := 0.46152 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \bar{R}_{O_2} := 0.25984 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \bar{R}_{Ar} := 0.20813 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\bar{R}_{CO_2} := 0.18892 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \bar{R}_{N_2} := 0.29680 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{konst}} := \begin{pmatrix} R_{CO_2} \\ R_{H_2O} \\ R_{Ar} \\ R_{O_2} \\ R_{N_2} \end{pmatrix}$$

$$\text{KoefNeu}(x_{\text{RG}}) := \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{0,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{1,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{2,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{3,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{4,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{5,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{6,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{7,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{8,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{9,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{10,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{11,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{12,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{13,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{14,i}) \\ \sum_{i=0}^4 (x_{\text{RG}_i} \cdot R_{\text{konst}_i} \cdot \text{PolyKoefStoffwert}_{15,i}) \end{array} \right]$$

$$c_{PRG1}(T_{RG}, x_{RG}) := \sum_{i=0}^4 \left[\text{KoeffNeu}(x_{RG})_i \left(\frac{T_{RG}}{1 \cdot K} \right)^i \right]$$

Spez. Wärmekapazität für den Temperaturbereich > 1000 K bis 5000 K

$$c_{PRG2}(T_{RG}, x_{RG}) := \sum_{i=8}^{12} \left[\text{KoeffNeu}(x_{RG})_i \left(\frac{T_{RG}}{1 \cdot K} \right)^{i-8} \right]$$

Spez. Wärmekapazität des Rauchgases:

$$c_{PRG}(T_{RG}, x_{RG}) := \text{if}(T_{RG} \leq 1000 \cdot K, c_{PRG1}(T_{RG}, x_{RG}), c_{PRG2}(T_{RG}, x_{RG}))$$

Spez. Gaskonstante des Rauchgases:

$$R_{RG}(x_{RG}) := \sum_{i=0}^4 (R_{\text{konst}_i} \cdot x_{RG}_i)$$

Bildung der integralen spez. Wärmekapazität entsprechend der Definition

$$c_{pmRG}(TG, xG) := \begin{cases} c_{PRG}(TG, xG) & \text{if } TG = 273.15 \cdot ^\circ\text{C} \\ \left(\frac{1}{TG - 273.15 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \int_{273.15 \cdot ^\circ\text{C}}^{TG} c_{PRG}(TG, xG) dTG \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T_{RG1} := 890.057K \quad x_{RG1} := \begin{pmatrix} 0.0696065 \\ 0.0570586 \\ 0.0124845 \\ 0.1290940 \\ 0.7317564 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{CO2} \\ \text{H2O} \\ \text{Ar} \\ \text{O2} \\ \text{N2} \end{matrix} \quad x_{RG2} := \begin{pmatrix} 0.21288 \\ 0.11923 \\ 0.01 \\ 0.032 \\ 0.626 \end{pmatrix}$$

$$c_{PRG}(T_{RG1}, x_{RG1}) = 1.192 \times 10^3 \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \quad R_{RG}(x_{RG1}) = 0.293 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad x_{Luft2} := \begin{pmatrix} 0.0696065 \\ 0.0570586 \\ 0.0124845 \\ 0.1290940 \\ 0.7317564 \end{pmatrix}$$

$$c_{pmRG}(T_{RG1}, x_{RG1}) = 1.112 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Ausarbeitung Wärmetechnik PR

geg.: Naturumlauf-Dampferzeuger mit zirkulierender Wirbelschicht

Dampfmassenstrom	$\dot{m}_{\text{DotFD}} := 160 \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$
Frischdampfdruck	$p_{\text{FD}} := 80\text{bar}$
Frischdampf Temperatur	$T_{\text{FD}} := 510^\circ\text{C}$
Speisewassereintrittstemperatur	$T_{\text{SP}} := 125^\circ\text{C}$ (extern vorgewärmt)
Verbrennungslufttemperatur	$T_{\text{LV}} := 140^\circ\text{C}$ (extern vorgewärmt)
Abgastemperatur	$T_{\text{Abg}} := 155^\circ\text{C}$
Umgebungstemperatur	$T_{\text{U}} := 25^\circ\text{C}$
Relative Luftfeuchtigkeit	$\varphi := 60\%$
Meereshöhe	$h := 0\text{m}$
Brennstoff	Spruce (waf)
Wassergehalt Brennstoff (nominal)	$\gamma_{\text{W}} := 0.3$

$\text{kJ} \equiv 10^3 \cdot \text{J}$	$\text{bar} \equiv 10^5 \text{Pa}$
$\text{MJ} \equiv 10^3 \cdot \text{kJ}$	$\text{mbar} \equiv 10^{-3} \cdot \text{bar}$
$\text{MW} \equiv 10^3 \cdot \text{kW}$	$\text{kmol} \equiv 10^3 \cdot \text{mol}$
$^\circ\text{C} \equiv \text{K}$	
$h_{\text{pack}} := 1.5\text{m}$	

ges.: Auslegung Dampferzeuger

Brennstoffzusammensetzung laut Excel-Datenblatt ITE:

$\gamma_{\text{CWet}} := 0.403$	$\gamma_{\text{HWet}} := 0.0468$	$\gamma_{\text{NWet}} := 0.0038$	(Massenanteile bei $Y_{\text{W}}=0.204$)
$\gamma_{\text{OWet}} := 0.3362$	$\gamma_{\text{SWet}} := 0$	$\gamma_{\text{AWet}} := 0.0062$	

Annahmen:	Luftüberschuss	$n := 1.2$
	Referenztemperatur	$T_{\text{R}} := 25^\circ\text{C}$
	Brennstofftemperatur	$T_{\text{B}} := 25^\circ\text{C}$
	Temperatur in Wirbelschicht	$T_{\text{WS}} := 870^\circ\text{C}$

Umrechnung Brennstoffzusammensetzung auf 30% Wassergehalt:

$$\gamma_{\text{wf}} := \gamma_{\text{CWet}} + \gamma_{\text{HWet}} + \gamma_{\text{NWet}} + \gamma_{\text{OWet}} + \gamma_{\text{SWet}} + \gamma_{\text{AWet}} = 0.796 \quad \text{waterfree}$$

$$\gamma_{\text{C}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{CWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 0.354 \quad \gamma_{\text{N}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{NWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 3.342 \times 10^{-3}$$

$$\gamma_{\text{H}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{HWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 0.041 \quad \gamma_{\text{O}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{OWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 0.296$$

$$\gamma_{\text{S}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{SWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 0 \quad \gamma_{\text{A}} := (1 - \gamma_{\text{W}}) \cdot \frac{\gamma_{\text{AWet}}}{\gamma_{\text{wf}}} = 5.452 \times 10^{-3}$$

Heizwert nach VerbandsFormel:

$$H_{\text{u}} := 33.913 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \gamma_{\text{C}} + 142.351 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \left(\gamma_{\text{H}} - \frac{\gamma_{\text{O}}}{8} \right) + 10.467 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \gamma_{\text{S}} - 2.512 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot (\gamma_{\text{W}} - 9 \cdot \gamma_{\text{H}})$$

$$\gamma_{\text{C}} + \gamma_{\text{N}} + \gamma_{\text{H}} + \gamma_{\text{O}} + \gamma_{\text{S}} + \gamma_{\text{A}} + \gamma_{\text{W}} = 1$$

$$H_u = 12.793 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Verbrennungsrechnung:

Molare Massen:

$$M_C := 12.011 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad M_S := 32.06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$M_H := 1.008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad M_O := 15.999 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Massenanteile trockene Luft laut DIN 1871:

$$\xi_{N_2LT} := 0.755425 \quad \xi_{CO_2LT} := 0.000505$$

$$\xi_{ArLT} := 0.012653 \quad \xi_{O_2LT} := 0.231417$$

Berechnung Wasserbeladung Luft:

$$p_{at} := 1.013 \cdot \left(1 - \frac{6.5 \cdot h}{288000}\right)^{5.225} \cdot \text{bar} = 1.013 \cdot \text{bar} \quad \text{atmosphärischer Druck}$$

$$p_s := e^{\frac{19.016 - \frac{4064.95}{T_U}}{\frac{1}{^\circ\text{C}} + 236.25}} \cdot \text{mbar} = 31.702 \cdot \text{mbar} \quad \text{Sättigungsdampfdruck bei } T=T_U$$

$$X_{H_2O_{LT}} := 0.6216 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p_{at} - p_s} = 0.012$$

$$\mu_{O_2} := \left(\frac{\gamma_C}{M_C} + \frac{\gamma_H}{4M_H} + \frac{\gamma_S}{M_S} - \frac{\gamma_O}{2M_O} \right) \cdot 2M_O = 0.975 \quad \text{spez. Sauerstoffbedarf} \quad 2$$

$$\mu_{LoT} := \frac{\mu_{O_2}}{\xi_{O_2LT}} = 4.214 \quad \text{spez. Luftbedarf, ohne Luftüberschuss, trocken}$$

$$\mu_{Lo} := \mu_{LoT} \cdot (1 + X_{H_2O_{LT}}) = 4.264 \quad \text{spez. Luftbedarf, ohne Luftüberschuss}$$

$$\mu_A := n \cdot \mu_{Lo} = 5.117 \quad \text{spez. Luftmassenstrom}$$

$$\mu_G := \mu_A + 1 - \gamma_A = 6.112 \quad \text{spez. Rauchgasmassenstrom}$$

Abgaszusammensetzung: (Massenanteile)

$$\xi_{CO_2} := \frac{\frac{M_C + 2M_O}{M_C} \cdot \gamma_C + \xi_{CO_2LT} \mu_{LoT} \cdot n}{\mu_G} = 0.21288$$

$$\xi_{H_2O} := \frac{\frac{2 \cdot M_H + M_O}{2 \cdot M_H} \cdot \gamma_H + \gamma_W + X_{H_2O_{LT}} \mu_{LoT} \cdot n}{\mu_G} = 0.11923$$

$$\xi_{O_2} := \frac{\xi_{O_2LT} \cdot \mu_{LoT}^{(n-1)}}{\mu_G} = 0.032$$

$$\xi_{SO_2} := \frac{M_S + 2 \cdot M_O}{M_S} \cdot \gamma_S = 0$$

$$\xi_{Ar} := \frac{\xi_{ArLT} \cdot \mu_{LoT}^n}{\mu_G} = 0.01$$

$$\xi_{N_2} := \frac{\gamma_N + \xi_{N_2LT} \cdot \mu_{LoT}^n}{\mu_G} = 0.626$$

3

Intgr. spez. Wärmekapazitäten laut Stoffwertpolynom-Datenbank ITE:

$$c_{pmALV} := 1.00888 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Luft bei } T = T_{LV}$$

$$c_{pmAU} := 1.00449 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Luft bei } T = T_U$$

$$c_{pmG} := 1.10205 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Abgas bei } T = T_{Abg}$$

$$c_{pmGR} := 1.084491 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Abgas bei } T = T_R$$

Wirkungsgradberechnung nach DIN EN 12952:

$$l_u := 0.01 \quad \text{Verlust durch unverbranntes, abgeschätzt}$$

$$H_{uZtot} := \frac{H_u}{1 - l_u} + \mu_A \cdot (c_{pmALV} \cdot T_{LV} - c_{pmAU} \cdot T_R) = 13.517 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad \text{totaler Heizwert}$$

$$l_G := \frac{\mu_G \cdot (c_{pmG} \cdot T_{Abg} - c_{pmGR} \cdot T_R)}{H_{uZtot}} = 6.498\% \quad \text{Abgasverlust}$$

$$H_C := 33.913 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad \text{Heizwert Kohlenstoff}$$

Asche-Parameter:

$$c_{pAsh} := 0.8 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{spez. Wärmekapazität abgeschätzt}$$

$$k_{FA} := 0.8 \quad \text{Anteil Flugasche an Gesamtasche}$$

$$k_S := 1 - k_{FA} = 0.2 \quad \text{Anteil Schlacke an Gesamtasche}$$

$$r_S := 0 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Schmelzwärme Schlacke}$$

Wärmeverlust durch Schlacke und Flugasche:

$$l_{WSF} := \frac{\left(\gamma_A + l_u \cdot \frac{H_u}{H_C} \right) \cdot \left[k_S \cdot [c_{pAsh} \cdot (T_{WS} - T_R) + r_S] + k_{FA} \cdot c_{pAsh} \cdot (T_{Abg} - T_R) \right]}{(1 - l_u) \cdot H_{uZtot}} = 0.015\%$$

Frischdampf- und Speisewasserenthalpien laut Bertsch:

$$h_{FD} := 3424.068800 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{SP} := 531.524 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{DotN} := m_{DotFD} \cdot (h_{FD} - h_{SP}) = 128.558 \cdot \text{MW} \quad \text{Nutzenthalpiestrom Dampf}$$

4

$$l_{RC} := \begin{cases} \varepsilon \leftarrow 0.001 & = 0.011\% \\ \text{diff} \leftarrow 0.01 & \\ l_{RC} \leftarrow 0.01 & \text{Iterative} \\ \text{while diff} > \varepsilon & \text{Bestimmung von } l_{RC} \\ & \text{(Strahlungsverlust)} \\ \eta_D \leftarrow 1 - l_G - l_{RC} - l_u - l_{WSF} & \\ m_{DotF} \leftarrow \frac{Q_{DotN}}{\eta_D \cdot H_{uZtot}} & \\ l_{RCnew} \leftarrow \frac{0.0315 \cdot Q_{DotN}^{0.7} \cdot m^{0.6} \cdot \text{kg}^{0.3}}{m_{DotF} \cdot H_{uZtot} \cdot s^{0.9}} & \\ \text{diff} \leftarrow |l_{RCnew} - l_{RC}| & \\ l_{RC} \leftarrow l_{RCnew} & \end{cases}$$

$$\eta_D := 1 - l_G - l_{RC} - l_u - l_{WSF} = 0.925 \quad \text{Dampferzeugerwirkungsgrad}$$

$$m_{DotF} := \frac{Q_{DotN}}{\eta_D \cdot H_{uZtot}} = 10.285 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Netto-Brennstoffmassenstrom}$$

$$m_{DotA} := \mu_A \cdot m_{DotF} = 52.629 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Luftmassenstrom}$$

$$m_{DotRG} := \mu_G \cdot m_{DotF} = 62.858 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Rauchgasmassenstrom}$$

Strahlungsverlust und Aufteilung nach Heizflächen (iteriert)

$$Q_{DotRC} := m_{DotF} \cdot H_{uZtot} \cdot l_{RC} = 14.951 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCevap} := 0.4 \quad Q_{DotRCevap} := k_{RCevap} \cdot Q_{DotRC} = 5.981 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCcycl} := 0.3 \quad Q_{DotRCcycl} := k_{RCcycl} \cdot Q_{DotRC} = 4.485 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCsbhe} := 0.044 \quad Q_{DotRCsbhe} := k_{RCsbhe} \cdot Q_{DotRC} = 0.658 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCsh1} := 0.089 \quad Q_{DotRCsh1} := k_{RCsh1} \cdot Q_{DotRC} = 1.331 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCsh2} := 0.118 \quad Q_{DotRCsh2} := k_{RCsh2} \cdot Q_{DotRC} = 1.764 \cdot \text{kW}$$

$$k_{RCeco} := 1 - k_{RCevap} - k_{RCcycl} - k_{RCsbhe} - k_{RCsh1} - k_{RCsh2} = 0.049$$

$$\dot{Q}_{\text{DotRCeco}} := k_{\text{RCeco}} \cdot \dot{Q}_{\text{DotRC}} = 0.733 \cdot \text{kW}$$

Abmessungen des oberen Brennkammerabschnitts:

$$t_{\text{BK}} := 4.95 \text{ m}$$

Querschnitt richtet sich nach Forderung:
Leerrohrgeschwindigkeit ungefähr gleich 5m/s (siehe später)

$$b_{\text{BK}} := 8.325 \text{ m}$$

Aufgrund des Querschnitts $>25 \text{ m}^2$ wird ein nicht-quadratischer Querschnitt festgelegt mit t_{BK} ungefähr gleich 5m

$$A_{\text{BK}} := t_{\text{BK}} \cdot b_{\text{BK}} = 41.209 \text{ m}^2$$

t_{BK} und b_{BK} folgen aus Teilung der Flossenrohre (siehe später)

Gaskonstante und Dichte Rauchgas in Wirbelschicht: (Näherungsformel)

$$R_{\text{G}} := \left(0.2869 - 0.0746 \cdot \xi_{\text{CO}_2} + 0.1746 \cdot \xi_{\text{H}_2\text{O}} \right) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 291.836 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Normzustand: $T_{\text{N}} := 273.15 \cdot \text{K}$ $p_{\text{N}} := 1013.25 \cdot \text{mbar}$

$$\rho_{\text{GWS}} := \frac{p_{\text{N}}}{R_{\text{G}} \cdot T_{\text{N}}} \cdot \frac{273.15 \text{ K}}{T_{\text{WS}} + 273.15 \text{ K}} = 0.304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

5

Überprüfung Lehrrohrgeschwindigkeit:

$$v_{\text{Leer}} := \frac{\dot{m}_{\text{DotRG}}}{\rho_{\text{GWS}} \cdot A_{\text{BK}}} = 5.022 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{OK}$$

Luftstufung bei Vollast: (nach Erfahrungswerten bzgl. Brennstoff)

$x_{\text{Prim}} := 0.5$ Aufteilungsfaktor Primärluft

$\dot{m}_{\text{DotPrimL}} := x_{\text{Prim}} \cdot \dot{m}_{\text{DotA}} = 26.315 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ Primärluftmassenstrom

$\dot{m}_{\text{DotSekL}} := \dot{m}_{\text{DotA}} - \dot{m}_{\text{DotPrimL}} = 26.315 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ Sekundärluftmassenstrom

Düsenbodenquerschnitt: (bei $x_{\text{prim}}=0.5$)

$$b_{\text{DB}} := \frac{b_{\text{BK}}}{\sqrt{2}} = 5.887 \text{ m}$$

$$t_{\text{DB}} := \frac{t_{\text{BK}}}{\sqrt{2}} = 3.5 \text{ m}$$

Gaskonstante und Dichte Luft in Wirbelschicht: (Näherungsformel)

$$R_{\text{L}} := \left(0.2869 + 0.1746 \cdot \frac{X_{\text{H}_2\text{OLT}}}{1 + X_{\text{H}_2\text{OLT}}} \right) \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 288.979 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{\text{LWS}} := \frac{p_{\text{N}}}{R_{\text{L}} \cdot T_{\text{N}}} \cdot \frac{273.15 \text{ K}}{T_{\text{WS}} + 273.15 \text{ K}} = 0.307 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Adiabate Verbrennungstemperatur:

Die adiabate Verbrennungstemperatur wird unkonventionell inklusive dem Feststoffmassenstrom kalkuliert. Dies ist aufgrund der Zugabe des Brennstoffes zum Feststoff im Rückführzweig (nach Siphon) praktisch anschaulich und physikalisch sinnvoll, da dadurch geringere Temperaturen am Austritt des Kontrollvolumens auftreten.

Die adiabate Verbrennungstemperatur wird durch die Forderung, dass in der Brennkammer die Verdampfungsenthalpie übertragen werden soll, eingestellt.

$$m_{\text{DotFSspez}} := 20.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

spez. zirkulierender Feststoffmassenstrom, nach Erfahrungswerten aus Diagramm

$$m_{\text{DotFS}} := m_{\text{DotFSspez}} \cdot A_{\text{BK}} = 844.779 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

zirkulierender Feststoffmasenstrom

$$c_{\text{pFS}} := 0.835 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

spez. Wärmekapazität Feststoff, als reinen Quarzsand modelliert

Dampfdrücke

$$P_{\text{SH2_out}} := P_{\text{FD}} = 80 \cdot \text{bar}$$

$$P_{\text{SH2_in}} := 82.62 \text{bar}$$

$$P_{\text{SH1_out}} := P_{\text{SH2_in}} + 0.5 \text{bar} = 83.12 \cdot \text{bar}$$

$$P_{\text{SH1_in}} := 85.277 \text{bar}$$

$$P_{\text{SBHE_out}} := P_{\text{SH1_in}} = 85.277 \cdot \text{bar}$$

$$P_{\text{SBHE_in}} := 86.586 \text{bar}$$

$$P_{\text{TR_out}} := P_{\text{SBHE_in}} = 86.586 \cdot \text{bar}$$

$$P_{\text{TR_in}} := 87.795 \text{bar}$$

$$P_{\text{DT}} := P_{\text{TR_in}} = 87.795 \cdot \text{bar}$$

$$P_{\text{ECO_out}} := 90.55 \text{bar}$$

$$P_{\text{SPW}} := 95.576 \text{bar}$$

$$\Delta T_{\text{sub}} := 40^\circ \text{C}$$

Subcooling ECO/Verdampfer

$$T_{\text{s}} := 301.571900^\circ \text{C}$$

Siedetemperatur in Dampftrommel laut Bertsch

Wärmestrom in ECO

$$T_{\text{ECO_out}} := T_{\text{s}} - \Delta T_{\text{sub}} = 261.572 \cdot ^\circ \text{C}$$

Wassertemperatur ECO Austritt

$$h_{\text{ECO_out}} := 1141.957223 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Spez. Enthalpie Dampf ECO Austritt nach Bertsch

$$h_{\text{W}} := 1353.606059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Spez. Enthalpie gesättigtes Wasser nach Bertsch

$$h_{\text{D}} := 2746.503916 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Spez. Enthalpie gesättigter Dampf nach Bertsch

$$h_{\text{evap}} := h_{\text{D}} - h_{\text{W}} = 1392.898 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Verdampfungsenthalpie nach Bertsch

Berechnung Einspritzkühler Massenstrom

$$\Delta T_{\text{ESK}} := 40^\circ\text{C}$$

Temperaturdifferenz Einspritzkühler (Auslegung: 40°C)

$$T_{\text{SH2_in}} := T_{\text{FD}} - \frac{T_{\text{FD}} - T_{\text{s}} + \Delta T_{\text{ESK}}}{2} = 385.786^\circ\text{C}$$

Eintrittstemperatur Überhitzer 2, gewählt
Kriterium: ungefähr gleiche
Temperaturspanne vor und nach ESK

$$P_{\text{SH2_in}} = 82.62 \cdot \text{bar}$$

Druck Eintritt ÜH2, iteriert mit Rohrlänge des ÜH2

$$h_{\text{SH2_in}} := 3092.895848 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Enthalpie Eintritt Überhitzer 2

$$T_{\text{SH1_out}} := T_{\text{SH2_in}} + \Delta T_{\text{ESK}} = 425.786^\circ\text{C}$$

Austrittstemperatur SH1,
Auslegungstemp.

$$P_{\text{SH1_out}} = 83.12 \cdot \text{bar}$$

Druck Austritt ÜH1. Annahme: 0.5 bar
Druckverlust in ESK

$$h_{\text{SH1_out}} := 3204.339721 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Enthalpie Austritt SH1

$$h_{\text{ESK}} := h_{\text{W}} = 1353.606 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Enthalpie Einspritzwasser

Massenstrom Einspritzkühler:

$$(m_{\text{DotFD}} - m_{\text{DotESK}}) \cdot h_{\text{SH1_out}} + m_{\text{DotESK}} \cdot h_{\text{ESK}} = m_{\text{DotFD}} \cdot h_{\text{SH2_in}}$$

$$m_{\text{DotESK}} := \frac{h_{\text{SH2_in}} \cdot m_{\text{DotFD}} - h_{\text{SH1_out}} \cdot m_{\text{DotFD}}}{h_{\text{ESK}} - h_{\text{SH1_out}}} = 2.676 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

von Verdampfer aufgenommener Wärmestrom:

$$Q_{\text{DotWall}} := 2.955 \text{ MW}$$

An Wänden von Überhitzern/ECO aufgenommener Wärmestrom

$$Q_{\text{DotEvap}} := m_{\text{DotFD}} \cdot (h_{\text{W}} - h_{\text{ECO_out}}) + (m_{\text{DotFD}} - m_{\text{DotESK}}) \cdot h_{\text{evap}} - Q_{\text{DotWall}} = 64.63 \cdot \text{MW}$$

Q_{DotEvap} muss durch die Wärmeabgabe von Rauchgas, Feststoff und Flugasche aufgebracht werden:

$$m_{\text{DotFA}} := k_{\text{FA}} \frac{m_{\text{DotF}}}{1 - l_{\text{u}}} \cdot \left(\gamma_{\text{A}} + l_{\text{u}} \cdot \frac{H_{\text{u}}}{H_{\text{C}}} \right) = 0.077 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Massenstrom Flugasche

$$m_{\text{DotFD}} \cdot (h_{\text{W}} - h_{\text{ECO_out}}) = 9.407 \cdot \text{MW}$$

$$Q_{\text{DotEvap}} = m_{\text{DotRG}} \cdot (c_{\text{pmGad}} \cdot T_{\text{ad}} - c_{\text{pmGWS}} \cdot T_{\text{WS}}) + (m_{\text{DotFS}} \cdot c_{\text{pFS}} + m_{\text{DotFA}} \cdot c_{\text{pAsh}}) \cdot (T_{\text{ad}} - T_{\text{WS}}) - Q_{\text{DotRCevap}}$$

$$(m_{\text{DotFD}} - m_{\text{DotESK}}) \cdot h_{\text{evap}} = 58.179 \cdot \text{MW}$$

darin bedeuten:

$$m_{\text{DotFD}} \cdot h_{\text{evap}} = 61.907 \cdot \text{MW}$$

$$c_{\text{pmGad}} := 1.226682 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

spez. integr. Wärmekapazität Rauchgas bei $T = T_{\text{ad}}$

$$c_{pmGWS} := c_{pmRG}(T_{WS} + 273.15K, x_{RG2}) = 1.215 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad \text{spez. integr. Wärmekapazität Rauchgas bei } T=T_{WS}$$

aus obiger Gleichung folgt:

$$T_{ad} := \frac{Q_{DotEvap} + Q_{DotRCevap} + T_{WS} \cdot c_{pFS} \cdot m_{DotFS} + T_{WS} \cdot c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} + T_{WS} \cdot c_{pmGWS} \cdot m_{DotRG}}{c_{pFS} \cdot m_{DotFS} + c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} + c_{pmGad} \cdot m_{DotRG}} = 951.771 \cdot ^\circ C$$

$$c_{pmGad_check} := c_{pmRG}(T_{ad} + 273.15K, x_{RG2}) = 1.226682 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Berechnung Rückführtemperatur des Feststoffes:

$$H_{DotA} := m_{DotA} \cdot (c_{pmALV} \cdot T_{LV} - c_{pmAU} \cdot T_R) = 6.112 \cdot MW \quad \text{Enthalpiestrom Luft Eintritt}$$

aus dem Kontrollvolumen in der Brennkammer folgt andererseits: (adiabate Verbrennungstemperatur inkl. Feststoffmassenstrom)

$$T_{ad} = \frac{(1 - l_u) \cdot m_{DotF} \cdot H_{uZtot} + H_{DotFS} - H_{DotS} + T_R \cdot (m_{DotRG} \cdot c_{pmGR} + m_{DotFS} \cdot c_{pFS} + m_{DotFA} \cdot c_{pAsh})}{m_{DotRG} \cdot c_{pmGad} + m_{DotFS} \cdot c_{pFS} + m_{DotFA} \cdot c_{pAsh}}$$

darin bedeuten:

$$m_{DotS} := \frac{k_S}{k_{FA}} \cdot m_{DotFA} = 0.019 \frac{kg}{s} \quad \text{Schlackemassenstrom}$$

$$H_{DotS} := m_{DotS} \cdot c_{pAsh} \cdot (T_{WS} - T_R) = 12.956 \cdot kW \quad \text{Enthalpiestrom Schlacke}$$

$$H_{DotFS} \quad \text{Enthalpiestrom Feststoff Eintritt}$$

daraus lässt sich der Feststoffenthalpiestrom bei Eintritt in den Feuerraum berechnen:

$$H_{DotFS} := H_{DotS} - H_{uZtot} \cdot m_{DotF} + H_{uZtot} \cdot l_u \cdot m_{DotF} - T_R \cdot c_{pFS} \cdot m_{DotFS} - T_R \cdot c_{pmGR} \cdot m_{DotRG} - T_R \cdot c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} + T_{ad} \cdot c_{pFS} \cdot m_{DotFS} + T_{ad} \cdot c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} + T_{ad} \cdot c_{pmGad} \cdot m_{DotRG}$$

$$H_{DotFS} = 587.863 \cdot MW$$

die Rückführtemperatur des Feststoffes (bei Eintritt in den Feuerraum) ist dann:

$$T_{FSret} := \frac{H_{DotFS} + T_R \cdot c_{pFS} \cdot m_{DotFS}}{c_{pFS} \cdot m_{DotFS}} = 858.386 \cdot ^\circ C \quad \text{Rückführtemperatur Feststoff}$$

Berechnung Dampftemperatur bei Fließbettkühler Austritt:

Bilanz um den Fließbettkühler ergibt:

$$Q_{DotSBHE} := c_{pFS} \cdot m_{DotFS} \cdot (T_{WS} - T_{FSret}) - Q_{DotRCsbhe} - Q_{DotRCcycl} = 8.188 \cdot MW \quad \text{im Fließbettkühler übertragener Wärmestrom}$$

mit den Stoffwerten aus der Wasserdampf tafel nach Bertsch erhält man:

(Annahme: 10°C Temperaturdifferenz in Tragrohren, 1 bar Druckverlust)

$$c_{pmGad1} := 1.32052 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$P_{SBHE_in} = 86.586 \cdot \text{bar}$$

$$h_{SBHE_in} := 2792.793 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dampfenthalpie bei Fließbettkühler Eintritt

$$T_{SBHE_in} := 308.3163^\circ\text{C}$$

$$h_{SBHE_out} := \frac{Q_{DotSBHE}}{m_{DotFD} - m_{DotESK}} + h_{SBHE_in} = 2988.816 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dampfenthalpie bei Fließbettkühler Austritt

$$Q_{DotSH1} := (m_{DotFD} - m_{DotESK}) \cdot (h_{SH1_out} - h_{SBHE_out}) = 9.002 \cdot \text{MW}$$

Wärmeübertragung SH1

$$P_{SBHE_out} = 85.277 \cdot \text{bar}$$

Druck Austritt SBHE

$$T_{SBHE_out} := 354.8733^\circ\text{C}$$

Dampftemperatur bei Fließbettkühler Austritt nach Bertsch

$$T_{ad1} := \frac{m_{DotF} \cdot H_{uZtot} + H_{DotA}}{(m_{DotF} + m_{DotA}) \cdot c_{pmGad1}} + \frac{c_{pmGR}}{c_{pmGad1}} \cdot T_R = 1767.398 \cdot ^\circ\text{C}$$

Berechnung Wärmeströme in Brennkammer:

$$Q_{DotFR} := m_{DotRG} \cdot (c_{pmGad} \cdot T_{ad} - c_{pmGWS} \cdot T_{WS}) + m_{DotFS} \cdot c_{pFS} \cdot (T_{ad} - T_{WS})$$

$$Q_{DotFR} = 64.631 \cdot \text{MW}$$

von Rauchgas und Feststoff übertragener Wärmestrom

$$Q_{DotFR1} := m_{DotRG} \cdot (c_{pmGad1} \cdot T_{ad1} - c_{pmGWS} \cdot T_{WS}) - m_{DotFS} \cdot c_{pFS} \cdot (T_{WS} - T_{FSret}) = 72.074 \cdot \text{MW}$$

$$\frac{Q_{DotFR} - Q_{DotFR1}}{Q_{DotFR}} = -11.515\%$$

Wärmeströme restliche Heizflächen:

$$Q_{DotSH2} := m_{DotFD} \cdot (h_{FD} - h_{SH2_in}) = 14.719 \cdot \text{MW}$$

Übertragener Wärmestrom in Überhitzer 2

$$h_{TR_in} := h_D = 2746.504 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Enthalpie Dampf Tragrohr Eintritt

$$Q_{DotECO} := m_{DotFD} \cdot (h_{ECO_out} - h_{SP}) = 27.13 \cdot \text{MW}$$

Übertragener
Wärmestrom im
ECO

$$Q_{DotTR} := (m_{DotFD} - m_{DotESK}) \cdot (h_{SBHE_in} - h_{TR_in}) = 1.933 \cdot \text{MW}$$

Wärmestrom in Tragrohre

Aufteilung Wärmestrom in Tragrohre

$$Q_{DotN} = 128.558 \cdot \text{MW}$$

$$Q_{DotECO} + Q_{DotEvap} + Q_{DotWall} + Q_{DotTR} + Q_{DotSBHE} + Q_{DotSH1} + Q_{DotSH2} = 128.558 \cdot \text{MW}$$

Nachrechnung Aufteilung Strahlungsverlust

$$Q_{DotWT} := Q_{DotEvap} + Q_{DotSBHE} + Q_{DotSH1} + Q_{DotSH2} + Q_{DotECO} = 123.669 \cdot \text{MW}$$

Übertragener Wärmestrom in Wärmetauschern

$$k_{RCevap_end} := \frac{Q_{DotEvap}}{Q_{DotWT}} = 0.523$$

$$k_{RCsh1_end} := \frac{Q_{DotSH1}}{Q_{DotWT}} = 0.073$$

$$k_{RCsbhe_end} := \frac{Q_{DotSBHE}}{Q_{DotWT}} = 0.066$$

$$k_{RCsh2_end} := \frac{Q_{DotSH2}}{Q_{DotWT}} = 0.119$$

Berechnung Brennkammerhöhe:

$$d_{aFR} := 57 \text{ mm}$$

Außendurchmesser Flossenrohr

$$\lambda_w := 0.541302 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit Wasser (gesättigt)

$$s_{FR} := 5 \text{ mm}$$

Wandstärke Flossenrohr

$$\lambda_{st} := 0.071550 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit Dampf (gesättigt)

$$d_{iFR} := d_{aFR} - 2 \cdot s_{FR} = 47 \cdot \text{mm}$$

Innendurchmesser Flossenrohr

$$\eta_w := 84.648081 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Dynamische Viskosität Wasser (gesättigt)

$$t_{FR} := 75 \text{ mm}$$

Teilung Flossenrohre

$$\eta_{st} := 19.829767 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Dynamische Viskosität Dampf (gesättigt)

$$\alpha_{iFR} := 100 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Wärmeübertragungskoeffizient Flossenrohr
innen nach Diagramm abgeschätzt

$$c_{pW} := 5.854156 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Spez. Wärmekapazität Wasser (gesättigt)

$$\alpha_{aFR} := 178.36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Wärmeübertragungskoeffizient Flossenrohr
außen nach Diagramm

$$h_{BK1} := 26.735 \text{ m}$$

Brennkammerhöhe (iteriert)

$$\lambda_{FR} := 43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit Rohr, abgeschätzt

$$k_{FR} := \frac{1}{\frac{d_{aFR}}{d_{iFR} \cdot \alpha_{iFR}} + \frac{d_{aFR}}{2 \cdot \lambda_{FR}} \cdot \ln\left(\frac{d_{aFR}}{d_{iFR}}\right) + \frac{1}{\alpha_{aFR}}} = 174.015 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Wärmedurchgangskoeffizient Flossenrohr

für den Feuerraum gilt dann:

$$n_{FR} := \frac{2 \cdot (b_{BK} + t_{BK})}{t_{FR}} = 354$$

Anzahl Flossenrohre

$$Q_{DotEvap} = n_{FR} \cdot k_{FR} \cdot \frac{d_{aFR} \cdot \pi}{2} \cdot h_{BK} \cdot (T_{WS} - T_s)$$

$$h_{BK} := \frac{2 \cdot Q_{DotEvap}}{\pi \cdot T_s \cdot d_{aFR} \cdot k_{FR} \cdot n_{FR} - \pi \cdot T_{WS} \cdot d_{aFR} \cdot k_{FR} \cdot n_{FR}} = 20.615 \text{ m}$$

Höhe Brennkammer

$$T_{aFR} := T_{WS} - \frac{Q_{DotEvap}}{n_{FR} \cdot \alpha_{aFR} \cdot \frac{d_{aFR} \cdot \pi}{2} \cdot h_{BK}} = 315.418 \cdot ^\circ\text{C}$$

Außentemperatur Flossenrohr

$$c_{pST} := 6.474426 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Spez. Wärmekapazität Dampf (gesättigt)

$$\Phi_{FR} := \frac{m_{DotFD}}{\left[\frac{2 \cdot (b_{BK} + t_{BK})}{t_{FR}} \right] \cdot \frac{d_{iFR}^2 \cdot \pi}{4}} = 72.365 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

Massenstromdichte Flossenrohre

Wärmeübertragungskoeffizienten für Wasser bzw. Dampf allein:

$$\alpha_{iW} := 0.0224 \cdot \lambda_w^{0.58} \cdot \eta_w^{-0.38} \cdot c_{pW}^{0.42} \cdot \Phi_{FR}^{0.8} \cdot d_{iFR}^{-0.2} = 1.199 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\alpha_{iST} := 0.0224 \cdot \lambda_{st}^{0.58} \cdot \eta_{st}^{-0.38} \cdot c_{pST}^{0.42} \cdot \Phi_{FR}^{0.8} \cdot d_{iFR}^{-0.2} = 671.195 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$f_1 := 1 + \left(\frac{d_{iFR}}{h_{BK1}} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.015$$

Korrekturfaktor Wärmeübertragungskoeffizient für kurze Rohre

Dimensionierung Überhitzer 2:

$$Q_{DotTRsh2} := 1.085 \text{ MW}$$

$$Q_{DotWall_SH2} := 1.819 \text{ MW}$$

$$c_{pmG_SH2_out} := 1.182004 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

spez. Wärmekap. Rauchgas Austritt ÜH2

$$u := 5$$

Umlaufzahl (abgeschätzt)

$$m_{DotRG} \cdot (c_{pmGWS} \cdot T_{WS} - c_{pmG_SH2_out} \cdot T_{G_SH2_out}) + m_{DotFA} \cdot c_{pAsh} \cdot (T_{WS} - T_{G_SH2_out}) = Q_{DotSH2} + Q_{DotRCsh2} + Q_{DotTRsh2} + Q_{DotWall_SH2}$$

$$T_{G_SH2_out} := \frac{Q_{DotSH2} + Q_{DotRCsh2} + Q_{DotTRsh2} + Q_{DotWall_SH2} - T_{WS} \cdot c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} - T_{WS} \cdot c_{pmGWS} \cdot m_{DotRG}}{c_{pAsh} \cdot m_{DotFA} + c_{pmG_SH2_out} \cdot m_{DotRG}}$$

$$T_{G_SH2_out} = 657.152 \text{ K}$$

Temp. Rauchgas Austritt ÜH2

$$c_{pmG_SH2_out_check} := c_{pmRG}(T_{G_SH2_out} + 273.15 \text{ K}, x_{RG2}) = 1.182004 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$T_{Gm_SH2} := \frac{T_{WS} - T_{G_SH2_out}}{\ln\left(\frac{T_{WS}}{T_{G_SH2_out}}\right)} = 758.606 \cdot ^\circ\text{C}$$

Mittl. Temp. Rauchgas im ÜH2

$$\frac{T_{WS} + T_{G_SH2_out}}{2} = 763.576 \text{ K}$$

$$T_{Wam_SH2} := 458.79 \cdot ^\circ\text{C}$$

Mittl. Außentemp. Rohre ÜH2, iteriert

$$c_{pmG_out} := 1.102376 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$T_{GSam_SH2} := \frac{T_{Gm_SH2} + T_{Wam_SH2}}{2} = 608.698 \cdot ^\circ\text{C}$$

Mittl. Grenzschichttemp. außen
ÜH2

$$Q_{DotRG} := m_{DotRG} \cdot (c_{pmGWS} \cdot T_{WS} - c_{pmG_out} \cdot T_{Abg}) + m_{DotFA} \cdot c_{pAsh} \cdot (T_{WS} - T_{Abg}) = 55.74 \cdot \text{MW}$$

Stoffwerte Luft bzw. Rauchgas bei mittl. Grenzschichttemperatur:

$$\frac{Q_{DotRG} - Q_{DotSH2} - Q_{DotECO} - Q_{DotTR} - Q_{DotRCsh2} - Q_{DotRCeco}}{Q_{DotN}} = 9.299\%$$

$$\lambda_{G_SH2} := \lambda_{GG}(T_{GSam_SH2}, x_{RG2}) = 0.063851 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{L_SH2} := \lambda_{GG}(T_{GSam_SH2}, x_{Luft2}) = 0.061118 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\eta_{G_SH2} := \eta_{RG}(T_{GSam_SH2}, x_{RG2}) = 3.658663 \times 10^{-5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_{L_SH2} := \eta_{RG}(T_{GSam_SH2}, x_{Luft2}) = 3.772437 \times 10^{-5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$c_{pG_SH2} := c_{PRG}(T_{GSam_SH2} + 273.15\text{K}, x_{RG2}) = 1272.989 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{pL_SH2} := c_{PRG}(T_{GSam_SH2} + 273.15\text{K}, x_{Luft2}) = 1190.171 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_{GG}(T_{GSam_SH2}, x_{Luft2}) = 0.061118 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\eta_{RG}(T_{GSam_SH2}, x_{Luft2}) = 3.772 \times 10^{-5} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$c_{PRG}(T_{GSam_SH2} + 273.15\text{K}, x_{RG2}) = 1.273 \times 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Rohrgeometrie:

$$d_{a_SH2} := 38\text{mm} \quad \text{Außendurchmesser}$$

$$s_{SH2} := 4\text{mm} \quad \text{Wandstärke}$$

$$d_{i_SH2} := d_{a_SH2} - 2 \cdot s_{SH2} = 30 \cdot \text{mm} \quad \text{Innendurchmesser}$$

$$S_{B_SH2} := 200\text{mm} \quad \text{Querteilung}$$

$$S_{L_SH2} := 3 \cdot d_{a_SH2} = 114 \cdot \text{mm} \quad \text{Längsteilung}$$

$$d_{TR_SH2} := 51\text{mm}$$

Berechnung der Rauchzug Querschnittsfläche

$$n_{SH2} := 115$$

Anzahl Rohre. Auswahlkriterium: Dampfgeschwindigkeit so, dass
Druckverlust kleiner 3 bar
siehe später

$$T_{Dm_SH2} := \frac{T_{FD} - T_{SH2_in}}{\ln\left(\frac{T_{FD}}{T_{SH2_in}}\right)} = 445.007 \cdot ^\circ\text{C}$$

Mittl. Dampftemperatur ÜH2

$$p_{mSH2} := \frac{p_{FD} + p_{SH2_in}}{2} = 81.31 \cdot \text{bar}$$

Mittl. Dampfdruck ÜH2

$$\rho_{Dm_SH2} := 26.914005 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Mittlere Dichte Dampf bei mittlerer
Dampf Temperatur und mittl. Dampfdruck

$$w_{D_SH2} := \frac{\dot{m}_{DotFD}}{\left(\frac{d_{i_SH2}^2 \cdot \pi}{4}\right) \cdot \rho_{Dm_SH2} \cdot n_{SH2}} = 20.315 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Geschwindigkeit Dampf in SH2}$$

OK

$$fl_{SH2} := 5 \quad \text{Flutigkeit SH2}$$

$$b_{RGzug_SH2} := 4.65 \text{m} \quad \text{Breite Rauchgaszug} \quad \frac{(n_{SH2} + 1) \cdot S_{B_SH2}}{fl_{SH2}} = 4.64 \text{m}$$

$$l_{RGzug_SH2} := 4.55 \text{m}$$

Länge Rauchgaszug. Kriterium:
Rauchgasgeschwindigkeit im engsten Querschnitt
kleiner 12 m/s, iteriert nach gesamter Rohrlänge des
WT

$$l_{Rohr_SH2} := 4.412 \text{m}$$

$$A_{RGzug_SH2} := b_{RGzug_SH2} \cdot l_{RGzug_SH2} - \frac{d_{TR_SH2}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{n_{SH2}}{fl_{SH2}} \cdot 2 = 21.064 \text{m}^2 \quad \text{Querschnittsfläche Rauchgaszug}$$

$$\rho_{GSH2_in} := \frac{p_N}{R_G \cdot T_N} \cdot \frac{273.15 \text{K}}{T_{WS} + 273.15 \text{K}} = 0.304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Rauchgas Eintritt SH2}$$

$$\rho_{FA} := 2.2 \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} = 2.2 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Flugasche (abgeschätzt)}$$

Querschnitt RGzug im engsten Querschnitt: (Abstand zur Wand=1 Querteilung)

$$A_{RGzug_SH2_engst} := \left(b_{RGzug_SH2} - \frac{n_{SH2}}{fl_{SH2}} \cdot d_{a_SH2}\right) \cdot l_{Rohr_SH2} + b_{RGzug_SH2} \cdot (l_{RGzug_SH2} - l_{Rohr_SH2}) - \frac{d_{TR_SH2}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{n_{SH2}}{fl_{SH2}} \cdot 2 = 17.207 \text{m}^2$$

$$w_{SH2_engst} := \frac{\frac{\dot{m}_{DotRG}}{\rho_{GSH2_in}} + \frac{\dot{m}_{DotFA}}{\rho_{FA}}}{A_{RGzug_SH2_engst}} = 12.027 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Geschwindigkeit im engsten Querschnitt von SH2}$$

OK

Wärmeübergangskoeffizient außen:

$$e_{b_SH2} := \frac{S_{B_SH2}}{d_{a_SH2}} = 5.263 \quad e_{l_SH2} := \frac{S_{L_SH2}}{d_{a_SH2}} = 3$$

$$\psi_{SH2} := 1 - \frac{\pi}{4 \cdot e_{1_SH2} \cdot e_{b_SH2}} = 0.95$$

$$f_{e_SH2} := \left[1 + \left(1.9 - \frac{1.8}{e_{1_SH2}} \right) \cdot \frac{1}{\frac{4}{\pi} \cdot e_{b_SH2} \cdot \psi_{SH2} - 0.4} \right] \cdot \psi_{SH2}^{-0.6} = 1.256 \quad (\text{fluchtende Anordnung})$$

$$f_{G_SH2} := \left(\frac{\lambda_{G_SH2}}{\lambda_{L_SH2}} \right)^{0.58} \cdot \left(\frac{\eta_{G_SH2}}{\eta_{L_SH2}} \right)^{-0.38} \cdot \left(\frac{c_{pG_SH2}}{c_{pL_SH2}} \right)^{0.42} = 1.067$$

$$\Phi_{0_SH2} := \frac{m_{DotRG}}{A_{RGzug_SH2}} = 2.984 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad \text{Massenstromdichte vor Rohrbündel}$$

$$\alpha_{a_SH2} := 0.287 \cdot \lambda_{L_SH2}^{0.636} \cdot c_{pL_SH2}^{0.364} \cdot \eta_{L_SH2}^{-0.236} \cdot \Phi_{0_SH2}^{0.6} \cdot d_{a_SH2}^{-0.4} \cdot f_{G_SH2} \cdot f_{e_SH2}$$

$$\alpha_{a_SH2} = 67.536 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Wärmeübergangskoeffizient innen:

$$T_{Wim_SH2} := 454.219^\circ\text{C} \quad \text{mittl. Wandtemp. innen, interiert}$$

$$T_{mGS_SH2} := \frac{T_{Dm_SH2} + T_{Wim_SH2}}{2} = 449.613^\circ\text{C} \quad \text{mittl. Grenzschichttemperatur innen}$$

$$p_{mSH2} = 81.31 \cdot \text{bar}$$

Stoffwerte Dampf bei mittl. Grenzschichttemperatur und mittl. Dampfdruck:

$$\lambda_{SH2} := 0.068537 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \eta_{SH2} := 26.627762 \cdot 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s} \quad c_{p_SH2} := 2.593035 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Phi_{SH2} := \frac{m_{DotFD}}{n_{SH2} \cdot \left(\frac{d_{i_SH2}^2 \cdot \pi}{4} \right)} = 546.748 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad \text{Massenstromdichte Dampf}$$

$$\rho_{Gm_SH2} := \frac{p_N}{R_G \cdot T_N} \cdot \frac{273.15\text{K}}{T_{WS} + 273.15\text{K}} = 0.304 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Mittl. Dichte Rauchgas ÜH2}$$

Wärmeübergangskoeffizient innen ÜH2:

$$\alpha_{i_SH2} := 0.0224 \cdot \lambda_{SH2}^{0.58} \cdot \eta_{SH2}^{-0.38} \cdot c_{p_SH2}^{0.42} \cdot \Phi_{SH2}^{0.8} \cdot d_{i_SH2}^{-0.2} = 2.198 \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Wärmedurchgangskoeffizient ÜH2:

$$k_{SH2} := \frac{1}{\frac{d_{a_SH2}}{d_{i_SH2} \cdot \alpha_{i_SH2}} + \frac{d_{a_SH2}}{2 \cdot \lambda_{FR}} \cdot \ln\left(\frac{d_{a_SH2}}{d_{i_SH2}}\right) + \frac{1}{\alpha_{a_SH2}}} = 64.567 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Logarithm. mittl. Rauchgastemp.

Wärmetauscher:

$$F_{korrr_SH2} := 1 \quad \text{Korrekturfaktor Stromführung}$$

$$LMTD_{SH2} := \frac{(T_{WS} - T_{FD}) - (T_{G_SH2_out} - T_{SH2_in})}{\ln\left(\frac{T_{WS} - T_{FD}}{T_{G_SH2_out} - T_{SH2_in}}\right)} = 313.598 \cdot ^\circ C$$

logarithmische mittl. Temperaturdifferenz ÜH2

$$Re_{st} := \frac{w_{stFR} \cdot d_{iFR}}{v_{st} \cdot \eta_{st}} = \blacksquare \quad \text{Reynoldszahl Dampf (gesättigt)}$$

$$kA_{SH2} := \frac{Q_{DotSH2}}{F_{korrr_SH2} \cdot LMTD_{SH2}} = 46.935 \cdot \frac{kW}{K} \quad \text{Übertragungsfähigkeit ÜH2}$$

$$Q_{DotTRsh2} = 1.085 \cdot MW$$

$$Q_{DotSH2} = 14.719 \cdot MW$$

$$A_{SH2} := \frac{kA_{SH2}}{k_{SH2}} = 726.919 \text{ m}^2 \quad \text{Wärmeübertragungsfläche ÜH2}$$

Iteration Wandtemperaturen:

$$Q_{DotSH2} = \alpha_{a_SH2} \cdot A_{SH2} \cdot (T_{Gm_SH2} - T_{Wam_SH2})$$

$$T_{Wam_SH2_end} := \frac{Q_{DotSH2} - A_{SH2} \cdot T_{Gm_SH2} \cdot \alpha_{a_SH2}}{A_{SH2} \cdot \alpha_{a_SH2}} = 458.79 \cdot ^\circ C$$

$$Q_{DotSH2} = \alpha_{i_SH2} \cdot A_{SH2} \cdot (T_{Wim_SH2} - T_{Dm_SH2})$$

$$T_{Wim_SH2_end} := \frac{Q_{DotSH2} + A_{SH2} \cdot T_{Dm_SH2} \cdot \alpha_{i_SH2}}{A_{SH2} \cdot \alpha_{i_SH2}} = 454.219 \cdot ^\circ C$$

$$f_V := 0.8 \quad \text{Verschmutzungsfaktor}$$

$$L_{SH2} := \frac{A_{SH2}}{d_{a_SH2} \cdot \pi \cdot f_V} = 7611.362 \text{ m} \quad \text{Rohrlänge ÜH2}$$

Iteration Länge Rgzug

$$h_{maint} := 800 \text{ mm} \quad \text{Wartungsabstand}$$

$$n_{durch_SH2} := 15 \quad \text{Anzahl Durchgänge}$$

$$l_{\text{Rohr_SH2_end}} := \frac{L_{\text{SH2}}}{n_{\text{SH2}} \cdot n_{\text{durch_SH2}}} = 4.412 \text{ m}$$

$$l_{\text{Rohr_SH2}} = 4.412 \text{ m}$$

$$l_{\text{RGzug_SH2}} = 4.55 \text{ m}$$

$$b_{\text{RGzug_SH2}} = 4.65 \text{ m}$$

$$\frac{l_{\text{Rohr_SH2}}}{l_{\text{RGzug_SH2}}} = 0.97$$

Höhe Wärmetauscher

$$h_{\text{Rohre_SH2}} := S_{L_SH2} \cdot (n_{\text{durch_SH2}} \cdot fl_{\text{SH2}} - 1) = 8.436 \text{ m}$$

$$n_{\text{maint_SH2}} := \frac{h_{\text{Rohre_SH2}}}{h_{\text{pack}}} = 5.624 \quad \text{erforderliche Anzahl der Wartungsabstände}$$

$$H_{\text{SH2}} := h_{\text{Rohre_SH2}} + \text{floor}(n_{\text{maint_SH2}}) \cdot h_{\text{maint}} = 12.436 \text{ m}$$

Iteration Wärmestrom Tragrohre und Wand

$$A_{\text{TR_SH2}} := \frac{n_{\text{SH2}}}{fl_{\text{SH2}}} \cdot 2 \cdot d_{\text{TR_SH2}} \cdot \pi \cdot h_{\text{Rohre_SH2}} = 62.175 \cdot \text{m}^2$$

$$T_{\text{Dm_TR}} := \frac{T_{\text{SBHE_in}} + T_{\text{s}}}{2} = 304.944 \cdot \text{°C}$$

$$Q_{\text{DotTR_SH2_end}} := 0.6k_{\text{SH2}} \cdot A_{\text{TR_SH2}} \cdot \frac{(T_{\text{WS}} - T_{\text{Dm_TR}}) - (T_{\text{G_SH2_out}} - T_{\text{Dm_TR}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{WS}} - T_{\text{Dm_TR}}}{T_{\text{G_SH2_out}} - T_{\text{Dm_TR}}}\right)} = 1.085 \cdot \text{MW}$$

$$A_{\text{Wall_SH2}} := 2 \cdot h_{\text{Rohre_SH2}} \cdot (l_{\text{RGzug_SH2}} + b_{\text{RGzug_SH2}}) = 155.222 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_{\text{Wall_SH2}}}{A_{\text{SH2}}} = 0.214$$

$$Q_{\text{DotWall_SH2_end}} := 0.4k_{\text{SH2}} \cdot A_{\text{Wall_SH2}} \cdot \frac{(T_{\text{WS}} - T_{\text{s}}) - (T_{\text{G_SH2_out}} - T_{\text{s}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{WS}} - T_{\text{s}}}{T_{\text{G_SH2_out}} - T_{\text{s}}}\right)} = 1.819 \cdot \text{MW}$$