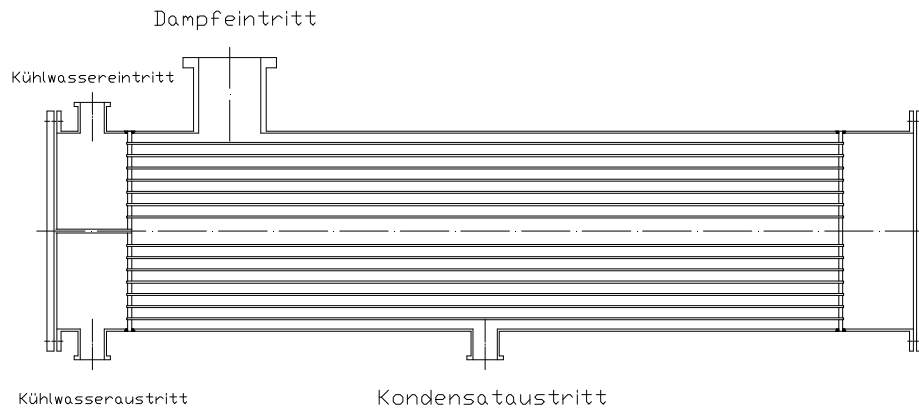


## Wärmetauscher Typ NEN



Es soll ein Wärmetauscher vom Typ NEN konstruiert werden. Rohrseitig wird er mit Wasser und mantelseitig mit Dampf im Gegenstrom beaufschlagt und auskondensiert.

Eintrittstemperatur des Dampfes ist  $\zeta_{\text{einH}}=106^\circ\text{C}$ ,  $\zeta_{\text{ausH}}=104^\circ\text{C}$ .

Rohrseitig tritt das Kühlwasser mit  $\zeta_{\text{einK}}=20^\circ\text{C}$  ein.

Die Massenströme sind Mantelseitig  $m_{\text{Mantel}}=34000 \text{ kg/h}$  bei einem Eintrittsdruck von 1,2bar und Rohrseitig  $m_{\text{Rohr}}=330226 \text{ kg/h}$  bei Eintrittsdruck 6bar.

### Konstruktive Angaben:

$\zeta_{\text{einH}} := 106\text{K} + 273.15\text{K}$  Eintrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{einH}}$

$\zeta_{\text{ausH}} := 104\text{K} + 273.15\text{K}$  Austrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{ausH}}$

$\zeta_{\text{einK}} := 20\text{K} + 273.15\text{K}$  Eintrittstemperatur Kühlmedium  $\zeta_{\text{einK}}$

$m_{\text{Mantel}} := 34000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  Massenstrom  $m_{\text{Mantel}}$

$m_{\text{Rohr}} := 330226 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  Massenstrom  $m_{\text{Rohr}}$

$p_{\text{einM}} := 1.2\text{bar}$  Eintrittsdruck mantelseitig  $p_{\text{einM}}$

$p_{\text{einR}} := 6\text{bar}$  Eintrittsdruck rohreseitig  $p_{\text{einR}}$

$k_{\text{wert}} := 1918 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$  K-Wert aus Angabe für verschmutzten WT

$d_{\text{aRohr}} := 25\text{mm}$  Aussendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$d_{\text{iRohr}} := 21\text{mm}$  Innendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$l_{\text{Rohr}} := 7500\text{mm}$  Länge Rohr von Rohrboden zu Rohrboden

$c_{\text{soll\_Rohr}} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

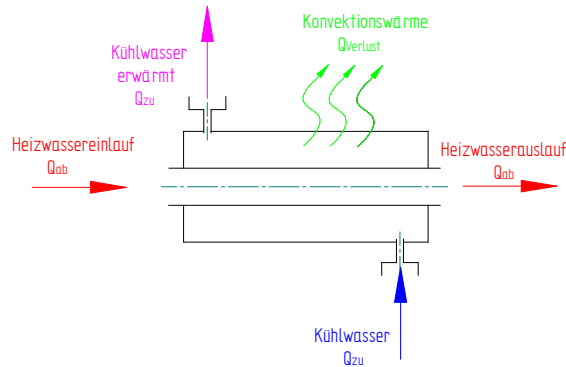
Berechnung der abgegebenen Wärmeleistung des Heizmediums an das Kühlmedium

Grundsätzlich gilt:

$$Q_{ab} = Q_{zu}$$

$$Q_{ab} = m_H \cdot c_{pmH} \cdot \Delta\zeta_H$$

$$Q_{zu} = m_K \cdot c_{pmK} \cdot \Delta\zeta_K$$



Da aber  $c_{pmH}$  des Heizmediums nicht bekannt ist werde ich die abgegebene Heizleistung über die Enthalpiedifferenz des Heizmediums beim Ein- und Austritt berechnen.

danach gilt für die abgegebene Heizleistung  $Q_{abH}$ :

$$k := 10^3$$

$$Q_{abH} = m_{Mantel} \cdot (h_{2H} - h_{1H})$$

$$h_{2H} := 435.9899 \frac{k \cdot J}{kg}$$

Enthalpie des Dampfes bei 104°C und 1,2bar lt.Bertsch-Dampf Tafel

$$h_{1H} := 2685.6052 \frac{k \cdot J}{kg}$$

Enthalpie des Dampfes bei 106°C und 1,2bar lt.Bertsch-Dampf Tafel

Da ich den Druckverlust nicht abschätzen kann, rechne ich vorerst ohne Druckverlust und überprüfe später die Rechnung nochmals.

$$\Delta\zeta := \zeta_{einH} - \zeta_{ausH}$$

$$\Delta\zeta = 2 \text{ K}$$

Temperaturunterschied  $\Delta\zeta$  Eintritt nach Austritt

$$Q_{abH} := m_{Mantel} \cdot (h_{1H} - h_{2H})$$

$$Q_{abH} = 21246.367 \cdot k \cdot W$$

Da die mittlere spezifische Wärmekapazität für Wasser im Temperaturbereich von 20-100°C annähernd konstant ist, rechne ich mit  $c_{pmWasser} = 4,18 kJ/K$ .

$$c_{pmWasser} := 4.18 \frac{k \cdot J}{kg \cdot K}$$

Zugeführte Wärmeleistung ins Kühlmedium

$$Q_{zu} = m_{Rohr} \cdot c_{pmWasser} \cdot \Delta\zeta_{Wasser}$$

$$Q_{zuWasser} := Q_{abH}$$

$$\Delta\zeta_{Wasser} := \frac{Q_{zuWasser}}{m_{Rohr} \cdot c_{pmWasser}}$$

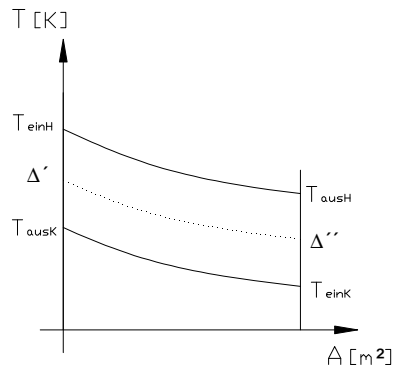
$$\Delta\zeta_{Wasser} = 55.411 \text{ K}$$

$$\zeta_{ausK} := \zeta_{einK} + \Delta\zeta_{Wasser}$$

$$\zeta_{ausK} = 75.411 \cdot ^\circ C$$

Temperatur Wasseraustritt

### mittlere logarithmische Temperaturdifferenz



$$\Delta' := \zeta_{\text{einH}} - \zeta_{\text{ausK}} \quad \Delta' = 30.589 \text{ K} \quad \text{Temp. Differenz } \Delta'$$

$$\Delta'' := \zeta_{\text{ausH}} - \zeta_{\text{einK}} \quad \Delta'' = 84 \text{ K} \quad \text{Temp. Differenz } \Delta''$$

$$\Delta\zeta_m := \frac{\Delta' - \Delta''}{\ln\left(\frac{\Delta'}{\Delta''}\right)} \quad \Delta\zeta_m = 52.873 \text{ K} \quad \text{mittlere logarithmische Temperaturdifferenz}$$

### Erforderliche Heizfläche

Aus

$$Q_{\text{zuWasser}} = A_{\text{erf}} \cdot k_{\text{wert}} \cdot \Delta\zeta_m$$

folgt

$$A_{\text{erf}} := \frac{Q_{\text{zuWasser}}}{k_{\text{wert}} \cdot \Delta\zeta_m} \quad A_{\text{erf}} = 209.51 \text{ m}^2 \quad \text{Erforderliche Heizfläche}$$

### Erforderliche Anzahl der Rohre

Rohre := 1

die Heizfläche lässt sich aus

$$A_{\text{erf}} = d_{\text{aRohr}} \cdot \pi \cdot l_{\text{Rohr}} \cdot n_{\text{Rohre}}$$

errechnen, daher folgt

$$n_{\text{Rohre\_erf}} := \frac{A_{\text{erf}}}{d_{\text{aRohr}} \cdot \pi \cdot l_{\text{Rohr}}} \quad n_{\text{Rohre\_erf}} = 355.676$$

gewählt

$$n_{\text{Rohr\_gew}} := 354 \text{ Rohre} \quad \text{Gewählte Anzahl von Rohren}$$

### Ermitteln der Wegigkeit

es gilt:

$$m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Wasser}_\zeta m} = A_{\text{quer\_innen}} \cdot c_{\text{tat}}$$

mit

$$A_{\text{quer\_innen}} := \frac{d_{\text{iRohr}}^2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Rohr\_gew}}}{4} \quad A_{\text{quer\_innen}} = 122611.649 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Innenquerschnitt Rohr}$$

$$\zeta_m := \frac{\zeta_{\text{einK}} + \zeta_{\text{ausK}}}{2} \quad \zeta_m = 47.706 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{mittlere Kühlwassertemperatur}$$

$$v_{\text{Wasser}_\zeta m} := 0.0010 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{spez. Volumen bei } \zeta_m \text{ und } p_{\text{einR}} \text{ lt. Bertsch-Dampf tabel}$$

folgt für die tatsächliche Kühlmittelströmungsgeschwindigkeit  $c_{\text{tatK}}$  bei Einwegigkeit

$$c_{\text{tatK}} := \frac{m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Wasser}_\zeta m}}{A_{\text{quer\_innen}}} \quad c_{\text{tatK}} = 0.748 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Kühlmittelströmungsgeschwindigkeit } c_{\text{tat}}$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{theo}} := \frac{c_{\text{soll\_Rohr}}}{c_{\text{tatK}}} \quad \text{Wegigkeit}_{\text{theo}} = 1.871 \quad \text{theoretische Wegigkeit}$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{real}} := 2 \quad \text{Wegigkeit}_{\text{real}} = 2 \quad \text{gewählte Wegigkeit}$$

Überprüfung ob gewählte Wegigkeit zur gewünschten Geschwindigkeit führt

es gilt

$$V = A_{\text{quer\_innen}} \cdot c_{\text{realK}} \cdot \text{Wegigkeit}_{\text{real}} \quad \text{aus Kontinuitätsgleichung}$$

$$m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{rohr}} = A_{\text{innen\_real}} \cdot c_{\text{realK}} \quad \text{mit spez. Volumen gerechnet}$$

$$A_{\text{quer\_innen\_real}} := \frac{A_{\text{quer\_innen}}}{\text{Wegigkeit}_{\text{real}}} \quad \text{Da ja nicht mehr ganze Fläche angeströmt!!}$$

$$A_{\text{quer\_innen\_real}} = 61305.824 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Real angeströmte Querschnittsfläche}$$

somit wird für  $c_{\text{realK}}$  unter Berücksichtigung der Wegigkeit

$$c_{\text{realK}} := \frac{m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Wasser}_\zeta m}}{A_{\text{quer\_innen\_real}}} \quad c_{\text{realK}} = 1.496 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Rohrgeschwindigkeit}_{\text{real}} := \text{wenn}(c_{\text{realK}} < 1.1 \cdot c_{\text{soll\_Rohr}}, \text{wenn}(c_{\text{realK}} > 0.9 \cdot c_{\text{soll\_Rohr}}, \text{"paast!!"}, \text{"zu klein"}), \text{"zu groß"})$$

$$\text{Rohrgeschwindigkeit}_{\text{real}} = \text{"paast!!"}$$

Überprüfung k-Wert: *alle Werte nach Bertsch wenn nicht anders angegeben!!*

Bestimmung der Reynoldszahl

$$\nu_{\zeta_m} := 0.5748 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

kinematische Viskosität bei  
 $\zeta_m = 47.706 \cdot ^\circ\text{C}$

$$\text{Re}_{\text{vorh}} := \frac{c_{\text{realK}} \cdot d_{\text{iRohr}}}{\nu_{\zeta_m}}$$

$\text{Re}_{\text{vorh}} = 54665$  vorhandene Reynoldszahl Re

da  $10^4 < \text{Re} < 10^6$  ist, gilt für turbulente Strömung

$$\text{Nu} = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot \text{Re}_{\text{vorh}} \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{\text{iRohr}}}{l_{\text{Rohr}}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]$$

Gleichung für Nusseltzahl

mit

$$\text{Pr} = \frac{\eta_{\text{wasser}} \cdot c_{\text{pwasser}}}{\lambda_{\text{wasser}}}$$

Gleichung für Prandtlzahl

$$\lambda_{\text{wasser}} := 0.6411 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit Wasser bei  $\zeta_m$

$$c_{\text{pwasser}} := 4.1780 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Wärmemenge bei  $\zeta_m$

$$\eta_{\text{wasser}} := 568.6883 \cdot 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

dynamische Viskosität bei  $\zeta_m$

$$\text{Pr} := \frac{\eta_{\text{wasser}} \cdot c_{\text{pwasser}}}{\lambda_{\text{wasser}}}$$

$\text{Pr} = 3.706$  Prandtlzahl

$$\xi := \left(1.8 \cdot \log(\text{Re}_{\text{vorh}} - 1.5)\right)^{-2}$$

$\xi = 0.014$  Xi

$$\text{Nu} := \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot \text{Re}_{\text{vorh}} \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{\text{iRohr}}}{l_{\text{Rohr}}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]$$

$\text{Nu} = 204.76$  Nusseltzahl

$$\alpha_{\text{innen}} := \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{wasser}}}{d_{\text{iRohr}}} \quad \alpha_{\text{innen}} = 6251.029 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeübergangskoeffizient Rohr innen}$$

$$\lambda'_{\text{wasser}} := 0.6802 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeleitfähigkeit Wasser bei Siedetemperatur}$$

$$t_s := 158.8324\text{K} + 273.15\text{K} \quad t_s = 158.832 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{Siedetemperatur}$$

$$\rho'_{\text{wasser}} := 908.5887 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Wasser bei Siedetemperatur}$$

$$h''_{\text{wasser}} := 2756.1389 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Enthalpie bei Ende Verdunstung}$$

$$h'_{\text{wasser}} := 670.5012 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Enthalpie bei Anfang Verdunstung}$$

$$r_{\text{wasser}} := h''_{\text{wasser}} - h'_{\text{wasser}} \quad r_{\text{wasser}} = 2085.638 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Verdunstungswärme}$$

$$\nu'_{\text{wasser}} := 0.1888 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{kinematische Viskosität bei Siedetemperatur} \quad l_{\text{rohr}} := 0.075\text{m}$$

$$t_w := t_s - 10\text{K} \quad \text{angenommene Wandtemperatur zur Iteration k-Wert}$$

$$\alpha_{\text{ausen}} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda'_{\text{wasser}}{}^3 \cdot g \cdot \rho'_{\text{wasser}} \cdot r_{\text{wasser}}}{\nu'_{\text{wasser}} \cdot l_{\text{rohr}} \cdot (t_s - t_w)}} \quad \alpha_{\text{ausen}} = 13443.275 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{fi}} := 0.00012 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad \text{Foulingwiderstand im Rohr lt. Angabe}$$

$$R_{\text{fa}} := 0.00004 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad \text{Foulingwiderstand an Rohraussenseite lt. Angabe}$$

$$\lambda_{\text{rohr}} := 53 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeleitfähigkeit unlegierter Stahl lt. Wikipedia.de}$$

$$k_{\text{wertreal}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen}}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + \frac{d_{\text{aRohr}}}{2\lambda_{\text{rohr}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{ausen}}} + R_{\text{fi}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + R_{\text{fa}}}$$

$$k_{\text{wertreal}} = 2045.786 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{k-Wert mittels Schätzung Wandtemperatur ermittelt}$$

Überprüfung ob gewählte Wandtemperaturen zulässig sind

$$\zeta_{am} := \frac{\zeta_{einH} + \zeta_{ausH}}{2} \quad \text{mittlere Rohrtemperatur aussen am Rohr}$$

$$A_{aussein} := d_{aRohr} \cdot \pi \cdot l_{Rohr} \cdot n_{Rohr\_gew} \quad A_{aussein} = 208.523 \text{ m}^2 \quad \text{Rohraussenfläche}$$

$$\zeta_{Wandaussen} := \zeta_{am} - \frac{Q_{zuWasser}}{A_{aussein} \cdot \alpha_{aussein}}$$

$$\zeta_{Wandaussen} = 97.421 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{errechnete Rohraussentemperatur}$$

Iteration 1.Schritt

$$\alpha_{aussein} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda'_{wasser} \cdot g \cdot \rho'_{wasser} \cdot r_{wasser}}{\nu'_{wasser} \cdot l_{rohr} \cdot (t_s - \zeta_{Wandaussen})}} \quad \alpha_{aussein} = 8539.696 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\zeta_{Wandaussen} := \zeta_{am} - \frac{Q_{zuWasser}}{A_{aussein} \cdot \alpha_{aussein}}$$

$$\zeta_{Wandaussen} = 93.069 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{errechnete Rohraussentemperatur}$$

Iteration 2.Schritt

$$\alpha_{aussein} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda'_{wasser} \cdot g \cdot \rho'_{wasser} \cdot r_{wasser}}{\nu'_{wasser} \cdot l_{rohr} \cdot (t_s - \zeta_{Wandaussen})}} \quad \alpha_{aussein} = 8394.764 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\zeta_{Wandaussen} := \zeta_{am} - \frac{Q_{zuWasser}}{A_{aussein} \cdot \alpha_{aussein}}$$

$$\zeta_{Wandaussen} = 92.863 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{errechnete Rohraussentemperatur}$$

Iteration 3.Schritt

$$\alpha_{\text{ausßen}} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{wasser}}^3 \cdot g \cdot \rho_{\text{wasser}} \cdot r_{\text{wasser}}}{\nu_{\text{wasser}} \cdot l_{\text{rohr}} \cdot (t_s - \zeta_{\text{Wandaussen}})}}$$

$$\alpha_{\text{ausßen}} = 8388.203 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\zeta_{\text{Wandaussen}} := \zeta_{\text{am}} - \frac{Q_{\text{zuWasser}}}{A_{\text{ausßen}} \cdot \alpha_{\text{ausßen}}}$$

$$\zeta_{\text{Wandaussen}} = 92.853 \cdot ^\circ\text{C}$$

errechnete Rohraussetemperatur

Iteration 4.Schritt

$$\alpha_{\text{ausßen}} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{wasser}}^3 \cdot g \cdot \rho_{\text{wasser}} \cdot r_{\text{wasser}}}{\nu_{\text{wasser}} \cdot l_{\text{rohr}} \cdot (t_s - \zeta_{\text{Wandaussen}})}}$$

$$\alpha_{\text{ausßen}} = 8387.902 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\zeta_{\text{Wandaussen}} := \zeta_{\text{am}} - \frac{Q_{\text{zuWasser}}}{A_{\text{ausßen}} \cdot \alpha_{\text{ausßen}}}$$

$$\zeta_{\text{Wandaussen}} = 92.853 \cdot ^\circ\text{C}$$

errechnete Rohraussetemperatur

Hier breche ich die Iteration ab, da  $\Delta_{\text{ausßen}}$  sehr klein ist!!!

$$k_{\text{wertreal}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen}}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + \frac{d_{\text{aRohr}}}{2\lambda_{\text{rohr}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{ausßen}}} + R_{\text{fi}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + R_{\text{fa}}}$$

$$k_{\text{wertreal}} = 1873.914 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

k-Wert mittels Iteration ermittelt

## Überprüfung der ermittelten Werte mit iterierten k-Wert

### Erforderliche Abstrahlfläche

Aus

$$Q_{\text{zuWasser}} = A_{\text{erf}} \cdot k_{\text{wertreal}} \cdot \Delta\zeta_{\text{m}}$$

folgt

$$A_{\text{erf}} := \frac{Q_{\text{zuWasser}}}{k_{\text{wertreal}} \cdot \Delta\zeta_{\text{m}}}$$

$$A_{\text{erf}} = 214.439 \text{ m}^2$$

Erforderliche Abstrahlfläche



## Erforderliche Anzahl der Rohre

die Abstrahlfläche lässt sich aus

$$A_{\text{erf}} = d_{\text{aRohr}} \cdot \pi \cdot l_{\text{Rohr}} \cdot n_{\text{Rohre}}$$

errechnen, daher folgt

$$n_{\text{Rohre\_erf}} := \frac{A_{\text{erf}}}{d_{\text{aRohr}} \cdot \pi \cdot l_{\text{Rohr}}}$$

$$n_{\text{Rohre\_erf}} = 364.043$$

gewählt

$$n_{\text{Rohr\_gew}} := 358 \text{ Rohre}$$

Gewählte Anzahl von Rohren

## Ermitteln der Wegigkeit

es gilt:

$$m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{wasser\_}\zeta_m} = A_{\text{quer\_innen}} \cdot c_{\text{tat}}$$

mit

$$A_{\text{quer\_innen}} := \frac{d_{\text{iRohr}}^2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Rohr\_gew}}}{4}$$

$$A_{\text{quer\_innen}} = 123997.091 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Innenquerschnitt Rohr}$$

$$\zeta_m := \frac{\zeta_{\text{einK}} + \zeta_{\text{ausK}}}{2}$$

$$\zeta_m = 47.706 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{mittlere Kühlwassertemperatur}$$

$$v_{\text{Wasser\_}\zeta_m} := 0.0010 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

spez. Volumen bei  $\zeta_m$  und  $p_{\text{einR}}$  lt. Bertsch-Dampf tabel

folgt für die tatsächliche Kühlmittelströmungsgeschwindigkeit  $c_{\text{tatK}}$  bei Einwegigkeit

$$c_{\text{tatK}} := \frac{m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Wasser\_}\zeta_m}}{A_{\text{quer\_innen}}}$$

$$c_{\text{tatK}} = 0.74 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Kühlmittelströmungsgeschwindigkeit } c_{\text{tat}}$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{theo}} := \frac{c_{\text{soll\_Rohr}}}{c_{\text{tatK}}}$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{theo}} = 1.892 \quad \text{theoretische Wegigkeit}$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{real}} := 2$$

$$\text{Wegigkeit}_{\text{real}} = 2 \quad \text{gewählte Wegigkeit}$$

Überprüfung ob gewählte Wegigkeit zur gewünschten Geschwindigkeit führt

es gilt

$$V = A_{\text{quer\_innen}} \cdot c_{\text{realK}} \cdot \text{Wegigkeit}_{\text{real}}$$

aus Kontinuitätsgleichung

$$m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{rohr}} = A_{\text{innen\_real}} \cdot c_{\text{realK}}$$

mit spez. Volumen gerechnet

$$A_{\text{quer\_innen\_real}} := \frac{A_{\text{quer\_innen}}}{\text{Wegigkeit}_{\text{real}}}$$

Da ja nicht mehr ganze Fläche angeströmt!!

$$A_{\text{quer\_innen\_real}} = 61998.546 \cdot \text{mm}^2$$

Real angeströmte Querschnittsfläche

somit wird für  $c_{\text{realK}}$  unter Berücksichtigung der Wegigkeit

$$c_{\text{realK}} := \frac{m_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Wasser}} \cdot \zeta_m}{A_{\text{quer\_innen\_real}}}$$

$$c_{\text{realK}} = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rohrgeschwindigkeit<sub>real</sub> := wenn( $c_{\text{realK}} < 1.1 \cdot c_{\text{soll\_Rohr}}$ , wenn( $c_{\text{realK}} > 0.9 \cdot c_{\text{soll\_Rohr}}$ , "paast!!", "zu klein"), "zu groß")

Rohrgeschwindigkeit<sub>real</sub> = "paast!!"

### Überprüfung k-Wert mit iterierten Werten und neugewählter Rohrzahl:

Bestimmung der Reynoldszahl

$$\nu_{\zeta_m} := 0.5748 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

kinematische Viskosität bei  
 $\zeta_m = 47.706 \cdot ^\circ\text{C}$

$$Re_{\text{vorh}} := \frac{c_{\text{realK}} \cdot d_{\text{iRohr}}}{\nu_{\zeta_m}}$$

$$Re_{\text{vorh}} = 54054$$

vorhandene Reynoldszahl  $Re$

da  $10^4 < Re < 10^6$  ist, gilt für turbulente Strömung

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re_{\text{vorh}} \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{\text{iRohr}}}{l_{\text{Rohr}}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]$$

Gleichung für Nusseltzahl

mit

$$Pr = \frac{\eta_{\text{wasser}} \cdot c_{p\text{wasser}}}{\lambda_{\text{wasser}}}$$

Gleichung für Prandtlzahl

$$\lambda_{\text{wasser}} := 0.6411 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit Wasser bei  $\zeta_m$

$$c_{p\text{wasser}} := 4.1780 \frac{\text{k} \cdot \text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Wärmemenge bei  $\zeta_m$

$$\eta_{\text{wasser}} := 568.6883 \cdot 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

dynamische Viskosität bei  $\zeta_m$

$$Pr := \frac{\eta_{\text{wasser}} \cdot c_{p\text{wasser}}}{\lambda_{\text{wasser}}}$$

$$Pr = 3.706$$

Prandtlzahl

$$\xi := (1.8 \cdot \log(\text{Re}_{\text{vorh}} - 1.5))^{-2} \quad \xi = 0.014 \quad \text{Xi}$$

$$\text{Nu} := \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot \text{Re}_{\text{vorh}} \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \left[ 1 + \left(\frac{d_{\text{iRohr}}}{l_{\text{Rohr}}}\right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad \text{Nu} = 202.801 \quad \text{Nusseltzahl}$$

$$\alpha_{\text{innen}} := \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{wasser}}}{d_{\text{iRohr}}} \quad \alpha_{\text{innen}} = 6191.235 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeübergangskoeffizient Rohr innen}$$

$$\lambda'_{\text{wasser}} := 0.6802 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeleitfähigkeit Wasser bei Siedetemperatur}$$

$$t_s := 158.8324\text{K} + 273.15\text{K} \quad t_s = 158.832 \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{Siedetemperatur}$$

$$\rho'_{\text{wasser}} := 908.5887 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Wasser bei Siedetemperatur}$$

$$h''_{\text{wasser}} := 2756.1389 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Enthalpie bei Ende Verdunstung}$$

$$h'_{\text{wasser}} := 670.5012 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Enthalpie bei Anfang Verdunstung}$$

$$r_{\text{wasser}} := h''_{\text{wasser}} - h'_{\text{wasser}} \quad r_{\text{wasser}} = 2085.638 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Verdunstungswärme}$$

$$\nu'_{\text{wasser}} := 0.1888 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{kinematische Viskosität bei Siedetemperatur}$$

$$\alpha_{\text{ausen}} := 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda'_{\text{wasser}}{}^3 \cdot g \cdot \rho'_{\text{wasser}} \cdot r_{\text{wasser}}}{\nu'_{\text{wasser}} \cdot l_{\text{rohr}} \cdot (t_s - \zeta_{\text{Wandaussen}})}} \quad \alpha_{\text{ausen}} = 8387.888 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$R_{\text{fi}} := 0.00012 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad \text{Foulingwiderstand im Rohr lt. Angabe}$$

$$R_{\text{fa}} := 0.00004 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad \text{Foulingwiderstand an Rohraussenseite lt. Angabe}$$

$$\lambda_{\text{rohr}} := 53 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Wärmeleitfähigkeit unlegierter Stahl lt. Wikipedia.de}$$

$$k_{\text{wertreal}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen}}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + \frac{d_{\text{aRohr}}}{2\lambda_{\text{rohr}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{aussen}}} + R_{\text{fi}} \cdot \frac{d_{\text{aRohr}}}{d_{\text{iRohr}}} + R_{\text{fa}}}$$

$$k_{\text{wertreal}} = 1867.477 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

k-Wert mittels Iteration und Rohrzahl\_neu ermittelt

Zusammenfassung thermische Berechnung:

$n_{\text{Rohr\_gew}} = 358 \cdot \text{Rohre}$	gewählte Rohranzahl
$\text{Wegigkeit}_{\text{real}} = 2$	gewählte Wegigkeit
$c_{\text{realK}} = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Kühlmittelströmungsgeschwindigkeit $c_{\text{tat}}$
$\zeta_{\text{m}} = 47.706 \cdot ^\circ\text{C}$	mittlere Kühlwassertemperatur
$A_{\text{quer\_innen}} = 123997.091 \cdot \text{mm}^2$	Innenquerschnitt Rohr
$A_{\text{quer\_innen\_real}} = 61998.546 \cdot \text{mm}^2$	Real angeströmte Querschnittsfläche
$Re_{\text{vorh}} = 54054$	vorhandene Reynoldszahl $Re$
$Pr = 3.706$	Prandtlzahl
$\xi = 0.014$	$\xi$
$Nu = 202.801$	Nusseltzahl
$\alpha_{\text{innen}} = 6191.235 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	Wärmeübergangskoeffizient Rohr innen
$\alpha_{\text{ausen}} = 8387.888 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	Wärmeübergangskoeffizient am Rohr aussen
$R_{\text{fi}} := 0.00012 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	Foulingwiderstand im Rohr lt. Angabe
$R_{\text{fa}} := 0.00004 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	Foulingwiderstand an Rohraussenseite lt. Angabe
$\lambda_{\text{rohr}} := 53 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Wärmeleitfähigkeit unlegierter Stahl lt. Wikipedia.de
$k_{\text{wertreal}} = 1867.477 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	k-Wert mittels Iteration und Rohrzahl <sub>neu</sub> ermittelt

### Berechnung der erforderlichen Teilung $p_{Rohr}$

$d_{aRohr} = 25 \cdot \text{mm}$  Aussendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$d_{iRohr} = 21 \cdot \text{mm}$  Innendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$p_{\min} := 1.25 \cdot d_{aRohr}$   $p_{\min} = 31.25 \cdot \text{mm}$  Mindestteilung des Rohrbündels

$p_{\text{gewählt}} := 32 \text{mm}$   $p_{\text{gewählt}} = 32 \cdot \text{mm}$  Gewählte Teilung

$p_y := \sqrt{p_{\text{gewählt}}^2 - \left(\frac{p_{\text{gewählt}}}{2}\right)^2}$   $p_y = 27.713 \cdot \text{mm}$  Teilung in y-Richtung

$p_x := \frac{p_{\text{gewählt}}}{2}$   $p_x = 16 \cdot \text{mm}$  Teilung in x-Richtung

### Abschätzung Rohrbodenwandstärke

$s_{\text{erf}} = 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{nenn}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{P265GH}}} + c_1 + c_2$  lt. AD 2000

$d_{2\text{vorhanden}} := 190.6 \text{mm}$

$p_{\text{nenn}} := 10 \text{bar}$  Berechnungsdruck

$S_{\text{sicher}} := 1.5$  Sicherheitsfaktor

$c_1 := 0 \text{mm}$  Zuschlag für Fertigungstoleranzen

$c_2 := 1 \text{mm}$  Zuschlag für Abnutzung

$K_{P265GH} := 205 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  Festigkeitswerte für P265GH

$s_{\text{erf}} := 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{nenn}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{P265GH}}} + c_1 + c_2$   $s_{\text{erf}} = 7.522 \cdot \text{mm}$

$s_{\text{gewählt}} := 50 \text{mm}$  K

### Gewählter Manteldurchmesser und Wandstärke

Nachdem ein Manteldurchmesser von ~800mm gefordert wird, laut Skizze Rohrboden, wähle ich ein nahtloses Stahlrohr nach DIN 2448

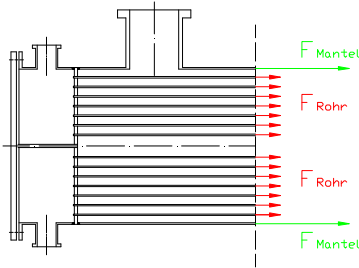
$s_{\text{Mantel}} := 8 \text{mm}$

$d_{i\text{Mantel}} := 797 \text{mm}$

$d_{a\text{Mantel}} := d_{i\text{Mantel}} + 2 \cdot s_{\text{Mantel}}$   $d_{a\text{Mantel}} = 813 \cdot \text{mm}$

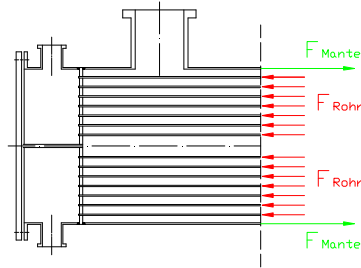
## Knicknachweis

Mantel heißer als Rohre



Rohre werden auf Zug beansprucht, keine Knickgefahr!!

Rohre heißer als Mantel



Rohre werden auf Druck beansprucht, große Knickgefahr!!

$$\zeta_{\text{einK}} = 293.15 \text{ K}$$

Eintrittstemperatur Kühlmedium  $\zeta_{\text{einK}}$

$$\zeta_{\text{ausK}} = 348.561 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Kühlmedium  $\zeta_{\text{ausK}}$

$$\zeta_{\text{einH}} = 379.15 \text{ K}$$

Eintrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{einH}}$

$$\zeta_{\text{ausH}} = 377.15 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{ausH}}$

Errechnen der durchschnittlichen Rohrtemperaturen

$$\zeta_{\text{durchM}} := \frac{\zeta_{\text{einH}} + \zeta_{\text{ausH}}}{2}$$

$$\zeta_{\text{durchM}} = 105.0^\circ\text{C}$$

Durchschnittliche Manteltemperatur

$$\zeta_{\text{durchR}} := \frac{\zeta_{\text{einK}} + \zeta_{\text{ausK}}}{2}$$

$$\zeta_{\text{durchR}} = 47.706^\circ\text{C}$$

Durchschnittliche Rohrtemperatur

das Hooksche Gesetz besagt

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{bzw.} \quad \sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E$$

$$\text{bzw.} \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

Daraus folgt

$$\frac{F}{A} = \frac{\Delta l}{l} \cdot E \quad \Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$$

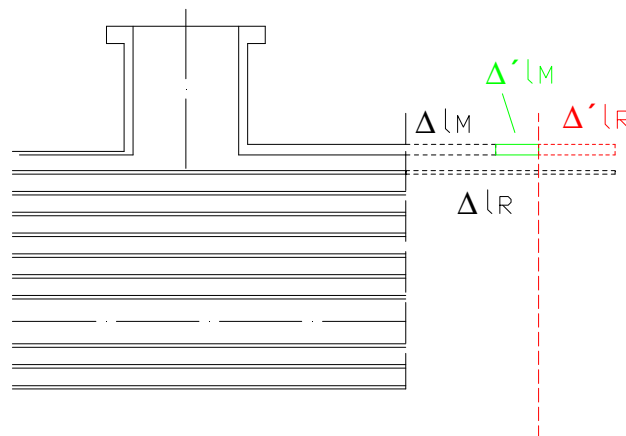
für die Differenzlängen gilt ebenso

$$\Delta l_R = \alpha_R \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchR}}$$

Differenzlänge, hervorgerufen durch die Wärmedehnung

$$\Delta l_M = \alpha_M \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchM}}$$

Differenzlänge, hervorgerufen durch die Wärmedehnung



Die Spannung in den Rohren erweitert die Länge des Mantels zusätzlich mit  $\Delta l'_M$ , daher muss das Rohr die Länge  $\Delta l'_R$  als Knickspannung aufnehmen können. ->siehe Skizze!!

$$\Delta l_R - \Delta l_M = \Delta l'_R + \Delta l'_M$$

$$\alpha_R \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchM}} = \frac{F_R \cdot l_0}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{F_M \cdot l_0}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}$$

$$\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}} = \frac{F_R}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{F_M}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}$$

mit

$$F_R = F_M$$

wird

$$\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}} = F_R \cdot \left( \frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}} \right)$$

somit

$$F_{\text{Rohr}} = \frac{\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}}}{\frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}}$$

Wenn  $F_{\text{Rohr}}$  kleiner  $F_{\text{Knick}}$  muss nicht auf elastische Knickung überprüft werden

$$F_{\text{Rohr}} \leq F_{\text{Knick}}$$

mit

$$F_{\text{Knick}} = \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{min}}}{l_{\text{Knick}}^2} \quad \text{Knickkraft } F_{\text{Knick}}$$

$$I_{\text{min}} := \frac{\pi \cdot (d_{\text{aRohr}}^4 - d_{\text{iRohr}}^4)}{64} \quad I_{\text{min}} = 9628.196 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Flächenmoment 2.Grades}$$

$$\alpha_{\text{Stahl}} := 11.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient } \alpha_{\text{stahl}}$$

$$\alpha_R := \alpha_{\text{Stahl}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient Rohr}$$

$$\alpha_M := \alpha_{\text{Stahl}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient Mantel}$$



$$E_{\text{Stahl}} := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Elastizitätsmodul Stahl

$$E_{\text{Rohr}} := E_{\text{Stahl}}$$

Elastizitätsmodul Stahl bei Rohren

$$E_{\text{Mantel}} := E_{\text{Stahl}}$$

Elastizitätsmodul Stahl Mantelrohr

$$A_{\text{Rohr}} := \pi \cdot \frac{(d_{\text{aRohr}}^2 - d_{\text{iRohr}}^2)}{4}$$

$$A_{\text{Rohr}} = 144.51 \cdot \text{mm}^2$$

Querschnittsfläche Rohr

$$A_{\text{Mantel}} := \pi \cdot \frac{(d_{\text{aMantel}}^2 - d_{\text{iMantel}}^2)}{4}$$

$$A_{\text{Mantel}} = 20231.86 \cdot \text{mm}^2$$

Querschnittsfläche Mantel

$$I_{\text{Knick}} := I_{\text{Rohr}}$$

Kraft welche durch die Dehnung hervorgerufen wird

$$F_{\text{R}} := \frac{\alpha_{\text{R}} \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_{\text{M}} \cdot \zeta_{\text{durchM}}}{\frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}}$$

$$F_{\text{R}} = -20.544 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{Knick}} := \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{min}}}{l_{\text{Knick}}^2}$$

$$F_{\text{Knick}} = 354.766 \cdot \text{N}$$

Rohr := wenn( $F_{\text{R}} < 0$ , "wird auf Zug beansprucht" , "wird auf Druck beansprucht")

Knickrechnung := wenn( $F_{\text{R}} > F_{\text{Knick}}$ , "Berücksichtigung erforderlich" , "nicht erforderlich")

Rohr = "wird auf Zug beansprucht"

Knickrechnung = "nicht erforderlich"

Anmerkung: Da die durchschnittliche Manteltemperatur höher als die durchschn. Rohrtemperatur ist, konnte die Kicung der Rohre ausgeschlossen werden!!

### Erforderlicher Rohrdurchmesser Dampfeintritt

aus der Kontinuitätsgleichung folgt:

$$V = c \cdot A \quad \text{oder} \quad m = c \cdot A \cdot \rho$$

somit wird

$$m_{\text{Mantel}} = c_{\text{Sattdampf}} \cdot \frac{d_{\text{iFlanschME}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_{\text{Sattdampf}}$$

$$\rho_{\text{Sattdampf}} := 0.7001 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte Sattdampf lt. Bertsch

### Richtgeschwindigkeit des Sattdampfes lt. Unterlage EUTG Kap.2

$$p_{\text{dynmax}} := 1220 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{max. zulässiger dynamischer Druck bei Siedetemperatur}$$

dynamischer Druck errechnet sich aus

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho_{\text{Sattdampf}} \cdot c_{\text{Sattdampf}}^2}{2}$$

$$c_{\text{Sattdampfmax}} := \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{dynmax}}}{\rho_{\text{Sattdampf}}}}$$

$$c_{\text{Sattdampfmax}} = 59.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{Sattdampf}} := 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

gewählte Richtgeschwindigkeit des Sattdampfes

$$d_{\text{iFlanschME}} := \sqrt{\frac{4 \cdot m_{\text{Mantel}}}{\pi \cdot c_{\text{Sattdampf}} \cdot \rho_{\text{Sattdampf}}}}$$

$$d_{\text{iFlanschME}} = 586.109 \cdot \text{mm}$$

erforderlicher Innendurchmesser des Flansches

Gewählt wird ein nahtloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN600 / PN 16

$$s_{\text{FlanschME}} := 8.8 \text{mm}$$

$$d_{\text{iFlanschME}} := 592.4 \text{mm}$$

$$d_{\text{aFlanschME}} := d_{\text{iFlanschME}} + 2 \cdot s_{\text{FlanschME}}$$

$$d_{\text{aFlanschME}} = 610 \cdot \text{mm}$$

### Erforderlicher Flanschdurchmesser Kondensataustritt

aus der Kontinuitätsgleichung folgt:

$$V = c \cdot A \quad \text{oder} \quad m = c \cdot A \cdot \rho$$

somit wird

$$m_{\text{Mantel}} = c_{\text{Kondensat}} \cdot \frac{d_{\text{iFlanschMA}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_{\text{Kondensat}}$$

$$\rho_{\text{Kondensat}} := 955.4475 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Kondensat lt. Bertsch}$$

$$c_{\text{Kondensat}} := 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{gewählte Richtgeschwindigkeit des Kondensats}$$

$$d_{\text{iFlanschMA}} := \sqrt{\frac{4 \cdot m_{\text{Mantel}}}{\pi \cdot c_{\text{Kondensat}} \cdot \rho_{\text{Kondensat}}}}$$

$$d_{\text{iFlanschMA}} = 91.6 \text{ mm} \quad \text{erforderlicher Innendurchmesser des Flansches}$$

$$d_{\text{iFlanschgewMA}} := 106.3 \text{ mm} \quad \text{gewählter Innendurchmesser Flansch lt. EN 1092-1}$$

Vergleich Reynoldszahl errechnet mit gewählter und erforderl. Innendurchmesser Flansch

$$\nu_{\zeta\text{HA}} := 0.2829 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Kinematische Viskosität des Wassers bei } \zeta_{\text{ausH}}$$

$$\text{Re}_{\text{vorh}} := \frac{c_{\text{Kondensat}} \cdot d_{\text{iFlanschMA}}}{\nu_{\zeta\text{HA}}} \quad \text{Re}_{\text{vorh}} = 4.857 \times 10^5$$

$$\text{Re}_{\text{vorh}} := \frac{c_{\text{Kondensat}} \cdot d_{\text{iFlanschgewMA}}}{\nu_{\zeta\text{HA}}} \quad \text{Re}_{\text{vorh}} = 5.636 \times 10^5$$

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN100 / PN 64

$$s_{\text{FlanschMA}} := 4 \text{ mm}$$

$$d_{\text{iFlanschMA}} := 106.3 \text{ mm}$$

$$d_{\text{aFlanschMA}} := d_{\text{iFlanschMA}} + 2 \cdot s_{\text{FlanschMA}} \quad d_{\text{aFlanschMA}} = 114.3 \text{ mm}$$

## Zusammenfassung Flanschrating Mantelseite

### Dampfeintritt

$$c_{\text{Sattdampfmax}} = 59.036 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{max zulässige Sattdampfgeschwindigkeit}$$

$$c_{\text{Sattdampf}} := 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{gewählte Richtgeschwindigkeit des Sattdampfes}$$

$$d_{\text{iFlanschME}} = 586.109 \cdot \text{mm} \quad \text{erforderlicher Innendurchmesser des Flansches}$$

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN600 / PN 16

$$s_{\text{FlanschME}} := 8.8 \text{mm} \quad \text{Wandstärke Flansch}$$

$$d_{\text{iFlanschME}} := 592.4 \text{mm} \quad \text{Innendurchmesser Flansch Dampfeintritt}$$

$$d_{\text{aFlanschME}} = 610 \cdot \text{mm} \quad \text{Aussendurchmesser Flansch Dampfeintritt}$$

### Kondensataustritt

$$c_{\text{Kondensat}} := 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{gewählte Richtgeschwindigkeit des Kondensats}$$

$$d_{\text{iFlanschMA}} = 91.6 \cdot \text{mm} \quad \text{erforderlicher Innendurchmesser des Flansches}$$

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN100 / PN 64

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

$$d_{\text{iFlanschMA}} := 106.3 \text{mm} \quad \text{Innendurchmesser Flansch Dampfeintritt}$$

$$d_{\text{aFlanschMA}} = 114.3 \cdot \text{mm} \quad \text{Aussendurchmesser Flansch Dampfeintritt}$$

Erforderlicher Flanschdurchmesser am Kühlwassereintritt

aus der Kontinuitätsgleichung folgt:

$$V = c \cdot A \quad \text{oder} \quad m = c \cdot A \cdot \rho$$

somit wird

$$m_{\text{Rohr}} = c_{\text{Kühlmedium}} \cdot \frac{d_{\text{iStutzenKE}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}}$$

$$\rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}} := 998.4341 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Kühlmedium lt. Bertsch bei } \zeta_{\text{einK}}$$

$$c_{\text{Kühlmedium}} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{gewählte Richtgeschwindigkeit des Kühlmedium}$$

$$d_{\text{iStutzenKEerf}} := \sqrt{\frac{4 \cdot m_{\text{Rohr}}}{\pi \cdot c_{\text{Kühlmedium}} \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}}}}$$

$$d_{\text{iStutzenKEerf}} = 289.058 \text{ mm} \quad \text{erforderlicher Innendurchmesser des Rohres}$$

$$d_{\text{iStutzenKE}} := 307.9 \text{ mm} \quad \text{gewählter Innendurchmesser Rohr lt. EN 1092-1}$$

$$c_{\text{vorhKEin}} := \frac{4 \cdot m_{\text{Rohr}}}{d_{\text{iStutzenKE}}^2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}}}$$

$$c_{\text{vorhKEin}} = 1.234 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{vorhandene Rohrgeschwindigkeit am Stutzen}$$

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN300 / PN 25

$$s_{\text{StutzenKE}} := 8 \text{ mm}$$

$$d_{\text{iStutzenKE}} = 307.9 \text{ mm}$$

$$d_{\text{aStutzenKE}} := d_{\text{iStutzenKE}} + 2 \cdot s_{\text{StutzenKE}} \quad d_{\text{aStutzenKE}} = 323.9 \text{ mm}$$

Erforderlicher Flanschdurchmesser am Kühlwasseraustritt

aus der Kontinuitätsgleichung folgt:

$$V = c \cdot A \quad \text{oder} \quad m = c \cdot A \cdot \rho$$

somit wird

$$m_{\text{Rohr}} = c_{\text{Kühlmedium}} \cdot \frac{d_{\text{iStutzenKA}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}}$$

$$\rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}} := 974.8316 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Dichte Kühlmedium lt. Bertsch bei } \zeta_{\text{ausK}}$$

$$c_{\text{Kühlmedium}} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{gewählte Richtgeschwindigkeit des Kühlmedium}$$

$$d_{\text{iStutzenKAerf}} := \sqrt{\frac{4 \cdot m_{\text{Rohr}}}{\pi \cdot c_{\text{Kühlmedium}} \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}}}}$$

$$d_{\text{iStutzenKAerf}} = 292.537 \cdot \text{mm} \quad \text{erforderlicher Innendurchmesser des Rohres}$$

$$d_{\text{iStutzenKA}} := 307.9 \text{mm} \quad \text{gewählter Innendurchmesser Rohr lt. EN 1092-1}$$

$$c_{\text{vorhKAus}} := \frac{4 \cdot m_{\text{Rohr}}}{d_{\text{iStutzenKA}}^2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}}}$$

$$c_{\text{vorhKAus}} = 1.264 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{vorhandene Rohrgeschwindigkeit am Stutzen}$$

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN300 / PN 25

$$s_{\text{StutzenKA}} := 8 \text{mm}$$

$$d_{\text{iStutzenKA}} = 307.9 \cdot \text{mm}$$

$$d_{\text{aStutzenKA}} := d_{\text{iStutzenKA}} + 2 \cdot s_{\text{StutzenKA}} \quad d_{\text{aStutzenKA}} = 323.9 \cdot \text{mm}$$

## Zusammenfassung Flanschrating Rohrseite

### Kühlmitteleintritt

$$\rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}} := 998.4341 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte Kühlmedium lt. Bertsch bei  $\zeta_{\text{einK}}$

$$c_{\text{Kühlmedium}} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

gewählte Richtgeschwindigkeit des Kühlmedium

$$d_{\text{iStutzenKEerf}} = 289.058 \cdot \text{mm}$$

erforderlicher Innendurchmesser des Rohres

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN300 / PN 25

$$s_{\text{StutzenKE}} := 8 \text{ mm}$$

$$d_{\text{iStutzenKE}} = 307.9 \cdot \text{mm}$$

$$d_{\text{aStutzenKE}} := d_{\text{iStutzenKE}} + 2 \cdot s_{\text{StutzenKE}}$$

$$d_{\text{aStutzenKE}} = 323.9 \cdot \text{mm}$$

### Kühlmittelaustritt

$$\rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}} := 974.8316 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte Kühlmedium lt. Bertsch bei  $\zeta_{\text{ausK}}$

$$c_{\text{Kühlmedium}} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

gewählte Richtgeschwindigkeit des Kühlmedium

$$d_{\text{iStutzenKAerf}} = 292.537 \cdot \text{mm}$$

erforderlicher Innendurchmesser des Rohres

Gewählt wird ein nathloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN300 / PN 25

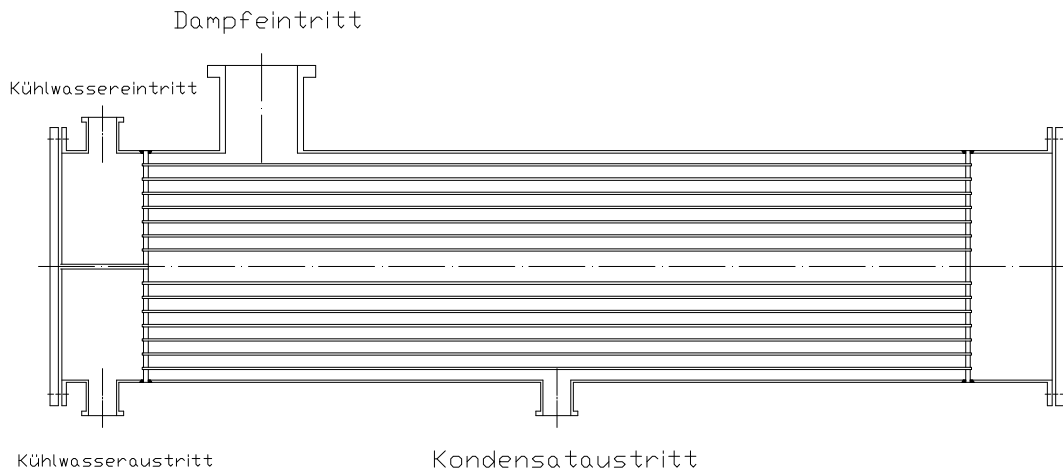
$$s_{\text{StutzenKA}} := 8 \text{ mm}$$

$$d_{\text{iStutzenKA}} = 307.9 \cdot \text{mm}$$

$$d_{\text{aStutzenKA}} := d_{\text{iStutzenKA}} + 2 \cdot s_{\text{StutzenKA}}$$

$$d_{\text{aStutzenKA}} = 323.9 \cdot \text{mm}$$

## Berechnung des rohrseitigen Druckverlustes



Grundsätzlich gilt für den Rohrverlust

$$\Delta p_{\text{ges}} = \sum_{n=1}^i \Delta p_i$$

Die einzel Rohrverluste lassen sich grundsätzlich mit

$$\Delta p_i = \zeta_i \cdot \rho_{\text{Medium}} \cdot \frac{w_i^2}{2}$$

$\zeta_i$	...	Druckverlustkoeffizient
$\rho_{\text{Medium}}$	...	Dichte des Mediums
$w_i$	...	Rohrgeschwindigkeit

ermitteln.

Ich lege folgende Berechnungspunkte fest:

$\Delta p_1$	...	Eintritt Kühlmittelstutzen
$\Delta p_2$	...	Rohreintritt
$\Delta p_3$	...	im Rohr
$\Delta p_4$	...	Rohraustritt
$\Delta p_5$	...	Umlenkung
$\Delta p_6$	...	Rohreintritt
$\Delta p_7$	...	Rohraustritt
$\Delta p_8$	...	Austritt Kühlmittelstutzen



### Druckverlust $\Delta p_1$

$$\Delta p_1 = \zeta_1 \cdot \rho_{\text{Medium1}} \cdot \frac{w_1^2}{2}$$

$$\zeta_1 := 0.5$$

$$w_1 := c_{\text{vorhKEin}} \quad w_1 = 1.234 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_1$  am Stutzeintritt

Rohrgeschwindigkeit am Stutzeintritt

$$\Delta p_1 := \zeta_1 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}} \cdot \frac{w_1^2}{2}$$

$$\Delta p_1 = 380.032 \text{ Pa}$$

### Druckverlust $\Delta p_2$

$$\Delta p_2 = \zeta_2 \cdot \rho_{\text{Medium2}} \cdot \frac{w_2^2}{2}$$

$$\frac{p_x}{d_{\text{iRohr}}} = 0.762$$

Verhältnis Teilung X zu  $d_{\text{iRohr}}$

$$\zeta_2 := 0.1$$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_2$  am Rohreintritt

$$w_2 := c_{\text{vorhKEin}} \quad w_2 = 1.234 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rohrgeschwindigkeit am Rohreintritt

$$\Delta p_2 := \zeta_2 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{einK}} \cdot \frac{w_2^2}{2}$$

$$\Delta p_2 = 76.006 \text{ Pa}$$

### Druckverlust $\Delta p_3$

$$\rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{mK}} := 989.2837 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte Kühlmittel bei  $\zeta_{\text{mK}}$

$$Re_{\text{vorh}} = 563627$$

vorhandene Reynoldszahl  $Re$  im Rohr

$$K_{\text{Rohr}} := 0.3 \text{ mm}$$

Rauhigkeitswert Rohr leicht verrostet

$$\varepsilon := \frac{K_{\text{Rohr}}}{d_{\text{iRohr}}} \quad \varepsilon = 0.014286$$

Rauhigkeitsverhältnis  $\varepsilon$

$$\xi_3 := 0.044$$

Druckverlustzahl  $\xi$  im Rohr

$$\zeta_3 := \xi_3 \cdot \frac{l_{\text{Rohr}}}{d_{\text{iRohr}}} \quad \zeta_3 = 15.714$$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_3$  im Rohr

$$w_3 := c_{\text{realK}} \quad w_1 = 1.234 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rohrgeschwindigkeit im Rohr

$$\Delta p_3 := \zeta_3 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{mK}} \cdot \frac{w_3^2}{2}$$

$$\Delta p_3 = 17015.316 \text{ Pa}$$

Druckverlust  $\Delta p_4$

$$\Delta p_4 = \zeta_4 \cdot \rho_{\text{Medium4}} \cdot \frac{w_4^2}{2}$$

$$\frac{p_x}{d_{i\text{Rohr}}} = 0.762$$

$$\zeta_4 := 0.1$$

$$w_4 := c_{\text{realK}} \quad w_4 = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta p_4 := \zeta_4 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{mK} \cdot \frac{w_4^2}{2}$$

$$\Delta p_2 = 76.006 \text{ Pa}$$

Verhältnis Teilung X zu  $d_{i\text{Rohr}}$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_2$  am Rohraustritt

Rohrgeschwindigkeit am Rohraustritt

Druckverlust  $\Delta p_5$

$$\Delta p_5 = \zeta_5 \cdot \rho_{\text{Medium5}} \cdot \frac{w_5^2}{2}$$

$$\frac{p_x}{d_{i\text{Rohr}}} = 0.762$$

$$r_{m\text{Umlenkung}} := 325 \text{ mm}$$

$$\frac{r_{m\text{Umlenkung}}}{d_{i\text{Rohr}}} = 15.476$$

$$\zeta_5 := 0.2$$

$$w_5 := c_{\text{realK}} \quad w_5 = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta p_5 := \zeta_5 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{mK} \cdot \frac{w_5^2}{2}$$

$$\Delta p_5 = 216.559 \text{ Pa}$$

Verhältnis Teilung X zu  $d_{i\text{Rohr}}$

mittlerer Umlenkradius

Verhältnis Teilung X zu  $d_{i\text{Rohr}}$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_5$  an Rohrumlenkung

Rohrgeschwindigkeit an Rohrumlenkung

### Druckverlust $\Delta p_6$

$$\Delta p_6 = \zeta_6 \cdot \rho_{\text{Medium}6} \cdot \frac{w_6^2}{2}$$

$$\frac{p_x}{d_{\text{iRohr}}} = 0.762$$

$$\zeta_6 := 0.1$$

$$w_6 := c_{\text{realK}} \quad w_6 = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Verhältnis Teilung X zu  $d_{\text{iRohr}}$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_6$  am Rohreintritt

Rohrgeschwindigkeit am Rohreintritt

$$\Delta p_6 := \zeta_6 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{mK}} \cdot \frac{w_6^2}{2}$$

$$\Delta p_6 = 108.279 \text{ Pa}$$

### Druckverlust $\Delta p_7$

$$\Delta p_7 = \zeta_7 \cdot \rho_{\text{Medium}7} \cdot \frac{w_7^2}{2}$$

$$\frac{p_x}{d_{\text{iRohr}}} = 0.762$$

$$\zeta_7 := 0.1$$

$$w_7 := c_{\text{realK}} \quad w_7 = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Verhältnis Teilung X zu  $d_{\text{iRohr}}$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_2$  am Rohraustritt

Rohrgeschwindigkeit am Rohraustritt

$$\Delta p_7 := \zeta_7 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{mK}} \cdot \frac{w_7^2}{2}$$

$$\Delta p_7 = 108.279 \text{ Pa}$$

### Druckverlust $\Delta p_8$

$$\Delta p_8 = \zeta_8 \cdot \rho_{\text{Medium}8} \cdot \frac{w_8^2}{2}$$

$$\zeta_8 := 0.5$$

$$w_8 := c_{\text{vorhKAus}} \quad w_8 = 1.264 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Druckverlustkoeffizient  $\zeta_1$  am Stutzenaustritt

Rohrgeschwindigkeit am Stutzenaustritt

$$\Delta p_8 := \zeta_8 \cdot \rho_{\text{Kühlmedium}} \zeta_{\text{ausK}} \cdot \frac{w_8^2}{2}$$

$$\Delta p_8 = 389.233 \text{ Pa}$$

Gesamtdruckverlust  $\Delta p_{ges}$

$$\Delta p_{ges} := \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 + \Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8$$

$$\Delta p_{ges} = 0.184 \cdot \text{bar}$$

$$\Delta p_{zul} := 0.2 \text{bar}$$

zulässiger Druckverlust lt. Angabe

Druckverlust := wenn( $\Delta p_{ges} < \Delta p_{zul}$ , "zulässig", "nicht zulässig")

Druckverlust = "zulässig"

Auslegung der Prallplatte am Eintritt Dampfstutzen:

Soll die Richtgeschwindigkeit von  $c_{\text{sollDampf}}$  beim Umlenklech nicht überschritten werden so muss lt. Kontinuitätsgesetz bei gleichem Durchsatz und gleicher Geschwindigkeit die Querschnittsfläche ebenfalls gleich sein.

Da heißt dass die Querschnittsfläche im Einlaufrohr gleich der Querschnittsfläche bei der durchströmten Stelle am Umlenklech sein muss.

Es gilt:

$$A_{\text{erf}} := \frac{d_{\text{iFlanschME}}^2 \cdot \pi}{4} \quad A_{\text{erf}} = 0.276 \text{m}^2 \quad \text{erforderliche Querschnittsfläche}$$

für die Engstelle am Umlenklech gilt:

$$A_{\text{erf}} = d_{\text{iFlanschME}} \cdot \pi \cdot h_{\text{erf}}$$

$$h_{\text{erf}} := \frac{A_{\text{erf}}}{d_{\text{iFlanschME}} \cdot \pi} \quad h_{\text{erf}} = 0.148 \text{m} \quad \text{erforderlicher Abstand zum Mantelrohr}$$

somit ist der Konstruktionsradius am Umlenklech

$$r_{\text{umlenk}} := \frac{d_{\text{iMantel}}}{2} - h_{\text{erf}} \quad r_{\text{umlenk}} = 250.4 \text{mm} \quad \text{Konstruktionsradius}$$

Da dieser Konstruktionsradius zu groß ist, kann ich nicht die geforderte Menge an Rohren verbauen!!

Nach Rücksprache mit Prof. Hametner und gemeinsamer Beurteilung der Fertigungskosten, habe ich mich für die kostengünstigere Lösung des Problems entschieden, und fertige aus einen nahtlosen Stahlrohr nach EN 1092-1.

Gewählt wird ein nahtloses Stahlrohr nach EN 1092-1: Werkstoffgruppe 3E1 ergibt P280GH

gewählt DN1000 / PN 10

$$s_{\text{Mantel}} := 10 \text{mm}$$

$$d_{\text{iMantel}} := 996 \text{mm}$$

$$d_{\text{aMantel}} := d_{\text{iMantel}} + 2 \cdot s_{\text{Mantel}} \quad d_{\text{aMantel}} = 1016 \text{mm}$$

Weitere konstruktiv relevante Maße

Mindestabstand von Rohrhalter lt. TEMA BlattN-3  $l_{\text{min}}=15,9 \text{mm}$

Mindestspalt zur Aussenwand lt. TEMA Blatt 6,4mm

maximal Abstand <Rohrhalter zu Rohrhalter = 1880mm

Mindestanzahl der Ankerschrauben 8stück

Mindestdurchmesser 12,6mm --> M16

Anordnung Stutzen mittig Mantel  
Ablauf Kondensat seitlich -->

## Festigkeitsberechnung

### Berechnung der erforderlichen Teilung $p_{Rohr}$

$d_{aRohr} = 25 \cdot \text{mm}$  Aussendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$d_{iRohr} = 21 \cdot \text{mm}$  Innendurchmesser Rohr im Tauscherbündel

$p_{\min} := 1.25 \cdot d_{aRohr}$   $p_{\min} = 31.25 \cdot \text{mm}$  Mindestteilung des Rohrbündels

$p_{\text{gewählt}} := 32 \text{mm}$   $p_{\text{gewählt}} = 32 \cdot \text{mm}$  Gewählte Teilung

$p_y := \sqrt{p_{\text{gewählt}}^2 - \left(\frac{p_{\text{gewählt}}}{2}\right)^2}$   $p_y = 27.713 \cdot \text{mm}$  Teilung in y-Richtung

$p_x := \frac{p_{\text{gewählt}}}{2}$   $p_x = 16 \cdot \text{mm}$  Teilung in x-Richtung

### Abschätzung Rohrbodenwandstärke

$s_{\text{erf}} = 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{nenn}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{P265GH}}} + c_1 + c_2$  lt. AD 2000

$d_{2\text{vorhanden}} := 190.6 \text{mm}$

$p_{\text{nenn}} := 10 \text{bar}$  Berechnungsdruck

$S_{\text{sicher}} := 1.5$  Sicherheitsfaktor

$c_1 := 0 \text{mm}$  Zuschlag für Fertigungstoleranzen

$c_2 := 1 \text{mm}$  Zuschlag für Abnutzung

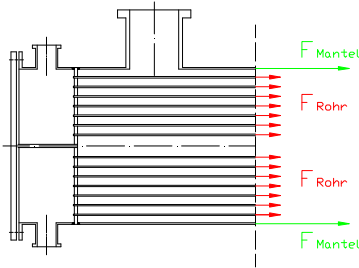
$K_{P265GH} := 205 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  Festigkeitswerte für P265GH

$s_{\text{erf}} := 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{nenn}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{P265GH}}} + c_1 + c_2$   $s_{\text{erf}} = 7.522 \cdot \text{mm}$

$s_{\text{gewählt}} := 50 \text{mm}$  K

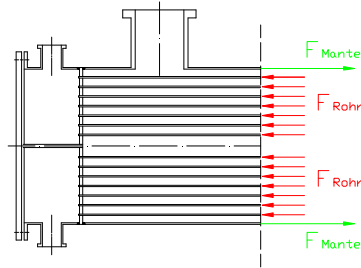
## Knicknachweis

Mantel heißer als Rohre



Rohre werden auf Zug beansprucht, keine Knickgefahr!!

Rohre heißer als Mantel



Rohre werden auf Druck beansprucht, große Knickgefahr!!

$$\zeta_{\text{einK}} = 293.15 \text{ K}$$

Eintrittstemperatur Kühlmedium  $\zeta_{\text{einK}}$

$$\zeta_{\text{ausK}} = 348.561 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Kühlmedium  $\zeta_{\text{ausK}}$

$$\zeta_{\text{einH}} = 379.15 \text{ K}$$

Eintrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{einH}}$

$$\zeta_{\text{ausH}} = 377.15 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Heizmedium  $\zeta_{\text{ausH}}$

Errechnen der durchschnittlichen Rohrtemperaturen

$$\zeta_{\text{durchM}} := \frac{\zeta_{\text{einH}} + \zeta_{\text{ausH}}}{2}$$

$$\zeta_{\text{durchM}} = 105.0^\circ\text{C}$$

Durchschnittliche Manteltemperatur

$$\zeta_{\text{durchR}} := \frac{\zeta_{\text{einK}} + \zeta_{\text{ausK}}}{2}$$

$$\zeta_{\text{durchR}} = 47.706^\circ\text{C}$$

Durchschnittliche Rohrtemperatur

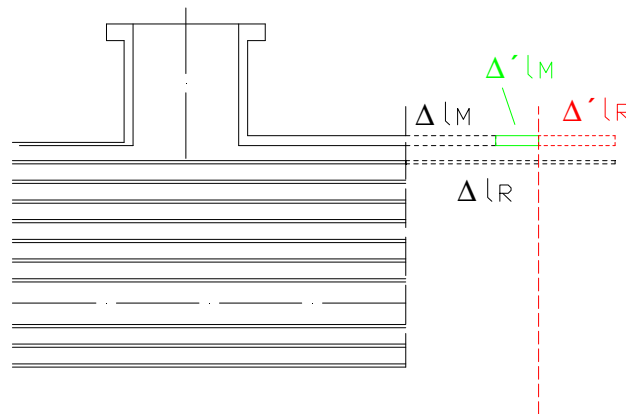
das Hooksche Gesetz besagt

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{bzw.} \quad \sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E$$

$$\text{bzw.} \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

Daraus folgt

$$\frac{F}{A} = \frac{\Delta l}{l} \cdot E \quad \Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$$



für die Differenzlängen gilt ebenso

$$\Delta l_R = \alpha_R \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchR}}$$

Differenzlänge, hervorgerufen durch die Wärmedehnung

$$\Delta l_M = \alpha_M \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchM}}$$

Differenzlänge, hervorgerufen durch die Wärmedehnung

Die Spannung in den Rohren erweitert die Länge des Mantels zusätzlich mit  $\Delta l'_M$ , daher muss das Rohr die Länge  $\Delta l'_R$  als Knickspannung aufnehmen können. ->siehe Skizze!!

$$\Delta l_R - \Delta l_M = \Delta l'_R + \Delta l'_M$$

$$\alpha_R \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot l_0 \cdot \zeta_{\text{durchM}} = \frac{F_R \cdot l_0}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{F_M \cdot l_0}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}$$

$$\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}} = \frac{F_R}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{F_M}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}$$

mit

$$F_R = F_M$$

wird

$$\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}} = F_R \cdot \left( \frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}} \right)$$

somit

$$F_{\text{Rohr}} = \frac{\alpha_R \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_M \cdot \zeta_{\text{durchM}}}{\frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}}$$

Wenn  $F_{\text{Rohr}}$  kleiner  $F_{\text{Knick}}$  muss nicht auf elastische Knickung überprüft werden

$$F_{\text{Rohr}} \leq F_{\text{Knick}}$$

mit

$$F_{\text{Knick}} = \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{min}}}{l_{\text{Knick}}^2} \quad \text{Knickkraft } F_{\text{Knick}}$$

$$I_{\text{min}} := \frac{\pi \cdot (d_{\text{aRohr}}^4 - d_{\text{iRohr}}^4)}{64} \quad I_{\text{min}} = 9628.196 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Flächenmoment 2.Grades}$$

$$\alpha_{\text{Stahl}} := 11.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient } \alpha_{\text{stahl}}$$

$$\alpha_R := \alpha_{\text{Stahl}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient Rohr}$$

$$\alpha_M := \alpha_{\text{Stahl}} \quad \text{Längenausdehnungskoeffizient Mantel}$$



$$E_{\text{Stahl}} := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Elastizitätsmodul Stahl

$$E_{\text{Rohr}} := E_{\text{Stahl}}$$

Elastizitätsmodul Stahl bei Rohren

$$E_{\text{Mantel}} := E_{\text{Stahl}}$$

Elastizitätsmodul Stahl Mantelrohr

$$A_{\text{Rohr}} := \pi \cdot \frac{(d_{\text{aRohr}}^2 - d_{\text{iRohr}}^2)}{4}$$

$$A_{\text{Rohr}} = 144.51 \cdot \text{mm}^2$$

Querschnittsfläche Rohr

$$A_{\text{Mantel}} := \pi \cdot \frac{(d_{\text{aMantel}}^2 - d_{\text{iMantel}}^2)}{4}$$

$$A_{\text{Mantel}} = 31604.42 \cdot \text{mm}^2$$

Querschnittfläche Mantel

$$I_{\text{Knick}} := I_{\text{Rohr}}$$

Kraft welche durch die Dehnung hervorgerufen wird

$$F_{\text{R}} := \frac{\alpha_{\text{R}} \cdot \zeta_{\text{durchR}} - \alpha_{\text{M}} \cdot \zeta_{\text{durchM}}}{\frac{1}{E_{\text{Rohr}} \cdot A_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{E_{\text{Mantel}} \cdot A_{\text{Mantel}}}}$$

$$F_{\text{R}} = -20.597 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{Knick}} := \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{min}}}{I_{\text{Knick}}^2}$$

$$F_{\text{Knick}} = 354.766 \cdot \text{N}$$

Rohr := wenn( $F_{\text{R}} < 0$ , "wird auf Zug beansprucht" , "wird auf Druck beansprucht")

Knickrechnung := wenn( $F_{\text{R}} > F_{\text{Knick}}$ , "Berücksichtigung erforderlich" , "nicht erforderlich")

Rohr = "wird auf Zug beansprucht"

Knickrechnung = "nicht erforderlich"

Anmerkung: Da die durchschnittliche Manteltemperatur höher als die durchschn. Rohrtemperatur ist, konnte die Kicung der Rohre ausgeschlossen werden!!

### Mindestwandstärke Rohrwand

$$s_{\text{Rohrmin}} = \frac{d_{\text{aMantel}} \cdot P_{\text{berechnung}}}{2 \cdot \frac{K_{\text{P265GH}}}{S_{\text{sicher}}} \cdot V_{\text{schweiß}} + P_{\text{berechnung}}} + c_1 + c_2$$

$P_{\text{berechnung}} := 10 \text{ bar}$  Berechnungsdruck lt. Angabe

$V_{\text{schweiß}} := 0.85$  Schweißqualitätsziffer

$$s_{\text{Rohrmin}} := \frac{d_{\text{aMantel}} \cdot P_{\text{berechnung}}}{2 \cdot \frac{K_{\text{P265GH}}}{S_{\text{sicher}}} \cdot V_{\text{schweiß}} + P_{\text{berechnung}}} + c_1 + c_2 \quad s_{\text{Rohrmin}} = 5.354 \text{ mm}$$

Vorhandene Wandstärke am Rohrmantel sind 10mm!!

### Mindestwandstärke Flanschdeckel

$$s_{\text{Plattemin}} = C_1 \cdot d_{\text{Dicht}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{berechnung}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{\text{P265GH}}}} + c_1 + c_2 \quad \text{aus KU-Skript}$$

mit  $C_1$  aus Tabelle

$h_{\text{dicht}} := 5 \text{ mm}$  Dichtungshöhe

$b_{\text{dicht}} := 8 \cdot h_{\text{dicht}}$  Dichtungsbreite

$b_0 := b_{\text{dicht}}$

$k_1 := 1.1 \cdot b_0$  Anwendungsfaktor

$S_{\text{dicht}} := 1.2$  Sicherheit

$d_{\text{dicht}} := d_{\text{iMantel}} + b_{\text{dicht}}$  Nut für Wegigkeitsblech 5mm tief!!

$\delta := 1 + 4 \cdot \frac{k_1 \cdot S_{\text{dicht}}}{d_{\text{dicht}}}$   $\delta = 1.204$  Kennzahl  $\delta$

$C_1 := 0.525$  aus Bild 5 siehe Skript

$$s_{\text{Plattemin}} := C_1 \cdot d_{\text{dicht}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{berechnung}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{\text{P265GH}}}} + c_1 + c_2$$

$$s_{\text{Plattenmin}} = 47.525 \cdot \text{mm}$$

vorhandene Flanschdicke ist ausreichend!!

### Abschätzung Rohrbodenwandstärke

$$s_{\text{erf}} = 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{nenn}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{\text{P265GH}}}} + c_1 + c_2 \quad \text{lt. AD 2000}$$

$$d_{2\text{vorhanden}} := 190.6 \text{mm}$$

vorhandener größter einschreibbarer Durchmesser

$$p_{\text{nenn}} := 10 \text{bar} \quad \text{Berechnungsdruck}$$

$$S_{\text{sicher}} := 1.5 \quad \text{Sicherheitsfaktor}$$

$$c_1 := 0 \text{mm} \quad \text{Zuschlag für Fertigungstoleranzen}$$

$$c_2 := 1 \text{mm} \quad \text{Zuschlag für Abnutzung}$$

$$K_{\text{P265GH}} := 205 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Festigkeitswerte für P265GH}$$

$$s_{\text{erf}} := 0.4 \cdot d_{2\text{vorhanden}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{berechnung}} \cdot S_{\text{sicher}}}{1 \cdot K_{\text{P265GH}}}} + c_1 + c_2 \quad s_{\text{erf}} = 7.522 \cdot \text{mm}$$

$$s_{\text{gewählt}} := 50 \text{mm}$$

K

### Überprüfung ob Stutzenverstärkung notwendig ist

Nach Rücksprache mit Professor Hametner muss nur Dampfstutzen überprüft werden.

$$s_{\text{Mantel}} = 10 \cdot \text{mm} \quad \text{Rohrwand am Mantelrohr}$$

$$s_a := s_{\text{Mantel}} + c_1 + c_2 = 11 \cdot \text{mm} \quad \text{mit Berücksichtigung der Korrosionszuschläge}$$

$$b := \sqrt{(d_{i\text{Mantel}} + s_a - c_1 - c_2) \cdot (s_a - c_1 - c_2)} = 100.3 \cdot \text{mm} \quad \text{mitragende Länge b}$$

$$s_{\text{FlanschME}} = 8.8 \cdot \text{mm}$$

Wandstärke Dampfstutzen

$$s_s := s_{\text{FlanschME}} + c_1 + c_2$$

$$s_s = 9.8 \cdot \text{mm}$$

$$l_s := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{i\text{FlanschME}} + s_s - c_1 - c_2) \cdot (s_s - c_1 - c_2)}$$

$$l_s = 90.92 \cdot \text{mm}$$

$$A_{\sigma 0} := (b + s_s - c_1 - c_2) \cdot (s_a - c_1 - c_2)$$

$$A_{\sigma 0} = 1090.996 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\sigma 1} := l_s \cdot (s_s - c_1 - c_2)$$

$$A_{\sigma 1} = 8.001 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^2$$

$$A_p := \left( b + s_s - c_1 - c_2 + \frac{d_{i\text{FlanschME}}}{2} \right) \cdot d_{i\text{Mantel}} \quad A_p = 0.404 \text{ m}^2$$

Voraussetzung, dass Stutzen nicht verstärkt werden muss ist, dass  $A_p \cdot p < A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1}$

$$\left( \frac{K_{P265GH}}{S_{\text{sicher}}} - \frac{P_{\text{berechnung}}}{2} \right) \cdot A_{\sigma 0} + \left( \frac{K_{P265GH}}{S_{\text{sicher}}} - \frac{P_{\text{berechnung}}}{2} \right) \cdot A_{\sigma 1} = 2.575 \times 10^5 \text{ N}$$

$$P_{\text{berechnung}} \cdot A_p = 4.037 \times 10^5 \text{ N}$$

Da die Voraussetzung nicht gegeben ist muss eine Verstärkung am Dampfstutzen vorgesehen werden.

### erforderliche Flanschverstärkung

$$A_{\sigma 2} := \frac{P_{\text{berechnung}} \cdot A_p - \left( \frac{K_{P265GH}}{S_{\text{sicher}}} - \frac{P_{\text{berechnung}}}{2} \right) \cdot A_{\sigma 0} - \left( \frac{K_{P265GH}}{S_{\text{sicher}}} - \frac{P_{\text{berechnung}}}{2} \right) \cdot A_{\sigma 1}}{\left( \frac{K_{P265GH}}{S_{\text{sicher}}} - \frac{P_{\text{berechnung}}}{2} \right)}$$

$$s_{\text{ver}} := \frac{A_{\sigma 2}}{b} \quad \text{erorderliche Blechstärke aus der Verstärkungsquerschnittsfläche}$$

$$s_{\text{ver}} = 10.703 \cdot \text{mm} \quad \text{erorderliche Blechstärke}$$

$$s_{\text{ver\_gewählt}} := 12 \text{ mm} \quad \text{gewählte Blechstärke zur Verstärkung.}$$

Gewählt wird eine Verstärkung mit  $b=105\text{mm}$  und  $s_{\text{ver}} = 12\text{mm}$

## erforderliche Pratzengröße

$m_{\text{vorh\_leer}} := 7699.3\text{kg}$  vorhandene Leermasse lt CAD

$l_{\text{ges}} := 8896\text{mm}$  Gesamtänge Wärmetauscher

$\rho_{\text{wasser}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  Dichte Wasser

$m_{\text{vorh\_voll}} := m_{\text{vorh\_leer}} + l_{\text{ges}} \cdot d_{\text{iMantel}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_{\text{wasser}}$   $m_{\text{vorh\_voll}} = 14.63 \cdot \text{t}$

$F_{\text{G\_WT}} := m_{\text{vorh\_voll}} \cdot g$   $F_{\text{G\_WT}} = 143.48 \cdot \text{kN}$  Gesamtgewichtskraft Wärmetauscher

$F_{\text{G\_Pratze}} := \frac{F_{\text{G\_WT}}}{3}$   $F_{\text{G\_Pratze}} = 47.825 \cdot \text{kN}$  Gewichtskraft je Pratze

Vorauswahl der Pratzten ergibt Größe 3

$C_{\text{bei}} := 0.052 \cdot \frac{1}{\sqrt{\text{mm}}}$  Beiwert lt DIN 28083

$f_1 := 140\text{mm}$  Hebellänge lt DIN 28083

$K_{\zeta\_S235} := 157 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  Festigkeitswert lt DIN 28083

$a_{\text{wert}} := \frac{5}{6} \cdot f_1$   $a_{\text{wert}} = 116.667 \cdot \text{mm}$  lt DIN 28083

erforderliche Blechstärke für die Verstärkung der Pratze ergibt sich zu

$s_{2\_erf} := C_{\text{bei}} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{wert}} \cdot F_{\text{G\_Pratze}}}{K_{\zeta\_S235}}}$   $s_{2\_erf} = 9.803 \cdot \text{mm}$

$s_{2\_gew} := 10\text{mm}$  gewählte Blechstärke für Verstärkung Pratze

maximal auftretendes Moment an der Pratze

$M_{\text{max\_Pratze}} := F_{\text{G\_Pratze}} \cdot a_{\text{wert}}$   $M_{\text{max\_Pratze}} = 5.58 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Überprüfung mit DIN 28083 Teil2 ergibt sowohl für Spannungsbewertung als auch für Traglastverfahren zulässige Werte --> es passt!!

## Tragzapfen

Vorgesehen sind zwei Tragzapfen um einerseits den Behälter heben zu können, andererseits bei der Montage ein Aufrichten in Prüf- und Funktionslage zu gewährleisten.

Laut DIN 28085 gibt es sechs Grundgrößen welche nach Norm mindestens in Qualität St 370 , also in S235JR auszuführen sind.

Für ein Prüfgewicht von ~7t (70kN) ergeben sich zwei Zapfen Größe 2 (je 125kN) als ausreichend, sodass ich keine Festigkeitsnachweise führe.