

Fußbodenheizung - Strahlungsheizung

- in Anlehnung an „Der Heizungsbauer“ von Soller
- Wärmeabgabe bei allen Heizflächen durch Strahlung und Konvektion
- vereinfachte Darstellung der unterschiedlichen Konvektions- und Strahlungsanteile im Heizkörper- bzw. Heizflächen-Exponenten n

n	1,1	1,22...1,28	1,3	1,4
Art der Heizfläche/ des Heizsystems	Strahler, Fuß- bodenheizung	Plattenheiz- körper	Normradiatoren	Konvektoren
	⇒ ⇒ ⇒ ⇒ Strahlungsanteil nimmt ab ⇒ ⇒ ⇒ ⇒			
	⇒ ⇒ ⇒ ⇒ Konvektionsanteil nimmt zu ⇒ ⇒ ⇒ ⇒			

- Strahlung hängt von der vierten Potenz der Kelvin-Temperatur einer Strahlungsquelle ab (Stephan-Boltzmann-Gesetze)
- Konvektion dagegen von der Temperaturdifferenz zwischen wärmeabgebendem und aufnehmendem Stoff
- für dieselbe Heizfläche steigt daher der Strahlungsanteil und sinkt der Konvektionsanteil (n sinkt) mit niedrigeren Übertemperaturen (NT-Betrieb)

1. Vor- und Nachteile von Fußbodenheizungen

Vorteile

- weitgehend „unsichtbare Heizflächen“
- weniger Staubverwirbelungen durch geringere Konvektion (Krankenhausbereich)
- niedrigere Heizmitteltemperaturen möglich (wegen größerer Abgabefläche); dies ist vorteilhaft für (Elektro-) Wärmepumpen
- bessere Temperaturverteilung als bei Heizflächen mit hohen Temperaturen
- durch die Aufheizung aller Umgebungsflächen eines Raumes (Strahlung) kann bei gleicher Empfindungstemperatur möglicherweise die Lufttemperatur abgesenkt werden

Nachteile

- ca. 30...50 % höhere Investition, z.T. auch höhere Betriebskosten
- bei Fenstern mit $U \geq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ unzureichend, da keine Ausgleichung des Kaltluftzufalls in Fensternähe
- meist sehr träge Reaktion (nach Nachtabsenkung etc.)
- nach DIN EN 1264 maximale FB-Oberflächentemperatur von 29°C für normal genutzte Räume; höher in Raumrandbereichen und Bädern
- höhere Wärmeverluste durch Strahlungswärmeübertragung zwischen FBH und Flächen mit niedrigerer Oberflächentemperatur (AW,AF...) und von dort aus Transmission durch die gedämmte Hülle
- früher: Problem der Sauerstoffdiffusion in die Kunststoffrohre

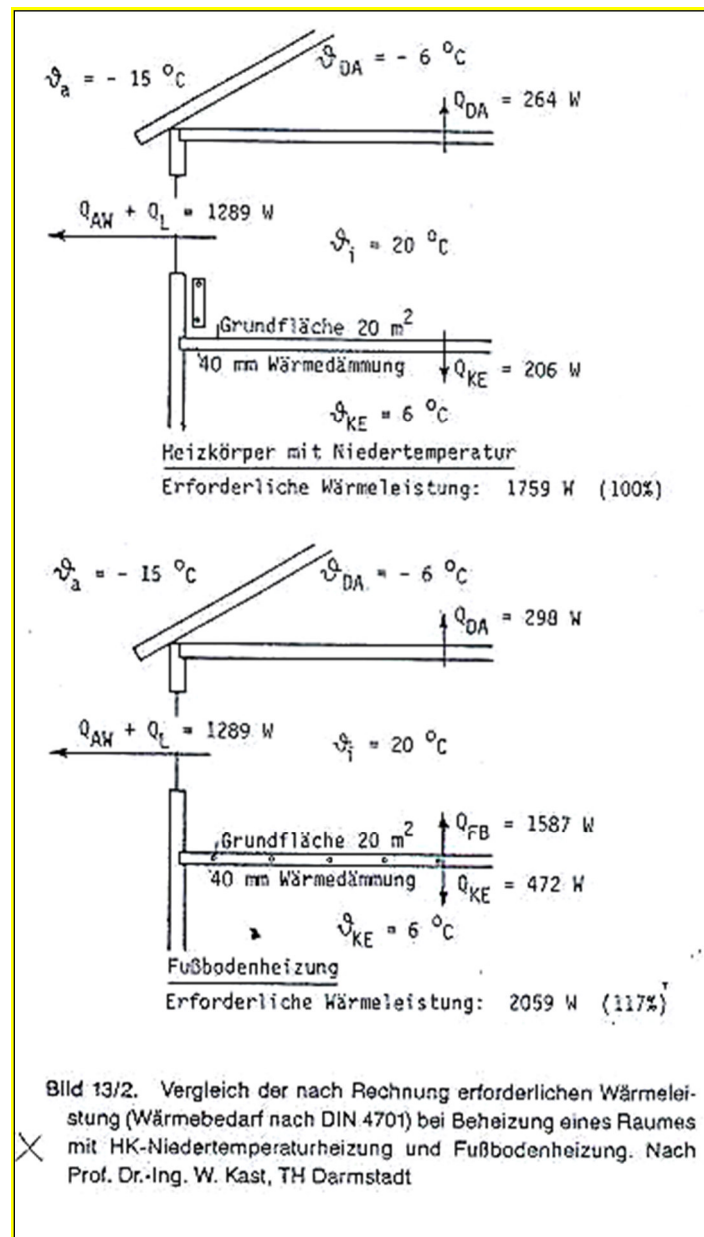
Anmerkungen

- heute Tendenz zur Absenkung der maximalen Oberflächentemperatur nach der Basisgleichung für FBH:

$$\dot{q} = 8,92 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^{1.1}} \cdot (\vartheta_{\text{FB,O}} - \vartheta_i)^{1.1}$$

- nach dieser Formel und $\vartheta_{\text{FB,O,max}} = 29^\circ\text{C}$ ergibt sich $\dot{q}_{\text{max}} = 100 \text{ W/m}^2$ (kältester Tag)
- für den heutigen NEH-Standard (ca. 35 W/m^2 am kältesten Tag) ergibt sich eine maximale FB-Oberflächentemperatur für den kältesten Tag von $\vartheta_{\text{FB,O,max}} = 23,5^\circ\text{C}$
- Selbstregelleffekt der FBH steigt: nur noch 3,5K Übertemperatur für den kältesten Tag \Rightarrow bei Fremdwärmeanfall z.B. Anstieg der Raumtemperatur auf 21°C \Rightarrow nur noch 2,5K Übertemperatur \Rightarrow Wärmeabgabe um 30 % vermindert

- Vergleich der nach Rechnung erforderlichen Wärmeleistung (im Bild nach DIN 4701, heute vergleichbar nach DIN EN 12831-1) bei Heizung mit NT-Heizung mit HK und FBH:



Berechnung der Heizlast ist heizflächenunabhängig!

- Frage: Wie hoch ist für das obige Bild die Decken-Oberflächentemperatur innen?

NT-Heizung:

Wärmestrom durch die Decke: $\dot{q}_{DE} = \dot{Q}_{DE}/A_{DE} = 13,2W/m^2K$

$$k_{DE} = \frac{\dot{q}_{DE}}{\Delta\vartheta} = \frac{13,2W}{m^2 \cdot 26K} = 0,51 \frac{W}{m^2K}$$

$$k_{DE} \cdot \Delta\vartheta = \frac{1}{R_i} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{DE,O})$$

$$\vartheta_{DE,O} = \vartheta_i - k_{DE} \cdot R_i \cdot (26K) = 18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

FBH:

neuer Wärmestrom durch die Decke: $\dot{q}_{DE,neu} = \dot{Q}_{DE,neu}/A_{DE} = 14,9W/m^2K$

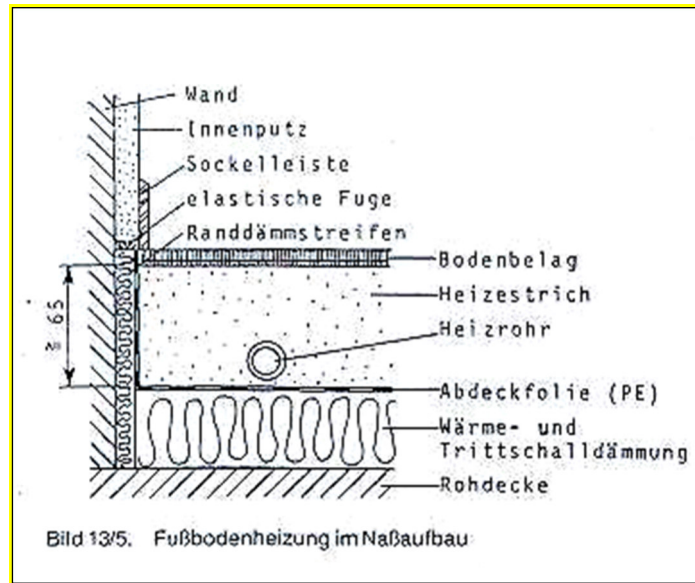
die Wärmeleitung durch die Decke und der Wärmeübergang zum Dachraum hat sich nicht geändert, also kann man folgende Verhältnisgleichung aufstellen:

$$(\vartheta_{DE,O,neu} - \vartheta_a) \cdot \dot{q}_{DE,neu} = (\vartheta_{DE,O} - \vartheta_a) \cdot \dot{q}_{DE}$$

$$\vartheta_{DE,O,neu} = 21,4 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (Wert liegt sogar über Raumtemperatur!)}$$

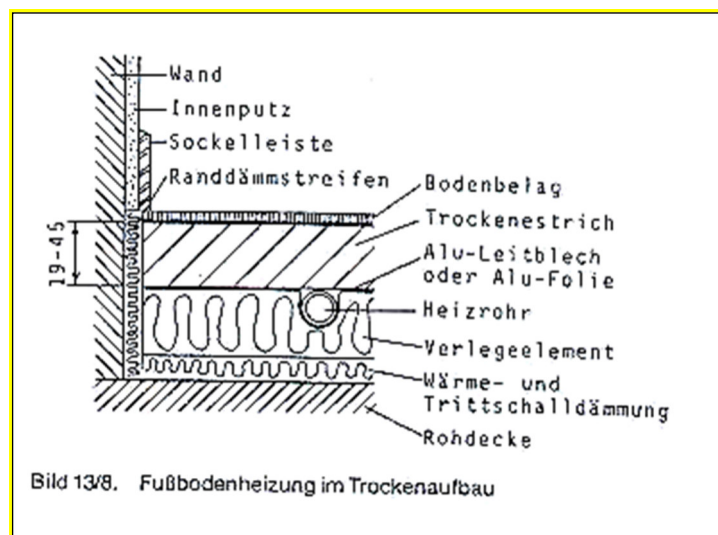
2. Verlegesysteme und Verlegearten

- Grundsätzlich zwei Verlegearten: FBH in Nassaufbau
FBH im Trockenaufbau
- Fußbodenheizungen im Nassaufbau:

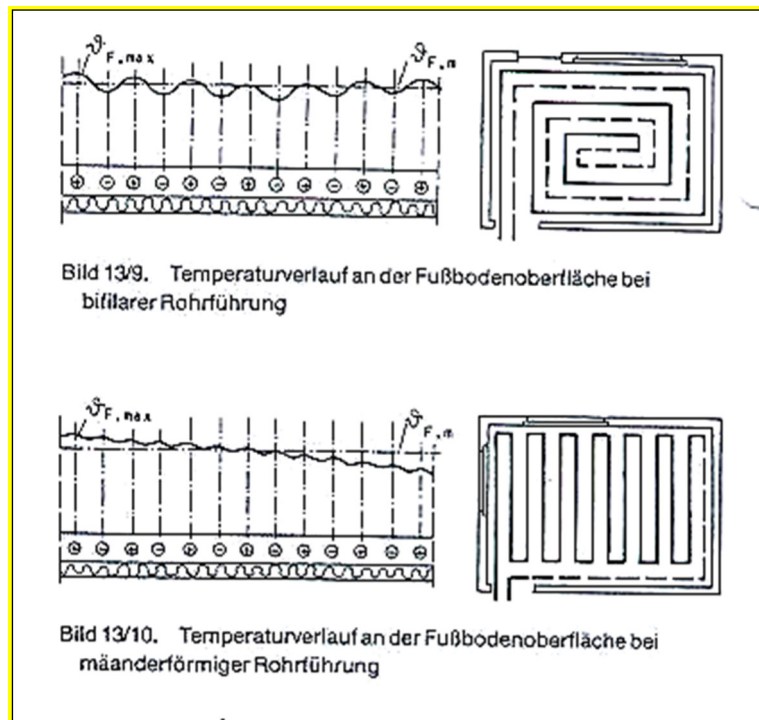


- Fußbodenheizungen im Trockenaufbau:

auch „Klimaboden“ genannt; geringere Trägheit; häufig eingesetzt in der Nachrüstung; Welligkeit der Temperatur an der Oberfläche höher (höhere Amplituden)



- Verlegearten: bifilare Verlegung
mäanderförmige Verlegung



bifilare (flächige) Verlegung bevorzugt für Rauminneres
mäanderförmige Verlegung in Fenster- oder Außenwandnähe (hohe U-Werte)

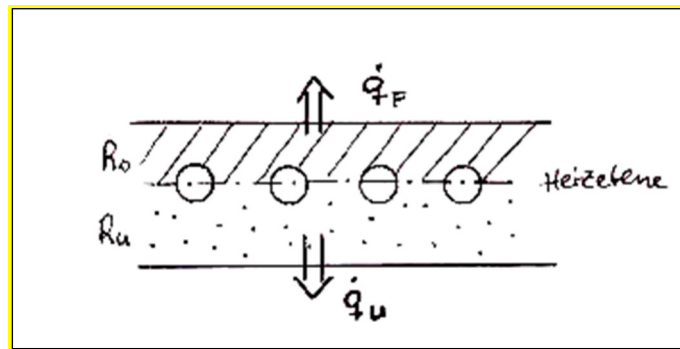
3. Berechnung von Fußbodenheizungen

Allgemeines

- Berechnung nach DIN EN 1264 mit der Basisgleichung:

$$\dot{q}_F = 8,92 \frac{W}{m^2K^{1,1}} \cdot (\vartheta_{FB,O} - \vartheta_i)^{1,1}$$

- diese Basisgleichung für FBH ist systemunabhängig:
→ für den in den Raum übertragenen Wärmestrom spielen nur die Raumtemperatur ϑ_i und die mittlere Fußbodenoberflächentemperatur $\vartheta_{FB,O}$ eine Rolle!
- die mittlere Fußbodenoberflächentemperatur $\vartheta_{FB,O}$ ergibt sich aus der Vor- und Rücklauftemperatur der FBH (ϑ_v und ϑ_R), dem an den Raum abgegebenen Wärmestrom (\dot{q}_F) und dem Wärmewiderstand nach oben (R_o):



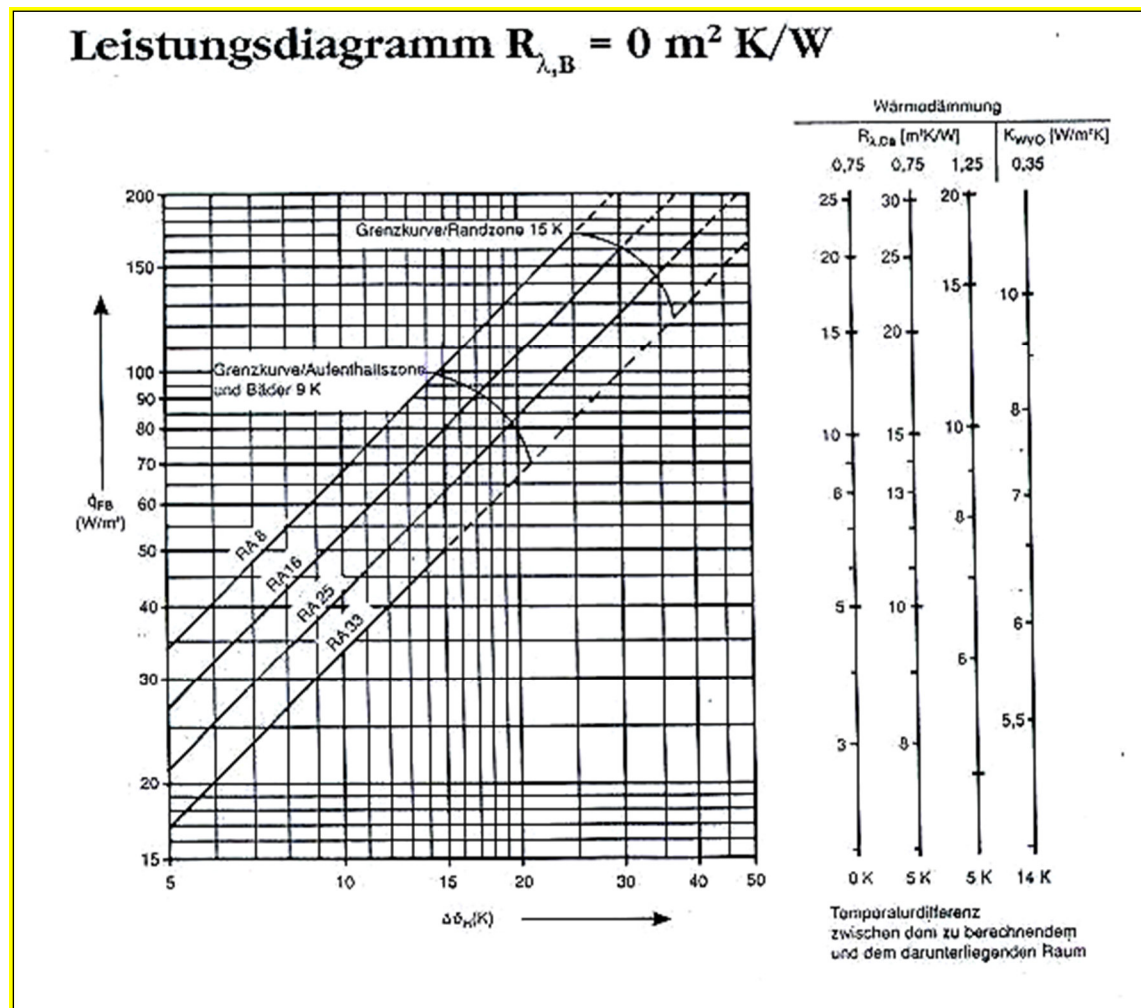
- gleichzeitig ergibt sich durch den Wärmewiderstand nach unten (R_u) und die Temperaturdifferenz nach unten die Verlustleistung nach unten (\dot{q}_u)
- um die Verluste nach unten zu begrenzen, schreibt die DIN folgende Mindestwiderstände der Dämmung nach unten vor:

$$R_{\lambda,D\ddot{a},min} = 1,25 \frac{m^2K}{W} \quad \text{für Angrenzung an unbeheizte Räume oder Erdreich}$$

$$R_{\lambda,D\ddot{a},min} = 0,85 \frac{m^2K}{W} \quad \text{für Angrenzung an beheizte Räume}$$

- um dem Massenstrom durch die Rohre bestimmen zu können, muss man \dot{q}_F und \dot{q}_u kennen

- zur Auslegung dienen Leistungsdiagramme, z.B.:



$\Delta\vartheta_H$: entspricht Δt_{in} (mittlere Heizmittelübertemperatur)
 RA: Rohrabstand

jedem Diagramm liegt ein fest vorgeschriebener Fußboden oberhalb der Heiz(rohr)ebene zugrunde!

Grenzkurven, damit zugelassene $\vartheta_{FB,max}$ nicht überschritten werden

Welligkeit, Belagswiderstand

- je geringer der Wärmewiderstand nach oben, desto höher der Anteil der für den Raum genutzten Wärme (\dot{q}_F) bezogen auf den abgegebenen Wärmestrom des Heizwassers (\dot{q}_{AB})
- daher sollte $R_{\lambda,b}$ für den Bodenbelag so gering wie möglich sein: $R_{\lambda,b,max} = 0,15 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
- empfohlen wird: $R_{\lambda,b} = 0,1 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

- mit geringem Belagswiderstand $R_{\lambda,b}$ (Fliesen statt Teppich), kann mit geringeren Vor-/Rücklauftemperaturen (geringerer Heizmittelübertemperatur $\Delta\vartheta_H$) dieselbe FB-Oberflächentemperatur erreicht werden; die Temperaturwelligkeit der Oberfläche ist aber größer
- bei Zunahme des Belagwiderstandes $R_{\lambda,b}$ (Teppich statt Fliesen) können höhere Wärmestromdichten in den Raum gegeben werden, ohne die kritischen Werte von $\vartheta_{FB,max}$ zu überschreiten (geringere Welligkeit); dabei sind aber auch höhere Übertemperaturen $\Delta\vartheta_H$ nötig
- Temperaturwelligkeit ist gering, wenn:
 - Verlegeabstand eng
 - kleine Heizmittelspreizung
 - großes $R_{\lambda,b}$
 - bifilare Rohrführung

Rohrabstände

- kleinere Rohrabstände bedeuten:
 - geringere Welligkeit der FB-Oberflächentemperatur
 - geringere $\Delta\vartheta_H$ nötig für das gleiche \dot{q}_F
 - höhere Materialkosten
 - höherer Pumpenergieaufwand (wegen mehr Rohrlänge)

Heizmittelübertemperatur, Vorlaufübertemperatur, Heizmittelspreizung

- Begrenzung der maximalen Oberflächentemperatur auf folgende Werte:
 - 29°C für Aufenthaltszonen
 - 35°C für Randzonen
 - 9K über Raumtemperatur für Bäder
- die erhöhte Fußbodenoberflächentemperatur in den Randzonen führt zur verstärkten Leistungsabgabe in diesem Bereich: vor Fenstern Randzonenbeheizung vorsehen, vor Außenwänden eher nicht (spätere Nutzung mit Möbeln!)
- die durch die DIN begrenzte maximale Oberflächentemperatur ist nicht die mittlere Oberflächentemperatur über dem gesamten Fußboden $\vartheta_{FB,O}$, sondern die Temperatur gerade oberhalb der verlegten Rohre gemittelt über die verlegte Rohrlänge; oberhalb des Rohres sinkt die Temperatur zwischen Eintritt in den Raum (Beginn Vorlauf) und Austritt aus dem Raum (Ende Rücklauf)

- damit die höchste auftretende Temperatur im ungünstigsten Raum begrenzt wird, lässt die DIN für den Auslegungsraum bei Auslegung auf der Grenzkurve (maximal zulässige mittlere FB-Oberflächentemperaturen) zu: $(\vartheta_V - \vartheta_R) \leq 5K$
- die maximale Vorlauftemperatur ist bestimmt durch den Raum mit dem ungünstigsten \dot{q}
- für alle anderen Räume – neben dem Auslegungsraum – werden höhere Spreizungen zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur erreicht; die Welligkeit nimmt in diesen Räume zu!
- Beispiel dazu:

Auslegung mit $R_{\lambda,b} = 0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$

RA = 16 cm auf der Grenzkurve

$\vartheta_i = 20 \text{ K}$

Auslegungsspreizung für den ungünstigsten Raum 5K

$\Delta\vartheta_H \approx 0,5(\vartheta_V + \vartheta_R) - \vartheta_i$

ungünstigster Raum	anderer Raum
$\dot{q}=100\text{W/m}^2$	$\dot{q}=80\text{W/m}^2$
$\Delta\delta_H=36\text{K}$	$\Delta\delta_H=28\text{K}$
$0,5(\delta_V+\delta_R)=\Delta\delta_H+\delta_i=56\text{K}$	$0,5(\delta_V+\delta_R)=\Delta\delta_H+\delta_i=48\text{K}$
$\delta_V=56^\circ\text{C}+2,5\text{K}=58,5^\circ\text{C}$	$\delta_V=58,5^\circ\text{C}$
$\delta_R=56^\circ\text{C}-2,5\text{K}=53,5^\circ\text{C}$	$\delta_R=2(48\text{K})-58,5^\circ\text{C}=37,5^\circ\text{C}$
$\delta_V-\delta_R=5\text{K}$	$\delta_V-\delta_R=21\text{K}$

- arithmetisch oder logarithmisch rechnen darf man für: $\frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\Delta\vartheta_H} \leq 0,5$
- nur logarithmisch rechnen darf man für: $\frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\Delta\vartheta_H} > 0,5$
- arithmetisch: $\Delta\vartheta_H \approx 0,5(\vartheta_V + \vartheta_R) - \vartheta_i$
- logarithmisch: $\Delta\vartheta_H = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}}$

Soll-Wärmestromdichte, Ist-Wärmestromdichte

- Ermittlung der Soll-Wärmestromdichte für einen Raum:

\dot{Q} für den Raum aus der DIN EN 12831-1 entnehmen; Verlustwärmeströme, die durch eine Ebene mit FBH gehen, sind aus der Raumheizlast abzuziehen

- Ist- Wärmestromdichte: $\dot{q}_{ist} = K_H \cdot \Delta\vartheta_H$

$K_H = f(R_A, R_{oben}, R_{\lambda,b}, \text{Systemaufbau})$

K_H hängt von R_{oben} ab, R_{oben} hängt von α_i ab, für α_i gilt aber $\alpha_i = f(\Delta\vartheta_H^{0,1})$

→ man sieht, dass K_H eigentlich keine Konstante ist

- es gibt zwei Möglichkeiten der Darstellung für den Zusammenhang zwischen \dot{q} und $\Delta\vartheta_H$:

Auftragung als Strahlen im doppelt linearen Diagramm

Auftragung als parallele Geraden im doppelt logarithmischen Diagramm

- die Auftragung im doppelt linearen Diagramm kann nur eine Näherung sein, wenn K_H keine Konstante ist!

Wärmestromdichte nach unten

- Ableitung der Formel für \dot{q}_u :
$$\dot{q}_u = \dot{q}_{ist} \cdot \left(\frac{R_o}{R_U} + \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{R_U \cdot \dot{q}_{ist}} \right)$$

Wärmestrom von der Heizebene nach unten:
$$\dot{q}_u = \frac{1}{R_U} (\vartheta_{HE,m} - \vartheta_u)$$

Wärmestrom von der Heizebene nach oben:
$$\dot{q}_{ist} = \frac{1}{R_o} (\vartheta_{HE,m} - \vartheta_i)$$

Umgestellt nach $\vartheta_{HE,m}$:
$$\vartheta_{HE,m} = \vartheta_i + R_o \cdot \dot{q}_{ist}$$

Eingesetzt in die Gleichung für \dot{q}_u :
$$\dot{q}_u = \frac{1}{R_U} (\vartheta_i + R_o \cdot \dot{q}_{ist} - \vartheta_u)$$

R_U in die Klammer gebracht, \dot{q}_{ist} vorgezogen, ergibt die gesuchte Formel

- Darin bedeuten:

$$R_O = R_{\alpha,O} + R_{\lambda,B} + \frac{S_{\ddot{U}}}{\lambda_{\ddot{U}}}$$

(Widerstände: Wärmeübergang oben, Fußbodenbelag, Estrich über Heizebene)

$$R_U = R_{\alpha,U} + R_{\lambda,D\ddot{a}} + R_{\lambda,DE}$$

(Widerstände: Wärmeübergang unten, Dämmung, Decke)

- Praktischer Wert: Wärmeverlust nach unten ca. 10...15 % vom Sollwärmestrom ($\dot{q}_u/\dot{q}_{ist} = 0,1\dots0,15$)

Hydraulische Betrachtungen

- Druckverlust in einer Rohrschleife sollte max. 15...30 kPa betragen (damit ist Δp mit einer normalen Heizungsanlage mit statischen Heizflächen vergleichbar)
- Wegen großer Rohrlängen sollten also Rohre parallel verlegt werden
- Pumpenergie ist größer bei der FBH, da aufgrund der kleineren mittleren Spreizung des Heizwassers (bei gleichem Druckverlust in den Rohren) der Volumenstrom höher als bei einer Heizung mit statischen Heizflächen ist
- Für die Auslegung der Pumpen auch bei FBH den Eigendruckabfall der DDR beachten

Beispiel

Gegeben: Spreizung des Heizwassers 15K;
RA = 8 cm;
 $\dot{q}_{ist} = 50W/m^2$;
 $A_{Register} = 23,4 m^2$

Frage: Wie lang kann in etwa die zu verlegende Rohrlänge sein?
Ist dieser Wert realistisch?

Lösung:

- Verlegeabstand 8cm bedeutet 12,5 Rohrreihen auf 1m
- wenn man den Raum als 23,4 m x 1 m annimmt und ihn streifig mit Rohr bedeckt, so ergeben sich 12,5 Rohrreihe á 23,4m Länge: Verlegung von ca. 300m Rohr
- Leistung: $\dot{Q} = (50 + 0,15 \cdot 50) \cdot 23,4W \approx 1350W$
- Volumenstrom: $\dot{V} = \frac{1350W}{1000kg/m^3 \cdot 4,2kJ/kgK \cdot 15K} = 0,0000214m^3/s$
- Geschwindigkeit: $w = \frac{0,0000214m^3/s}{\pi/4 \cdot 0,014^2m^2} = 0,15m/s$
- Druckverlust: $\Delta p = \frac{300m}{0,014m} \cdot 0,026 \cdot \frac{1000kg/m^3}{2} \cdot 0,15^2m^2/s^2 = 6300Pa$
- obere Begrenzung liegt bei 20 kPa, hier nur 6 kPa gebraucht, also Wert realistisch.
- Berechnung der Registerfläche für andere maximale Druckabfälle:

$$A_{max, 20kPa} = \sqrt[3]{\frac{\Delta p}{20kPa_{max}}}$$

- Rohrnetzauslegung wie immer; ungünstigsten Kreis ermitteln zur Pumpenauslegung; die anderen Kreise durch Voreinstellung hydraulisch abgleichen

Gesamtheizleistung für einen Verteiler

- Leitungen im Estrich dämmen, weil ein Flur (unter dem der Hauptverteiler üblicherweise liegt) nicht beheizt werden soll
- Leistung für einen Verteiler: $\dot{Q} = A_N \cdot (\dot{q}_{ist} + \dot{q}_u) + \dot{q}_L \cdot L_{Zuleitung} + \dot{Q}_{Verteiler}$

3.1. Erste komplexe Aufgabe

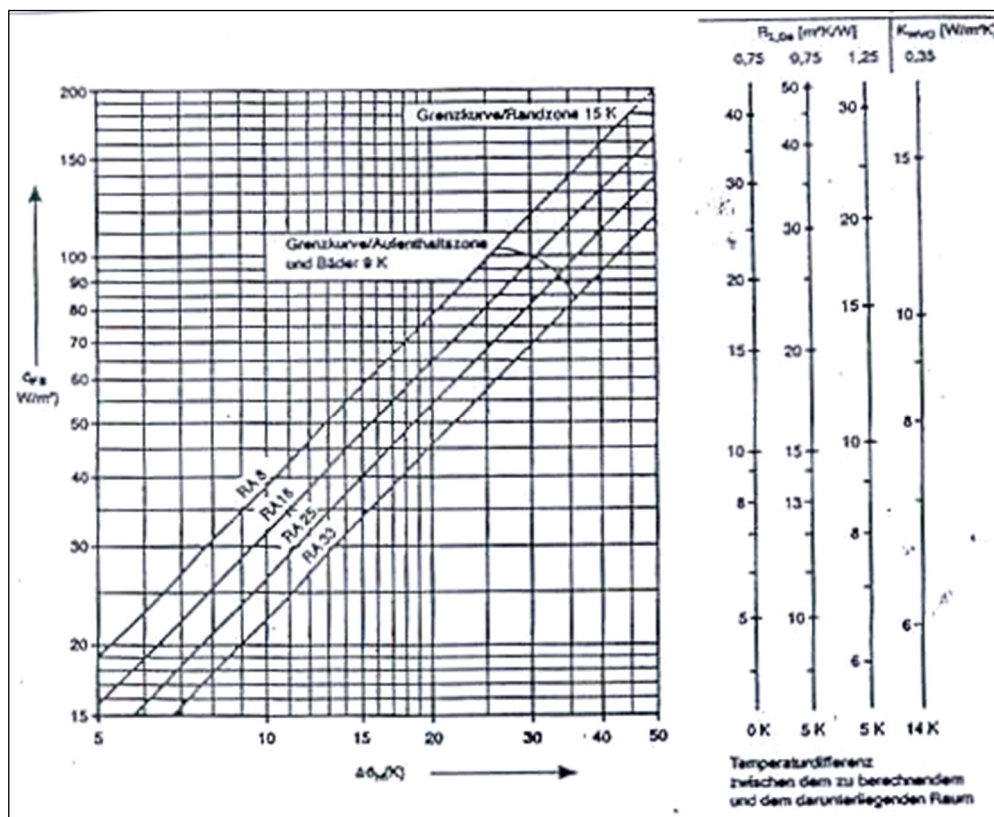
3. Aufgabe

Gegeben ist das Leistungsdiagramm für ein FB-Heizsystem (Siehe nächste Seite). In einem nach unten gegen Erdreich ($6\text{ }^{\circ}\text{C}$) grenzenden Wohnraum eines Gebäudes ($k_u = 0,30\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, also Anforderungen höher als WschV 95) liegt eine Heizlast von 1 kW für 20 m^2 effektiv heizende FB-Oberfläche vor. $T_U = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Die Vorlauftemperatur ist durch die Auslegung eines anderen Raumes mit max. Wärmestromdichte (gewählte min. Spreizung für den Raum mit max. Wärmestromdichte $\sigma_{\min} = 5\text{ K}$) zu $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgegeben.

a) Bestimmen Sie für $R_{\lambda,B} = 0,1\text{ m}^2\text{ K}/\text{W}$ und für den gewählten und den nächst kleineren Verlegeabstand die mittlere Heizwasserübertemperatur aus beigefügtem Diagramm. Welchen Verlegeabstand wählen Sie (mit Begründung)? Bestimmen Sie für diesen Verlegeabstand rechnerisch die Spreizung, die Rücklauftemperatur, die mittlere Temperatur in der Heizebene, den Wärmeverlust ins Erdreich und aus einer selbst erstellten Wärmebilanz den notwendigen Heizwasserstrom.

b) Wie hoch ist unter der Annahme einer isothermen FB-Oberfläche unter den Randbedingungen der Aufgabe und der Gültigkeit der Basiskennlinie für FB-Heizungen die FB-Oberflächentemperatur?



a)

- $\dot{q}_{ist} = 50W/m^2$
- für RA 25 und RA 33 ist die Vorlauftemperatur mit $\vartheta_v = 40^\circ C$ zu gering
- bei RA=16 ergibt sich $\Delta\vartheta_H = 15,5K$
- bei RA=8 ergibt sich $\Delta\vartheta_H = 13K$

b)

- aus Bild 13/17 geschätzt ($\Delta\vartheta_H = 15,5K$ und $\Delta\vartheta_v = 20K$): $\sigma = 8K$
- deshalb: $\frac{\sigma}{\Delta\vartheta_H} = \frac{(\vartheta_v - \vartheta_R)}{\Delta\vartheta_H} = \frac{8}{15,5} > 0,5$ und man muss logarithmisch rechnen
- Spreizung nachrechnen: $\sigma = 3 \cdot 15,5K \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{4 \cdot (20K - 15,5K)}{3 \cdot 15,5K}} - 1 \right] = 8,3K$
- Rücklauftemperatur: $\vartheta_R = \vartheta_v - \sigma = 31,7^\circ C$
- Temperatur der Heizebene: $\vartheta_{HE,m} = \Delta\vartheta_H + \vartheta_i = 35,5^\circ C$ (logarithmisch gerechnet)
- zum Vergleich: $0,5(\vartheta_v + \vartheta_R) = 0,5(40 + 31,5)^\circ C = 35,9^\circ C$ (arithmetisch gerechnet)

c)

- $\dot{q}_u = k_u \cdot (\vartheta_{HE,m} - \vartheta_u) = 8,9W/m^2K$

d)

- $\dot{m} = \frac{(\dot{q}_u + \dot{q}_{ist}) \cdot A_N}{c_p \cdot \sigma} = \frac{20m^2(50 + 8,9)W/m^2}{4200J/kgK \cdot 8,3K} = 122kg/h$

e)

- $\vartheta_{FB,o} = \vartheta_i + \left(\frac{\dot{q}_{ist}}{8,92} \right)^{\frac{1}{1,1}} = 24,8^\circ C$

3.2. Zweite komplexe Aufgabe

Eine FHB für ein Niedrigenergiehaus liefert für den ungünstigsten Raum mit $R_{\lambda,b} = 0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$ eine spezifische Leistung von 40W/m^2 . Eine Vorlauftemperatur von 35°C soll nicht überschritten werden. (bekannte Auslegungsdiagramme)

Fragen:

- Bestimmen Sie $\Delta\vartheta_H$, σ_{\max} und \dot{q}_U , wenn der betrachtete Raum sowie der darunterliegende Raum eine Innentemperatur von 20°C aufweisen.
- Um wieviel Prozent erhöhen sich \dot{q}_U und \dot{q}_O , wenn anstelle von 35°C eine Vorlauftemperatur von 45°C gefahren wird?

Lösung:

a)

- aus Auslegungsdiagramm RA 8 gewählt, weil ab RA 16 und größer mit der gegebenen Vorlauftemperatur die mittlere Übertemperatur nicht erreicht werden kann
- bei RA 8 ist $\Delta\vartheta_H = 12,5\text{K}$
- Abschätzung der Spreizung aus Bild 13/17: $\sigma = 5\text{K}$ (bei $\Delta\vartheta_H = 12,5\text{K}$ und $\Delta\vartheta_V = 15\text{K}$)
- Überprüfung, wie gerechnet werden darf: $\frac{\sigma}{\Delta\vartheta_H} = 0,4 > 0,5$, also ist arithmetisch rechnen zulässig
- mittlere Temperatur der Heizebene: $\vartheta_{HE,m} = \Delta\vartheta_H + \vartheta_i = 32,5^\circ\text{C}$
- Rücklauftemperatur: $\vartheta_R = \vartheta_{HE,m} - (\vartheta_V - \vartheta_{HE,m}) = 30^\circ\text{C}$
- der Verlustwärmestrom nach unten kann für $R_{\lambda,D\ddot{a}} = 0,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $\Delta\vartheta_{\text{oben,unten}} = \text{OK}$ aus dem Leistungsdiagramm abgelesen werden: $\dot{q}_U = 11\text{W/m}^2$

b)

- Ansatz für diese Teilaufgabe: der Massenstrom durch die FBH bleibt gleich, die Temperaturerhöhung kommt zum Beispiel durch eine falsche Einstellung der Heizkurven zustande, die Raumtemperatur bleibt gleich
- es gelten die erste und zweite Heizkörpergleichung:

$$\begin{aligned} 1. \text{ HK-Gl:} & \quad \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_p \cdot (t_{V1} - t_{R1})}{\dot{m}_2 \cdot c_p \cdot (t_{V2} - t_{R2})} \\ 2. \text{ HK-Gl:} & \quad \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{\Delta t_{ln1}}{\Delta t_{ln2}} \right)^{1,1} \end{aligned}$$

die unbekanntenen Größen sind das Verhältnis der Leistungen sowie die Rücklauftemperatur für den Fall der höheren Vorlauftemperatur

3.3. Vorgehensweise bei der Auslegung einer FBH

1. Heizlast für jeden Raum ansetzen; dabei Verluste durch Flächen mit FBH korrigieren
2. den ungünstigsten Raum ermitteln (größte Soll-Wärmestromdichte)
3. einen Rohrabstand für den ungünstigsten Raum sowie alle anderen Räume festlegen
4. für den ungünstigsten Raum mit der Soll-Wärmestromdichte und dem gewünschten Rohrabstand aus dem Leistungsdiagramm die mittlere Heizmittelübertemperatur ermitteln: $\Delta\vartheta_H$
5. die Vor- und Rücklauftemperaturen für den ungünstigsten Raum festlegen
6. aus der Wärmestromdichte nach oben sowie den Widerständen nach oben und unten den Wärmestrom nach unten berechnen
7. mit beiden Wärmeströmen und den Vor- und Rücklauftemperaturen für den ungünstigsten Raum den Wassermassenstrom bestimmen
8. für alle anderen Räume der Soll-Wärmestromdichte und dem gewünschten Rohrabstand aus dem Leistungsdiagramm die mittlere Heizmittelübertemperatur ermitteln: $\Delta\vartheta_H$
9. mit der vorgegebenen Vorlauftemperatur sowie der mittleren Heizmittelübertemperatur $\Delta\vartheta_H$ für jeden Raum die Rücklauftemperatur ermitteln
10. aus der Wärmestromdichte nach oben sowie den Widerständen nach oben und unten für jeden Raum den Wärmestrom nach unten berechnen
11. mit beiden Wärmeströmen und den Vor- und Rücklauftemperaturen für jeden Raum den Wassermassenstrom bestimmen

3.4. Formelsammlung für die FBH

Grundgleichungen

Wärmestrom in den Raum:

$$\dot{q}_{ist} = 8,92 \frac{W}{m^2K^{1,1}} \cdot (\vartheta_{FB,O} - \vartheta_i)^{1,1}$$

Fußbodenoberflächentemperatur:

$$\vartheta_{FB,O} = \vartheta_i + \left(\frac{\dot{q}_{ist}}{8,92} \right)^{\frac{1}{1,1}}$$

Wärmestrom von der Heizebene nach oben

Ist-Wärmestrom in den Raum:

$$\dot{q}_{ist} = \frac{1}{R_o} (\vartheta_{HE,m} - \vartheta_i)$$

Widerstand oben:

$$R_o = R_{\alpha,o} + R_{\lambda,b} + \frac{S_{\dot{U}}}{\lambda_{\dot{U}}}$$

(Wärmeübergang, Fußbodenbelag, Estrich über Heizebene)

Begrenzung für den Fußbodenbelag nach Norm:

$$R_{\lambda,b,max} = 0,15 \frac{m^2K}{W}$$

Empfehlung für den Fußbodenbelag:

$$R_{\lambda,b} = 0,1 \frac{m^2K}{W}$$

Widerstand des Wärmeübergangs:

$$R_{\alpha,o} = 0,093 \frac{m^2K}{W}$$

Wärmestrom von der Heizebene nach unten

Verlust-Wärmestrom rückseitig:

$$\dot{q}_u = \dot{q}_{ist} \cdot \left(\frac{R_o}{R_U} + \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{R_U \cdot \dot{q}_{ist}} \right)$$

Widerstand unten:

$$R_U = R_{\alpha,U} + R_{\lambda,D\ddot{a}} + R_{\lambda,DE}$$

(Wärmeübergang unten, Dämmung, Decke)

Begrenzung für die Dämmung nach Norm:

$$R_{\lambda,D\ddot{a},min} = 1,25 \frac{m^2K}{W}$$

(für Angrenzung an unbeheizte Räume oder Erdreich)

$$R_{\lambda,D\ddot{a},min} = 0,85 \frac{m^2K}{W}$$

(für Angrenzung an beheizte Räume)

Widerstand des Wärmeübergangs:

$$R_{\alpha,u} = 0,17 \frac{m^2K}{W}$$

(zu Räumen nach unten)

$$R_{\alpha,u} = 0,04 \frac{m^2K}{W}$$

(zu Außenluft nach unten)

Temperaturen, allgemein

Damit die höchste auftretende Temperatur im ungünstigsten Raum begrenzt wird, lässt die DIN für den Auslegungsraum bei Auslegung auf der Grenzkurve (maximal zulässige mittlere FB-Oberflächentemperaturen) zu:

$$(\vartheta_V - \vartheta_R) \leq 5K$$

Auslegungsspreizung:

$$\sigma = \vartheta_V - \vartheta_R$$

Vorlaufübertemperatur:

$$\Delta\vartheta_V = \vartheta_V - \vartheta_i$$

Rücklaufübertemperatur:

$$\Delta\vartheta_R = \vartheta_R - \vartheta_i$$

arithmetisch oder logarithmisch rechnen darf man für:

$$\frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\Delta\vartheta_H} \leq 0,5$$

nur logarithmisch rechnen darf man für:

$$\frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\Delta\vartheta_H} > 0,5$$

Temperaturen logarithmisch rechnen:

Diagramm 13/17 sollte zur Abschätzung verwendet werden, aber nur rechts des Maximums

logarithmische Übertemperatur:

$$\Delta\vartheta_H = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}}$$

mittlere Temperatur der Heizebene:

$$\vartheta_{HE,m} = \Delta\vartheta_H + \vartheta_i$$

Auslegungsspreizung:

$$\sigma = 3 \cdot \Delta\vartheta_H \cdot \left[\sqrt{+1 + \frac{4 \cdot (\Delta\vartheta_{V,Ausl} - \Delta\vartheta_H)}{3 \cdot \Delta\vartheta_H}} - 1 \right]$$

Temperatur arithmetisch rechnen:

Diagramm 13/17 kann verwendet werden, aber nur die Seite rechts des Maximums

arithmetische Übertemperatur:

$$\Delta\vartheta_H \approx 0,5(\vartheta_V + \vartheta_R) - \vartheta_i$$

mittlere Temperatur der Heizebene:

$$\Delta\vartheta_{HE,m} = 0,5(\vartheta_v + \vartheta_R)$$

Vorlauftemperatur:

$$\vartheta_v = \vartheta_{HE,m} + 0,5\sigma = \vartheta_i + \Delta\vartheta_H + 0,5(\vartheta_v - \vartheta_R)$$

Rücklauftemperatur:

$$\vartheta_R = \vartheta_{HE,m} - 0,5\sigma = \vartheta_i + \Delta\vartheta_H - 0,5(\vartheta_v - \vartheta_R)$$

Volumenströme:

Massenstrom für einen Raum:

$$\dot{m} = \frac{(\dot{q}_u + \dot{q}_{ist}) \cdot A_N}{c_p \cdot \sigma}$$

Leistung für einen Verteiler:

$$\dot{Q} = A_N \cdot (\dot{q}_{ist} + \dot{q}_u) + \dot{q}_L \cdot L_{Zuleitung} + \dot{Q}_{Verteiler}$$

Hydraulik:

Berechnung der Registerfläche für andere maximale Druckabfälle:

$$A_{max, 20kPa} \sqrt[3]{\frac{\Delta p}{20kPa_{max}}}$$

Quelle: Skript zur Vorlesung "Neue Heiz- und Energietechnologien"
an der Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel;
erarbeitet von Prof. Dr.-Ing. D. Wolff und
erstellt von Dipl.-Ing. (FH) K. Jagnow; Wolfenbüttel; 2000

mit Korrekturen von 2023