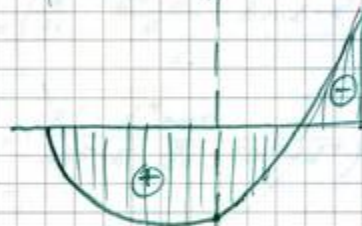
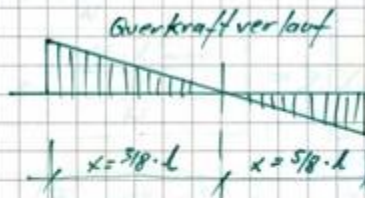
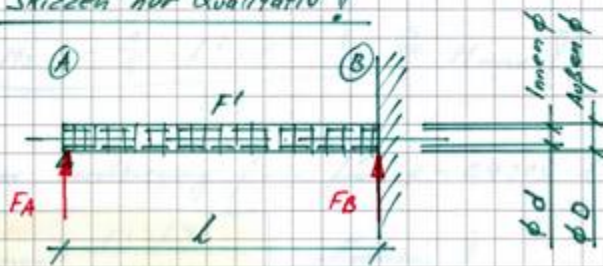


1.) Mechanik : Rohrabstände

Auf die allgemeine Herleitung soll hier verzichtet werden
(Siehe Spannungshypothesen der schlanken Balken von "Euler")
Die nachfolgenden Formeln sind in jedem Tabellenbuch (Mechanik)
zu finden.

Gewählter Einspanngrad: Festpunkt - Gleitlager

Skizzen nur qualitativ!



Für Rohre gilt:

(1) $I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$ Trägheitsmoment
(2) $N = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$ Widerstandsmoment

(2) nach $\bar{I} \Rightarrow$

(3) $\bar{I} = \frac{N \cdot 32 \cdot D}{D^4 - d^4}$

(3) in (1) $\Rightarrow I = \frac{N \cdot 32 \cdot D}{D^4 - d^4} \cdot \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$

(4) $I = \frac{1}{2} \cdot N \cdot D$

(5) $F_A = \frac{3}{8} \cdot F' \cdot L$

(6) $F_B = \frac{5}{8} \cdot F' \cdot L$

$\max M_1 = F_A \cdot \frac{3}{8} \cdot L \cdot L$

$\max M_1 = \frac{3}{8} \cdot \frac{3}{8} \cdot F' \cdot L \cdot L = \frac{9}{64} \cdot F' \cdot L^2$

(7) $\max M_1 = \frac{9}{128} \cdot F' \cdot L^2$

28.02.1986
[Signature]

$$M_2 = \frac{-F_0 \cdot \frac{5}{8} \cdot L \cdot L \cdot F^2}{2} - M_1 \quad -2-$$

$$M_2 = \frac{-\frac{5}{8} \cdot \frac{5}{8} \cdot L^2 \cdot F^2}{2} - \frac{3}{128} \cdot F' \cdot L^2$$

$$M_2 = -\frac{25}{128} \cdot L^2 \cdot F' - \frac{3}{128} \cdot F' \cdot L^2$$

$$M_2 = -\frac{16}{128} \cdot L^2 \cdot F'$$

$$(8) \boxed{M_2 = -\frac{1}{8} \cdot L^2 \cdot F'} \hat{=} M_{\max} \uparrow$$

max. Durchbiegung $f_{\max}$ für $x = 0,4275 \cdot L$

$$(9) \boxed{f_{\max} = \frac{F' \cdot L^4}{185 \cdot E \cdot I}} \text{ allgemein!}$$

max. Stützenabstand $L_{\max}$ bei max. zul. Spannung

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{M_{\max}}{W}$$

$$\boxed{\sigma_{\text{zul}} = \frac{F' \cdot L_{\max}^2}{8W}} \Rightarrow \boxed{L_{\max} = \left(\frac{W \cdot \sigma_{\text{zul}} \cdot 8}{F'} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (10) \text{ allgemein!}$$

$$(11) \boxed{L_{\max} = \left(\frac{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \cdot \sigma_{\text{zul}} \cdot 8}{F'} \right)^{\frac{1}{2}}} \text{ für Rohre!}$$

$$(12) \boxed{f_{\max} = \frac{F' \cdot L_{\max}^4}{185 \cdot E \cdot \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)}} \text{ für Rohre!}$$

29.06.19%
JL

-3-

aus (9)

$$f_{\max} = \frac{F \cdot L^4}{185 \cdot E \cdot I}$$

$$\Rightarrow \left[\left(\frac{f_{\max} \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4}} = L_{\max} \right] \quad (13)$$

Definition: $f_{\max} = d_g \cdot a \cdot L \quad (13')$

d_g = Teil von a (Leitungsgefälle)

a = Leitungsgefälle [mm/m]

L = Stützweite [m]

eingesetzt in (13) $\Rightarrow$

$$L_{\max} = \left(\frac{d_g \cdot a \cdot L \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$L_{\max} = L^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{d_g \cdot a \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\frac{L_{\max}^1}{L_{\max}^{\frac{1}{4}}} = \left(\frac{d_g \cdot a \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$L_{\max}^{1-\frac{1}{4}} = \left(\frac{d_g \cdot a \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$L_{\max} = \left(\frac{d_g \cdot a \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{4} \cdot \frac{4}{3}}$$

$$\boxed{L_{\max} = \left(\frac{d_g \cdot a \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (14)$$

28.06.1986
Fehl

-4-

Einheiten Formel (14)

$$L_{max} = \left(\frac{d\gamma \cdot \alpha \cdot 185 \cdot E \cdot I}{F'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A)$$

$$L = \left(\frac{\cancel{\text{mm/m}} \cdot \text{N/mm}^2 \cdot \text{cm}^4}{\text{kg/m}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$L = \left(\frac{\cancel{\text{mm}} \cdot \text{N/mm}^2 \cdot \text{cm}^4}{\text{kg} \cdot \cancel{\text{mm}}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$L = \left(\frac{\text{N} \cdot \text{cm}^4}{\text{kg} \cdot \text{mm}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$L = \left(\frac{\cancel{\text{N}} \cdot \text{cm}^4}{\cancel{\text{kg}} \cdot \cancel{\text{kg}} \cdot \cancel{\text{mm}} \cdot \cancel{\text{mm}}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\text{cm}^3 \right)^{\frac{1}{3}} = \text{cm}$$

$$L = [cm]$$

$$L = (A) \cdot \frac{1m}{100cm}$$

Einheiten : Formel (14)

$$L = m$$

$$\alpha = \text{mm/m}$$

$$E = \text{N/mm}^2$$

$$I = \text{cm}^4$$

$$F' = \text{kg/m}$$

$$d\gamma = \text{Teil von } \alpha$$

28.06.1986
Ful

-5-

2.) Mechanik : max. Reaktionskräfte (Infolge Narmespannungen) bei starrer Einspannung

$$(1) \left[\sigma = \frac{F}{A} \right] (2) \left[\sigma = E \cdot \epsilon \right] (3) \left[\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \right]$$

$$(4) \left[\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \right]$$

σ = Spannung

F = Kraft

A = Fläche

ϵ = Dehnung

E = E-Modul

ΔL = Längenänderung

L_0 = Anfangslänge

ΔT = Temperaturspreizung

α = Längenausdehnungs koef.

Richtwerte: !

α Werte: mm/m · K

Stahl : 0,012

Kupfer : 0,0163

PVC : 0,08

E-Modul: N/mm²

Stahl : 210000

Kupfer : 120000 - 130000

PVC : 1000 - 3500
(hart)

$$\frac{F}{A} = E \cdot \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \cdot E}{L_0}$$

$$\frac{F}{A} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (B) \quad \boxed{F = A \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E} \quad (5)$$

Einheiten: Formel (5)

$$F = \text{cm}^2 \cdot \frac{\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{\alpha} \cdot \text{K} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{cm}^2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 100/1000$$

$$\boxed{F = (B) \cdot 0,1}$$

Einheiten: Formel (5)

$$F = \text{N}$$

$$\alpha = \text{mm/m} \cdot \text{K}$$

$$\Delta T = \text{K}$$

$$E = \text{N/mm}^2$$

$$A = \text{cm}^2$$

28.06.1986
Fehl

- 6 -

Richtwerte $\checkmark$

l_{max} und f_{max} bei σ_{max}

$$(6) \quad l_{max} = \left(\frac{N \cdot \sigma_{zul} \cdot 8}{F'} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$(7) \quad f_{max} = \frac{F' \cdot l_{max}^4}{185 \cdot E \cdot I}$$

[N/mm²]

σ_{max} : Stahl ... 185

" Kupfer ... 140

" PVC-W ... 25

" PVC-h ... 50 ... 75

Einheiten Formel 6:

$$l = \left(\frac{cm^3 \cdot N/mm^2 \cdot 8}{kg/m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l = \left(\frac{cm^3 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{cm^3} \cdot N \cdot 8 \cdot m}{\frac{kg}{m} \cdot 10 \frac{N}{kg} \cdot mm^2 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{mm^2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l = \left(\frac{8}{10} \dots \right)^{\frac{1}{2}}$$

Einheiten: $l = m$
 $N = cm^3$
 $\sigma_{zul} = N/mm^2$
 $F' = kg/m$

Einheiten Formel (7)

$$f = \frac{\frac{kg}{m} \cdot m^4}{185 \cdot \frac{N}{mm^2} \cdot cm^4}$$

$$f = \frac{kg \cdot m^4 \cdot mm^2}{m \cdot 185 \cdot cm^4 \cdot N}$$

$$f = \frac{10 \frac{N}{kg} \cdot kg \cdot m^3 \cdot 1 \cdot 10^3 \frac{mm^3}{cm^3} \cdot mm^2}{185 \cdot cm^4 \cdot 1 \cdot 10^4 \frac{mm^4}{cm^4} \cdot N}$$

$$f = \frac{1}{185} \cdot 10^6 \dots$$

Einheiten: $f = mm$
 $F' = kg/m$
 $l = m$
 $E = N/mm^2$
 $I = cm^4$

28.06.1986
 J. J.

3) Wärmetechnik : Wärmedurchgang

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta \vec{T}$$

$$Q_1 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta \vec{T} \cdot \tau \quad \text{Fouriersches Gesetz}$$

Q = Wärmemenge (nicht Leistung: Leistung wäre $\dot{Q} \cdot \vec{T}$)

λ = Proportionalitätsfaktor

A = Wandfläche

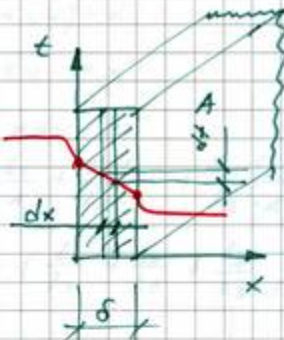
$\Delta \vec{T}$ = Temperaturspreizung

τ = Zeit

δ = Wandstärke

Hinweis: λ ist Temperaturabhängig (hier wird mit einem Mittelwert gerechnet $\vec{T}$)

$$Q_1 = \lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \cdot \tau$$



für die Rohrwand gilt folgender Ansatz:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dr} \cdot \tau$$

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dr}$$

$$A = 2 \cdot r \cdot B \cdot l$$

$$\dot{Q} = \lambda \cdot 2 \cdot r \cdot B \cdot l \cdot \frac{dt}{dr}$$

$$dt = \frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot 2 \cdot B \cdot l} \cdot \frac{dr}{r}$$

$$\int_1^2 dt = \frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot 2 \cdot B \cdot l} \cdot \int_1^2 \frac{dr}{r}$$

fundamentale $\int_1^2 dt = t_1 - t_2$
 $\int_1^2 \frac{dr}{r} = (\ln r_1 - \ln r_2)$

$$t_1 - t_2 = \frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot 2 \cdot B \cdot l} \cdot (\ln r_1 - \ln r_2)$$

mit $(\ln r_1 - \ln r_2) = \ln \frac{r_1}{r_2}$ (Rechenregeln für Logarithmen)

$$\Rightarrow t_2 - t_1 = \frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot 2 \cdot B \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

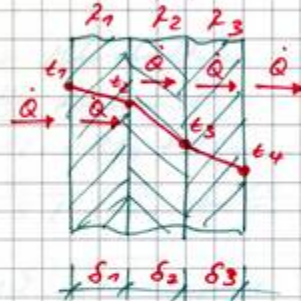
$$\dot{Q} = \frac{(t_2 - t_1) \cdot \lambda \cdot 2 \cdot B \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (A_1)$$

25.06.1986
 vl

-8-

Wärmestrom durch eine mehrschichtige Wand.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot A \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot A \cdot (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot A \cdot (t_3 - t_4)$$



$$\text{mit } t_1 - t_2 = \frac{\dot{Q} \cdot \delta_1}{\lambda_1 \cdot A} \quad (x) \quad (1) \quad t_2 = t_1 - x$$

$$t_2 - t_3 = \frac{\dot{Q} \cdot \delta_2}{\lambda_2 \cdot A} \quad (y) \quad (2) \quad t_2 = y + t_3 \quad (3) \quad t_3 = t_2 - y$$

$$t_3 - t_4 = \frac{\dot{Q} \cdot \delta_3}{\lambda_3 \cdot A} \quad (z) \quad (4) \quad t_3 = z + t_4$$

$$(2) \text{ in } (1) \Rightarrow t_1 - (y + t_3) = x$$

$$(4) \text{ in } (3) \Rightarrow t_1 - (y + z + t_4) = x$$

$$t_1 - y - z - t_4 = x$$

$$t_1 - t_4 = x + y + z$$

$$t_1 - t_4 = \frac{\dot{Q} \cdot \delta_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{\dot{Q} \cdot \delta_2}{\lambda_2 \cdot A} + \frac{\dot{Q} \cdot \delta_3}{\lambda_3 \cdot A}$$

$$t_1 - t_4 = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \cdot A \cdot (t_1 - t_4) \quad (A_2)$$

$$R_{\text{ges}} = \frac{t_1 - t_4}{\dot{Q}} = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$

$$R_{\text{ges}} = R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + R_{\lambda_3}$$

28.06.1986
JH

Formel: (A7)
$$Q = \frac{(t_2 - t_1) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Rohrformel
$$R_L = \frac{t_2 - t_1}{Q} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \pi \cdot l}$$

in Analogie zur Mehrschichtigen Wand (siehe Formel (A2))

3-Schichtige Rohrformel

$\Rightarrow R_{Lges} = R_{L1} + R_{L2} + R_{L3}$ (z.B.: 5-Schichten)

$$R_{Lges} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\frac{1}{r_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{r_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} \right)$$

$$\left[\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \right] \quad \left[\dot{Q} = k_R \cdot A \cdot \Delta T \right]$$

$$R_d = \frac{t_A - t_B}{\dot{Q}} = \frac{1}{k \cdot A}$$

$$R_d = R_{\alpha 1} + R_{Lges} + R_{\alpha 2} = \frac{1}{k \cdot A} = \frac{t_1 - t_4}{\dot{Q}}$$

$$k_R = \frac{1}{R_{\alpha 1} + R_{Lges} + R_{\alpha 2}}$$

$$k_R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot A} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\frac{1}{r_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots \right) + \frac{1}{\alpha_4 \cdot A}}$$

mit $A = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l$

$$\Rightarrow k_R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\frac{1}{r_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots \right) + \frac{1}{\alpha_4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l}}$$

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{R_d} \Rightarrow Q = k_R (t_1 - t_4)$$

$$k_R = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2 \cdot r_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_{n+1} \cdot d_{n+1}}}$$

geteilt durch $l \Rightarrow k_{RL} = \frac{k_R l}{l}$

k_{RL} ist nun auf die Länge des Rohres bezogener K -Wert!

$$Q = k_{RL} \cdot l (t_1 - t_4)$$

28.06.1986
JLL

-10-

Axiale Flächenmomente 2. Grades I , Widerstandsmomente W und Trägheitsradius i für Biegung und Knickung



$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (1)$$

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} \quad (2)$$

$$i = 0,25 \sqrt{D^2 + d^2}$$

Stützkkräfte, Biegemomente und Durchbiegungen bei Biegeträgern von gleichbleibendem Querschnitt



$$F_A = F_B = \frac{F}{2} \quad (3)$$

$$M_{\max} = \frac{Fl}{4} \quad (4)$$

$$f = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (5)$$

$$\tan \alpha = \frac{Fl^2}{16EI} = \frac{3f}{l}$$

System: Loslager - Loslager

Einspanngrad

aus 5 $\Rightarrow F = \frac{f \cdot 48 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad s_b$

$s = \frac{M_b}{N}$, mit $M_b = \frac{F \cdot l}{4}$, mit $s_b \Rightarrow$

$$s = \frac{\frac{f \cdot 48 \cdot E \cdot I}{l^3} \cdot l}{4} \quad (6)$$

25.03.1999
T.H.

Allgemein : Stützabstände

F' = Gewicht der Rohrleitung

Für Einspanngrad
Festpunkt - Gleitlager

ergibt sich eine max. Stützabstand bei max. zul. Spannung

nach folgender Formel :

$$l_{\max} = \left(\frac{N \cdot \sigma_{\text{zul}} \cdot 8}{F'} \right)^{1/2} \quad (7)$$

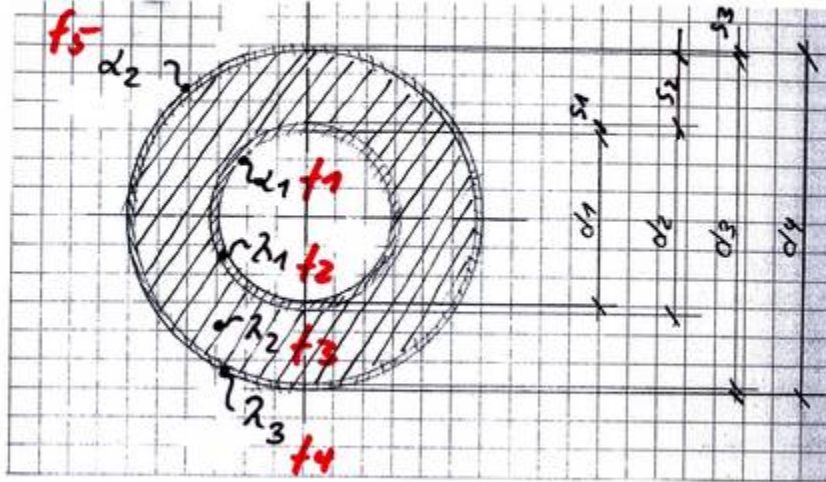
eine max. Durchbiegung bei max. Stützabstand

nach folgender Formel :

$$f_{\max} = \frac{F' \cdot l_{\max}^4}{185 \cdot E \cdot I} \quad (8)$$

25.03.1999
T.H.

Wärmeverlust von isolierten Rohrleitungen ①



Dämmstärkenumrechnung

$$K_{RL\text{EnEV}} = K_{RL\text{isol}}$$

$$(1) \quad K_{RL\text{isol}} = \frac{T_S}{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5} = K_{RL\text{EnEV}}$$

$$K_{RL\text{isol}} = \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{f_5}}$$

$$f_3 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2 + 2 \cdot s_2}{d_2}$$

$$f_4 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_2 + 2 \cdot s_2 + 2 \cdot s_3}{d_2 + 2 \cdot s_2}$$

aus (1) =>

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = \frac{T_S}{K_{RL}} = \phi$$

$$f_5 = \frac{1}{d_2 \cdot (d_2 + 2 \cdot s_2 + 2 \cdot s_3)}$$

bei Dämmstärkenumrechnung = Lösung durch Iteration

06.05.2009
FHM