

- Skript Wärmeschutz Seite 1 bis 26
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 7 bis 26

Videos

Mechanismen der Wärmeübertragung > <https://www.youtube.com/watch?v=4l8k7krsXJk>

Fragen und Übungsaufgaben

1.1 Nennen die drei wesentlichen Einflussgrößen, die für die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen maßgebend sind.

- Rohdichte
- Feuchtegehalt
- Temperatur

1.2 Wie groß ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Fußbodenoberfläche, wenn die Oberflächentemperatur 23°C und die Raumlufttemperatur 20°C beträgt. (Näherungsformel kann verwendet werden) (2,81 W/m²K)

$$h_k = 2 \cdot |\Delta\theta|^{0,37} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 2,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

1.3 Wie groß ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Fußbodenoberfläche, wenn die Oberflächentemperatur 19°C und die Raumlufttemperatur 22°C beträgt. (Näherungsformel kann verwendet werden) (0,76 W/m²K)

$$h_k = 0,54 |\Delta\theta|^{0,37} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,76 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

1.4 Welche Wärmemenge q pro m² wird in einer Betondecke ($\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1000 \text{ J/kgK}$) mit einer Dicke von 25 cm bei einer Erwärmung um 3 K gespeichert. (500 Wh/m²) .3K

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{V}{A} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta\theta = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 500 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$$

Wie lange kann ein Raum mit einer mittleren Heizlast von 12,5 W/m² mit dieser Wärmemenge beheizt werden? (40 h)

$$q = \dot{q} \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{500 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}}{12,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 40 \text{h}$$

1.5 Die Sonne verhält sich wie ein schwarzer Strahler. Bestimmen Sie die Wärmestromdichte durch Strahlung an der Sonnenoberfläche, wenn die Oberflächentemperatur 5800 K beträgt. ($64,16 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$)

$$\dot{q}_S = \frac{\dot{\Phi}_S}{A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_S^4 = 1,0 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 5800^4 \text{ K}^4 = 64,16 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$$

1.6 Bestimmen Sie Wärmestromdichte der Sonnenstrahlung, die an der Erde (ausserhalb der Erdatmosphäre) zu erwarten ist. (1389 W/m^2)

Abstand Sonne – Erde (Mittelpunkte) $r_{ES} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$

Radius der Sonne $r_S = 696 \cdot 10^6 \text{ m}$

$$\dot{\Phi}_S = \dot{q}_S \cdot A_{\text{Sonne}} = \dot{q}_E \cdot A_{SE}$$

$$\dot{q}_E = \dot{q}_S \cdot \frac{4\pi r_S^2}{4\pi r_{SE}^2} = 64,16 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \left(\frac{0,696 \cdot 10^9}{149,6 \cdot 10^9} \right)^2 = 1389 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

1.7 In einer Turnhalle befindet sich eine Deckenstrahlplatte (grauer Strahler: $\varepsilon = 0,93$) mit einer Oberflächentemperatur von 80°C . Bestimmen Sie die Wärmestromdichte durch Strahlung. (820 W/m^2)

$$\dot{q}_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_S^4 = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot (273,15 + 80)^4 \text{ K}^4 = 820 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

1.8 Bestimmen Sie den flächenspezifischen Wärmeverlust durch Wärmestrahlung bei einem Flachkollektor zwischen Absorber und Glasscheibe für unterschiedliche Beschichtungen der Absorberplatte:

(521 W/m^2 , 61 W/m^2)

Absorberplatte $\theta_A = 100^\circ\text{C}$ $\varepsilon_{A,1} = 0,95$ (schwarze Farbe)

Glasplatte $\theta_G = 30^\circ\text{C}$ $\varepsilon_{A,2} = 0,10$ (selektive Beschichtung)
 $\theta_A = 100^\circ\text{C}$ $\varepsilon_G = 0,88$

$$\dot{\Phi}_{1,2} = C_{1,2} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\dot{q}_S = \frac{\dot{\Phi}_{1,2}}{A_1} = C_{1,2} (T_1^4 - T_2^4) = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot (373,15^4 - 303,15^4) \text{ K}^4}{0,95 + \frac{1}{0,88} - 1}$$

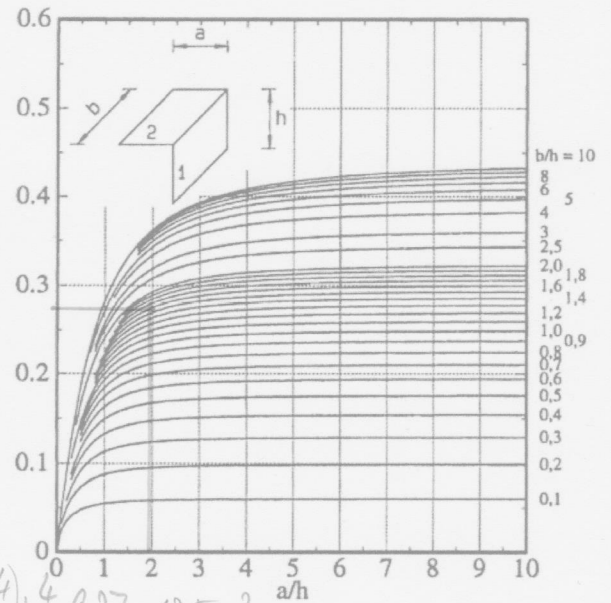
$$\dot{q}_S = 521 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ (schwarze Farbe)}$$

$$\dot{q}_S = 61 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ (selektive Beschichtung)}$$

1.9 Bestimmen Sie die Wärmeleistung, die durch Wärmestrahlung von einer Decke ($\epsilon_2 = 0,93$, $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$) an die Fassade ($\epsilon_1 = 0,90$, $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$) abgegeben wird. Die Länge der Fassade beträgt 5,0 m, die Raumtiefe 3,5 m und die Raumhöhe 2,5 m. (178 W)

$$\left. \begin{array}{l} a/h = 2,0 \\ b/h = 1,4 \end{array} \right\} \text{Diagramm } \varphi_{12} \approx 0,27$$

Einstrahl-
zahl
 φ_{12}



$$\begin{aligned} \Phi_{12} &= q_{12} \cdot A_1 \\ &= \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \varphi_{12} \cdot A_1 \\ &= 0,93 \cdot 0,90 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot (288,15^4 - 299,15^4) \text{K}^4 \cdot 0,27 \cdot 12,5 \text{m}^2 \\ &= -178,5 \text{W} \end{aligned}$$

1.10 Bestimmen Sie die Wärmeleistung, die durch Wärmestrahlung von der Decke (siehe 1.2) an die sonstigen Umschließungsflächen ($\epsilon_3 = 0,91$, $\theta_3 = 21^\circ\text{C}$) abgegeben wird. (353 W)

Reziprozitätsbeziehung $A_1 \cdot \varphi_{12} = A_2 \cdot \varphi_{21}$ (Skript S.22)

$$\varphi_{21} = 0,27 \cdot \frac{12,5 \text{m}^2}{17,5 \text{m}^2} = 0,193$$

Summationsbeziehung $\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1$ (Skript S.22)

$$\varphi_{2,3} = (1 - 0,193) = 0,807$$

$$\begin{aligned} \Phi_{2,3} &= \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_3^4) \cdot \varphi_{2,3} \cdot A_2 \\ &= 0,93 \cdot 0,91 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot (299,15^4 - 294,15^4) \text{K}^4 \cdot 0,807 \cdot 17,5 \text{m}^2 \\ &= 353,8 \text{W} \end{aligned}$$

- Skript Wärmeschutz Seite 27 bis 38
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 26 bis 33

Videos

U-Wert Teil 1 > <https://www.youtube.com/watch?v=IO05RKCpc9I>

U-Wert Teil 2 > <https://www.youtube.com/watch?v=1BWUVYShEeY>

Fragen und Übungsaufgaben

1.1 Geben Sie die Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung (Video U-Wert Teil 1) und die inneren Wärmeübergangswiderstände für ebene Oberflächen an (Skript S. 26; DIN EN ISO 6946)

Wärmestrom aufwärts gerichtet:

$h_K = 5,0 \frac{W}{m^2K}$ $h_S = 5,1 \frac{W}{m^2K}$

$h_{ges} = 10,1 \frac{W}{m^2K}$ $R_{si} = 0,10 \frac{m^2K}{W}$

Wärmestrom horizontal gerichtet:

$h_K = 2,5 \frac{W}{m^2K}$ $h_S = 5,1 \frac{W}{m^2K}$

$h_{ges} = 7,6 \frac{W}{m^2K}$ $R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$

Wärmestrom abwärts gerichtet:

$h_K = 0,7 \frac{W}{m^2K}$ $h_S = 5,1 \frac{W}{m^2K}$

$h_{ges} = 5,8 \frac{W}{m^2K}$ $R_{si} = 0,17 \frac{m^2K}{W}$

1.2 Bestimmen Sie für die Außenwand folgende wärmetechnischen Kenngrößen:

- Wärmeübergangswiderstände
- Wärmedurchlasswiderstand
- Wärmedurchgangswiderstand
- Wärmedurchgangskoeffizient ($U = 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$)

$R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$

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

$R = \frac{0,015 \text{ m}}{0,7 \text{ W/m}^2\text{K}} + \frac{0,365 \text{ m}}{0,080 \text{ W/m}^2\text{K}} + \frac{0,025 \text{ m}}{0,35 \text{ W/m}^2\text{K}} = (0,021 + 4,563 + 0,071) \frac{m^2K}{W} = 4,655 \frac{m^2K}{W}$
98%

$R_T = (0,13 + 4,655 + 0,04) \frac{m^2K}{W} = 4,825 \frac{m^2K}{W}$

$U = \frac{1}{R_T} = 0,21 \frac{W}{m^2K}$

Bauteil: AW-1 Außenwand (Wand gegen Außenluft)

Konstruktion	Nr.	Schicht	Dicke d (m)	Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert [W/(m·K)]
	Wärmeübergangswiderstand R_{si}			
	1	Innenputz, DIN 4108-4 (aus: Kalkgips,	0,015	0,700
	2	Wärmedämmziegel (z.B. Poroton T8)	0,365	0,080
	3	Leichtputz	0,025	0,350
	4			
	5			
Wärmeübergangswiderstand R_{se}				

1.3 Bestimmen Sie den U-Wert für die oberste Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum. ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Wärmestrom aufwärts gerichtet

$$R_{si} = R_{se} = 0,10 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

(s. Skript S.30)

Bauteil: D-1 Dach (oberste Geschossdecke zum unbeh. Dachraum)

Konstruktion	Nr.	Schicht	Dicke d (m)	Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert [W/(m·K)]
Wärmeübergangswiderstand R_{si}				
	1	Spachtelung	0,005	0,700
	2	Stahlbetondecke	0,16	2,3
	3	MW nach Din EN 13162	0,22	0,035
	4			
	5			
	6			
Wärmeübergangswiderstand R_{se}				

$$R_T = (0,10 + \frac{0,005}{0,70} + \frac{0,16}{2,3} + \frac{0,22}{0,035} + 0,10) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 6,562 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

1.4 Berechnen Sie den stationären Temperaturverlauf in dieser mehrschichtigen Außenwand. ($-9,7^\circ\text{C}/-8,7^\circ\text{C}/9,5^\circ\text{C}/19,0^\circ\text{C}/19,2^\circ\text{C}$)

- Gipsputz $\lambda_1 = 0,51 \text{ W/(m K)}$
- Mauerwerk $\lambda_2 = 0,16 \text{ W/(m K)}$
- Wärmedämmung $\lambda_3 = 0,035 \text{ W/(m K)}$
- Vormauerschale $\lambda_4 = 0,68 \text{ W/(m K)}$

$$\dot{q} = U \cdot (\theta_i - \theta_e) = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_T} = \frac{\Delta\theta_i}{R_i}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta_i = \dot{q} \cdot R_i$$

$$U = 1 / (0,13 + \frac{0,015}{0,55} + \frac{0,24}{0,16} + \frac{0,10}{0,035} + \frac{0,115}{0,68} + 0,04) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\dot{q} = 0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (20 - (-10)) \text{K} = 6,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

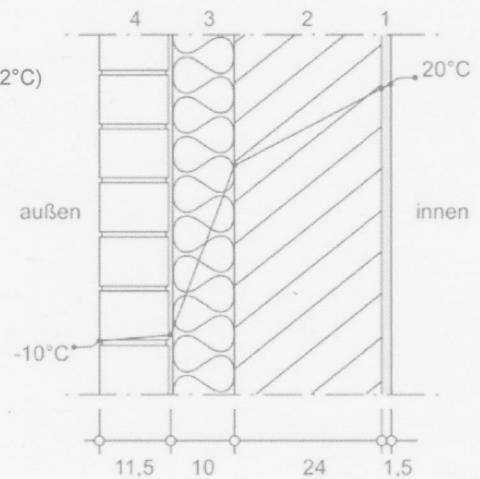
$$\theta_i - \theta_{si} = \dot{q} \cdot R_{si} = 6,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,8 \text{K} \Rightarrow \theta_{si} = 19,2^\circ\text{C}$$

$$\theta_{si} - \theta_{12} = \dot{q} \cdot R_1 = 6,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,03 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,2 \text{K} \Rightarrow \theta_{12} = 19,0^\circ\text{C}$$

$$\theta_{12} - \theta_{23} = \dot{q} \cdot R_2 = 6,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1,50 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 9,5 \text{K} \Rightarrow \theta_{23} = 9,5^\circ\text{C}$$

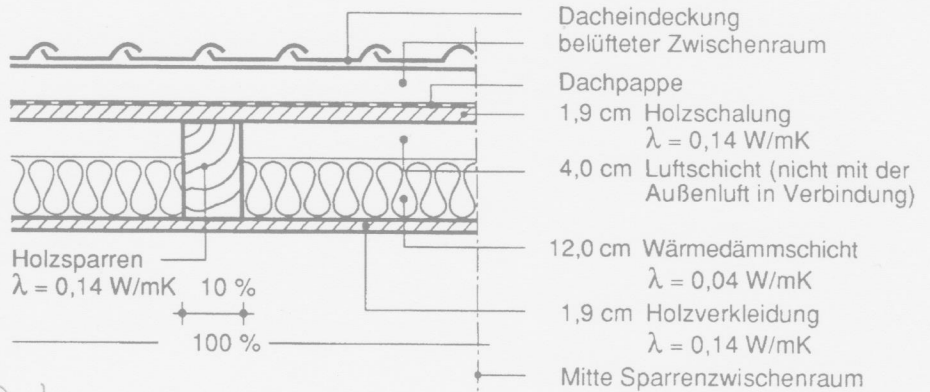
$$\dots \theta_{34} = -8,7^\circ\text{C}$$

$$\dots \theta_{se} = -9,7^\circ\text{C}$$



1.5 Bestimmen Sie für die Steildachkonstruktion mit inhomogenen Schichten folgende Kenngrößen:

- Oberer Grenzwert R_T'
- Unterer Grenzwert R_T''
- Mittelwert R_T
- U-Wert
($U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Oberer Grenzwert R_T'

$$U_{wd} = 1 / \left(0,10 + \frac{0,019}{0,14} + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,16}{0,14} + \frac{0,019}{0,14} + 0,10 \right) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,275 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$U_{sp} = 1 / \left(0,10 + \frac{0,019}{0,14} + \frac{0,16}{0,14} + \frac{0,019}{0,14} + 0,10 \right) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,619 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$U' = U_{wd} \cdot \frac{A_{wd}}{A} + U_{sp} \cdot \frac{A_{sp}}{A} = 0,275 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,90 + 0,619 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,10 = 0,309 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$R_T' = \frac{1}{U'} = 3,232 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Unterer Grenzwert R_T''

$$\lambda_{m,2} = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0,90 + 0,14 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0,10 = 0,05 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\lambda_{m,3} = \left(\frac{0,04 \text{ m}}{0,16 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} \right) \cdot 0,90 + 0,14 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0,10 = 0,24 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luftschicht

$$R_T'' = \left(0,10 + \frac{0,019}{0,14} + \frac{0,12}{0,05} + \frac{0,04}{0,24} + \frac{0,019}{0,14} + 0,10 \right) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 3,039 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Mittelwert R_T und U-Wert

$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2} = 3,136 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

1.6 Stationärer Wärmedurchgang bei einer Einfachverglasung.

- Scheibendicke $d = 5 \text{ mm}$
- Raumlufttemperatur $\theta_i = 20^\circ\text{C}$
- Äußere Oberflächentemperatur $\theta_{se} = -3,14^\circ\text{C}$
- Außenlufttemperatur $\theta_e = -10^\circ\text{C}$

Bestimmen Sie die Wärmestromdichte durch die Glasscheibe. ($171,5 \text{ W/m}^2$)

$$\dot{q} = h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e) = \frac{\theta_{se} - \theta_e}{R_{se}} = \frac{(-3,14 - (-10)) \text{ K}}{0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 171,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Welche Oberflächentemperatur stellt sich auf der Innenseite ein? Gibt es Eisblumen? ($-2,29^\circ\text{C}$)

$$\dot{q} = \frac{\theta_i - \theta_{si}}{R_{si}}$$

$$\theta_{si} = 20^\circ\text{C} - 171,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = -2,29^\circ\text{C}$$

\Rightarrow es gibt Eisblumen

Welche Wärmeleitfähigkeit λ weist die Glasscheibe auf? ($1,01 \text{ W/mK}$)

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \Rightarrow \lambda = \frac{171,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,005 \text{ m}}{(-2,29 - (-3,14)) \text{ K}} = 1,01 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Auf welche Raumlufttemperatur muss der Raum aufgeheizt werden, um Eisblumen zu vermeiden? ($28,9^\circ\text{C}$)

$$\theta_{si} \geq 0^\circ\text{C}$$

$$\dot{q} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\left(\frac{d}{\lambda} + R_{se}\right)} = \frac{(0^\circ - (-10^\circ))}{\frac{0,005 \text{ m}}{1,01 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 222,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\theta_i = \dot{q} \cdot R_{si} + \theta_{si} = 222,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0^\circ\text{C} = 28,9^\circ\text{C}$$

Um wieviel Prozent steigen die Wärmeverluste durch die erhöhte Beheizung? ($29,7\%$)

$$\frac{\dot{q} - \dot{q}_0}{\dot{q}_0} = \frac{(222,5 - 171,5) \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{171,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,297$$

\Rightarrow Anstieg um $29,7\%$

- Skript Wärmeschutz 2. Wärmeschutz Seite 39 bis 3. Wärmebrücken S.38
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 34 bis 50

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform

MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBauphysik

verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 3. Wärmebrücken <https://youtu.be/X07IF-ZY7BI>

Fragen und Übungsaufgaben

1 U-Wert-Berechnung eines Fensters

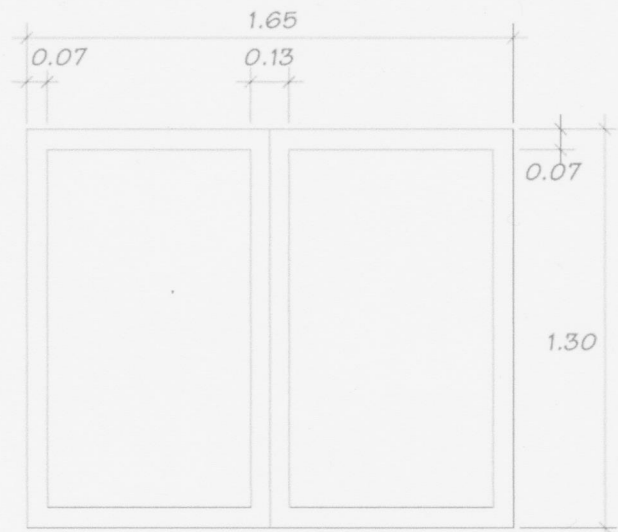
1.1 Bestimmen Sie den Rahmenanteil entsprechend der dargestellten Fensterskizze. (25,4 %)

$$A_g + A_f = 1,65 \text{ m} \times 1,3 \text{ m} = 2,145 \text{ m}^2$$

$$A_g = 1,38 \text{ m} \times 1,16 \text{ m} = 1,60 \text{ m}^2$$

$$A_f = 0,545 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_f}{A_g + A_f} = 0,254$$



1.2 Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient des Glas-Rahmenverbunds weist ein Wert von $\Psi_g = 0,06 \text{ W/mK}$. Bestimmen Sie die Gesamtlänge des Glas-Rahmenverbunds. (7,4 m)

$$l_g = (1,38 \text{ m} \times 2 + 1,16 \text{ m} \times 4) = 7,40 \text{ m}$$

1.3 Bestimmen Sie den U-Wert des Fensters, wenn der Rahmen einen U-Wert von $U_f = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ und die Verglasung einen U-Wert von $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweist. (0,834 $\text{W/m}^2\text{K}$)

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \Psi_g}{A_g + A_f} = \frac{(1,60 \text{ m}^2 \cdot 0,50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 0,545 \text{ m}^2 \cdot 1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 7,4 \text{ m} \cdot 0,06 \frac{\text{W}}{\text{mK}})}{2,145 \text{ m}^2}$$

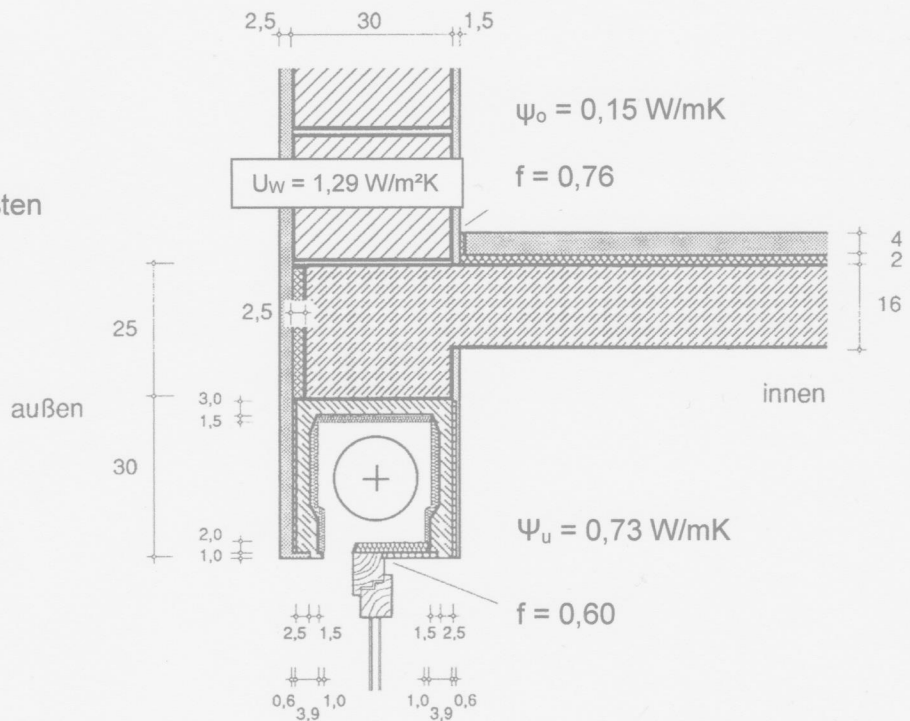
$$U_w = 0,834 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2 Wärmebrücken

Fensteranschluss Rolladenkasten

Raumtemperatur: 20°C

Außentemperatur: -10°C



2.1 Welche minimale innere Oberflächentemperatur ergibt sich bei dieser Wärmebrücke im oberen Raum? (12,8°C)

$$f = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \Rightarrow \theta_{si} = 0,76 \cdot 30 \text{ K} - 10^\circ \text{C} = 12,8^\circ \text{C}$$

2.2 Welche minimale innere Oberflächentemperatur ergibt sich bei dieser Wärmebrücke im unteren Raum? (8,0°C)

$$\theta_{si} = 0,60 \cdot 30 \text{ K} - 10^\circ \text{C} = 8,0^\circ \text{C}$$

2.3 Bestimmen Sie zusätzlichen Transmissionswärmeverluste durch die dargestellte Wärmebrücke (incl. Geschoßdecke) mit einer Länge von 2 m. (52,8 W)

$$\begin{aligned} \phi_{WB} &= (\psi_o + \psi_u) \cdot L \cdot (\theta_i - \theta_e) = (0,15 + 0,73) \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 2 \text{ m} \cdot 30 \text{ K} \\ &= 52,8 \text{ W} \end{aligned}$$

2.4 Bestimmen Sie die Fläche der Außenwand, die die gleichen Transmissionswärmeverluste aufweist. (1,36 m²)

$$\begin{aligned} \phi_{AW} &= U_{AW} \cdot A \cdot \Delta\theta = \phi_{WB} \\ A &= \frac{52,8 \text{ W}}{1,29 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 30 \text{ K}} = 1,36 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3 Wärmebrücken

Für die Geschossdecke eines Passivhauses wurde die dargestellte Deckeneinbindung geplant. Der U-Wert der Außenwand beträgt $U_{AW} = 0,136 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die Wärmebrücke ist im Wärmebrückenkatalog bezogen auf die Innenseite angeben:

Oben:

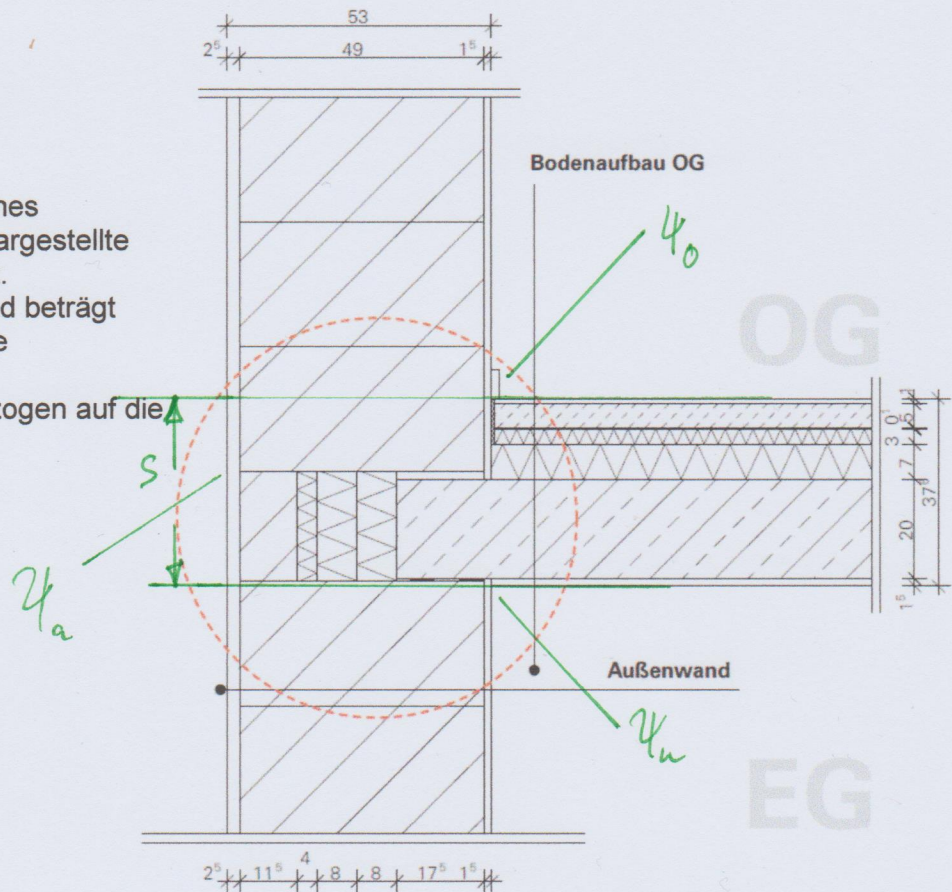
$$\Psi_o = 0,01 \text{ W/mK}$$

$$f_{Rsi} = 0,99$$

Unten:

$$\Psi_u = 0,05 \text{ W/mK}$$

$$f_{Rsi} = 0,96$$



3.1 Bestimmen Sie für die dargestellte Deckeneinbindung die minimale raumseitige Oberflächentemperatur bei den Randbedingungen $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ und $\theta_e = -15^\circ\text{C}$. ($18,6^\circ\text{C}$)

$$\theta_{si, \min} = 0,96 \cdot (20 - (-15))\text{K} + (-15^\circ\text{C}) = 18,6^\circ\text{C}$$

3.2 Bestimmen Sie den äußeren Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ_a für die Bilanzierung über die Außenflächen (Hinweis: Stellen Sie eine Wärmebilanz für die Innen- und Außenoberfläche für dieser Wärmebrücke auf). ($0,009 \text{ W/mK}$)

Wärmebilanz innen = Wärmebilanz aussen

$$(\Psi_u + \Psi_o) \cdot K \cdot A_0 = \left(U_{AW} \cdot \frac{s \cdot K}{A_{AW}} + \Psi_a \cdot K \right) \cdot A_0$$

$$\Psi_a = \Psi_u + \Psi_o - U_{AW} \cdot s$$

$$= (0,05 + 0,01) \text{ W/mK} - 0,136 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,375 \text{ m} = 0,009 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

3.3 Bei Gebäuden mit hohem Wärmeschutzstandard sollen die Wärmebrücken möglichst eliminiert werden. Beschreiben Sie den Idealfall, der anzustreben ist.

Idealfall: Die dämmende Hülle umgibt das Gebäude vollkommen lückenlos geschlossen und in fortlaufend gleicher Dicke

- Skript Wärmeschutz 4.Lüftung
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 51 bis 60
- Komfortlüftungsanlagen LfU Bayern 2019

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 4. Lüftung

<https://youtu.be/-SyGSZdq-gQ>

Wärmerückgewinnungssysteme

<https://www.youtube.com/watch?v=YshYvD48IkM>

Wohnungszentrale Lüftung ohne Zuluftleitungen

<https://www.youtube.com/watch?v=FVH3ZLGYU2Y>

<https://www.youtube.com/watch?v=XVa18E9436A>

https://blumartin.de/wp-content/uploads/pdf/Prospekte/Broschuere_freeAir_2019_D.pdf

Fragen und Übungsaufgaben

1 Komfortlüftungsanlagen für Wohngebäude

1.1 Nennen Sie drei wesentliche Aufgaben einer Lüftungsanlage.

- Erneuerung der Raumluft (Luftfeuchte und Schadstoffe begrenzen)
- Aufbereitung der Luft (Reinigung, Heizen, Kühlen, ...)
- Wärmerückgewinnung und Komfortsteigerung

1.2 Nennen Sie die Vor- und Nachteile von dezentralen Komfortlüftungsanlagen im Vergleich zu zentralen Anlagen im Mehrfamilienhäuser.

- + individuelle Regelung durch Nutzer
- + kein Wohn- und Nutzflächenverlust
- + geringe Investitionskosten
- + keine Brandschutzmaßnahmen
- höhere Wartungskosten (Filterwechsel)
- Ansammlung über Fassade (optische Beeinträchtigung)
- Kondensatableitung

1.3 Geben Sie den in etwa zu erwartenden Wirkungsgrad folgender Wärmerückgewinnungssysteme an. (Video Firma Trox)

- | | | |
|------------------------------------|-----------|---|
| a) Kreuzstrom-Wärmeübertrager | <u>60</u> | % |
| b) Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager | <u>85</u> | % |
| c) Rotationswärmeübertrager | <u>75</u> | % |

1.4 Geben Sie einen wesentlichen Vorteil des Rotationswärmeübertragers an.

Fensterrückgewinnung

1.5 Nach **DIN 1946-6** *s. Anlage S.3* sind Planer verpflichtet ein Lüftungskonzept bei Neubauten und Sanierungen zu erstellen. Hierbei werden 4 Lüftungsstufen unterschieden. Geben Sie die jeweiligen Mindestwerte für den Außenluftvolumenstrom für eine Wohnung mit 130 m² an.

1. Lüftung zum Feuchteschutz	<u>40</u>	m ³ /h	<i>(hohe Belegung, hohe Wärmehitz)</i>
2. Reduzierte Lüftung	<u>90</u>	m ³ /h	
3. Nennlüftung	<u>125</u>	m ³ /h	
4. Intensivlüftung	<u>165</u>	m ³ /h	

1.6 Berechnen Sie den spezifischen Lüftungswärmebedarf eines Wohngebäudes mit folgendem Ansatz:

$$q_{h, \text{Lüftung}} = n \cdot V/A_{EB} \cdot \rho \cdot c_p \cdot F_{Gt} \cdot (1 - \eta_{WRG})$$

mit $V/A_{EB} = 2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Raumvolumen/Energiebezugsfläche) X

$$\rho \cdot c_p = 0,34 \text{ Wh/m}^3\text{K} \text{ (Stoffwerte von Luft)}$$

$$F_{Gt} = 66 \text{ kWh/a} \text{ (Gradtagzahlfaktor für Neubauten)}$$

a) Luftwechsel $n = 0,7$ 1/h (nach Energieeinsparverordnung) ohne Wärmerückgewinnung

$$q_{h, \text{Lüftung}} = 0,7 \frac{1}{h} \cdot 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot 66 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot (1 - 0) = 39,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

b) Luftwechsel $n = 0,25$ 1/h (Messungen bei Fensterlüftung) ohne Wärmerückgewinnung

$$q_{h, \text{Lüftung}} = 0,25 \frac{1}{h} \cdot 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot 66 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot (1 - 0) = 14,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

c) Luftwechsel $n = 0,4$ 1/h mit Wärmerückgewinnung ($\eta_{WRG} = 0,80$)

$$q_{h, \text{Lüftung}} = 0,4 \cdot \frac{1}{h} \cdot 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot 66 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot (1 - 0,80) = 4,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

1.7 Geben Sie die in etwa zu erwartenden Investitionskosten für die Lüftungsanlage eines Einfamilienhauses an.

- | | | |
|--------------------------------------|--------------|---|
| a) Abluftanlage | <u>2.500</u> | € |
| b) Komfortlüftungsanlage (normal) | <u>8.000</u> | € |
| c) Komfortlüftungsanlage (optimiert) | <u>6.500</u> | € |

(siehe Komfortlüftungsanlagen LfU Bayern S.15)

Tabelle 7 — $q_{v,ges,NE}$ in m^3/h für Nutzungseinheiten (NE) ^{a,b}

Fläche der Nutzungseinheit A_{NE}^c m^2		≤ 20	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch $q_{v,ges,NE,FLh}$	geringe Belegung ^d	k.A.	k.A.	15	15	20	25	25	30	30	30	35
	hohe Belegung	10	15	20	25	30	35	40	40	45	45	50
Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz gering $q_{v,ges,NE,FLg}$	geringe Belegung ^d	k.A.	k.A.	20	25	30	35	40	40	45	45	50
	hohe Belegung	15	20	25	35	40	45	50	55	60	65	65
Reduzierte Lüftung $q_{v,ges,NE,RL}$		25	30	45	55	70	80	90	95	105	110	115
Nennlüftung ^e $q_{v,ges,NE,NL}$		35	45	65	80	100	115	125	140	150	155	165
Intensivlüftung $q_{v,ges,NE,IL}$		45	55	85	105	130	145	165	180	195	205	215

- ^a Die Tabellenwerte sind auf $5 m^3/h$ gerundet.
- ^b Einschließlich Infiltration.
- ^c Beheizte Fläche A_{NE} innerhalb der Gebäudehülle, die im Rahmen des Lüftungskonzeptes zu berücksichtigen ist:
 - bei Flächen der NE $A_{NE} < 20 m^2$ (je Wohnung bzw. Nutzungseinheit) wird $A_{NE} = 20 m^2$ gesetzt,
 - bei Flächen der NE $A_{NE} > 210 m^2$ (je Wohnung bzw. Nutzungseinheit) sind die planmäßigen Außenluftvolumenströme anzupassen, indem der für $210 m^2$ bestimmte Volumenstrom für die Nennlüftung um $4 m^3/h$ je $10 m^2$ zusätzliche Wohnfläche erhöht wird. Eine Verringerung der Luftvolumenströme mit größer werdender Fläche der Nutzungseinheit ist nicht zulässig.
- ^d Lüftung zum Feuchteschutz: Von einer geringen Belegung kann ausgegangen werden, wenn bei planmäßiger Nutzung eine Nutzungsfläche von $\geq 40 m^2/Person$ vorhanden ist.
- ^e Nennlüftung: Eine aus Lüftungssicht planmäßig zulässige Personenzahl in einer Nutzungseinheit kann bestimmt werden, indem der für Nennlüftung angegebene Gesamt-Außenluftvolumenstrom durch ungefähr $30 m^3/h$ je Person geteilt wird, z. B. Nutzungseinheit mit $110 m^2$: $120 m^3/h / 30 m^3/(h*Pers.) = 4$ Personen (gerundeter Wert). Das entspricht in Bezug auf die NE Kat I bis Kat II der DIN EN 15251:2012-12²⁾, Tabelle B.5.

In Ausnahmefällen kann bei intensiv genutzten Nutzungseinheiten die aus Lüftungssicht planmäßig zulässige Personenzahl bestimmt werden, indem der für Nennlüftung angegebene Gesamt-Außenluftvolumenstrom durch $20 m^3/h$ je Person geteilt wird (entspricht in Bezug auf die NE Kat III der DIN EN 15251:2012-12²⁾, Tabelle B.5).

Bei erhöhten Anforderungen (z. B. bei über die üblichen Werte hinausgehenden, hohen Schadstofflasten) können die Außenluftvolumenströme erhöht werden, siehe Nationaler Anhang NA der DIN EN 15251:2012-12²⁾.

6.2 Außenluftvolumenstrom durch Infiltration (Einfluss der Gebäudehülle)

Jede Gebäudehülle besitzt eine bestimmte, bautechnisch nicht vermeidbare Undichtheit, die bei Auftreten eines natürlich verursachten Differenzdruckes zur In- und Exfiltration (im Weiteren nur noch als Infiltration bezeichnet) von Außenluft führt. Bei der Auslegung von Lüftungssystemen im Sinne dieser Norm ist der für die Auslegung wirksame Außenluftvolumenstrom durch Infiltration $q_{v,Inf,wirk}$ näherungsweise nach Gleichung (9) zu berechnen bzw. der zugehörige Infiltrations-Luftwechsel ist zu berücksichtigen.

2) Gilt sinngemäß auch für DIN EN 16798-1.

- Skript Wärmeschutz 5. Wärme- und Energiebilanzen
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 61 bis 92

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GK Bauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 5. Wärme- und Energiebilanzen <https://www.youtube.com/watch?v=seB50lj5JeQ>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient eines Fensters

1.1 Bestimmen Sie den äquivalenten U-Wert eines Fensters für die verschiedenen Himmelsrichtungen in einem Passivhaus im Bestand.

($U_w = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_g = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,51$)

$$U_{\text{eq,w}} = U_w - g \cdot g_F$$

$$\text{Süd} \quad U_{\text{eq,w}} = (0,95 - 0,51 \cdot 2,4) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = -0,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\text{Ost/West} \quad U_{\text{eq,w}} = (0,95 - 0,51 \cdot 1,65) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,11 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\text{Nord} \quad U_{\text{eq,w}} = (0,95 - 0,51 \cdot 0,95) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

1.2 Bestimmen Sie den äquivalenten U-Wert eines Fensters für die verschiedenen Himmelsrichtungen in einem Niedrigenergiehaus. ($U_w = 1,44 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,63$)

$$\text{Süd} \quad U_{\text{eq,w}} = (1,44 - 0,63 \cdot 2,4) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = -0,07 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\text{Ost/West} \quad U_{\text{eq,w}} = (1,44 - 0,63 \cdot 1,65) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\text{Nord} \quad U_{\text{eq,w}} = (1,44 - 0,63 \cdot 0,95) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2 Gebäudebilanzen

2.1 Welche Verluste werden bei der Umrechnung des Endenergie- in den Primärenergiebedarfs berücksichtigt?

Verluste bei Gewinnung, Umwandlung und Transport

2.2 Wie ist die Anlagen-Aufwandszahl e_p definiert?

$$e_p = \frac{Q_{p,el}}{Q_h + Q_w} = \frac{\text{Primärenergiebedarf}}{\text{Nutzenergiebedarf}}$$

2.3 Bestimmen Sie den Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne bei einem Einfamilienhaus für den Monat Januar mit folgenden Parametern:

Solare und interne Wärmegewinne
Monatlicher Heizwärmebedarf (Transmission und Lüftung)
Bruttovolumen des Gebäudes
Wärmetransferkoeffizient der Gebäudezone

$Q_{\text{source}} = 1639,5 \text{ kWh}$
 $Q_{\text{sink}} = 4623,1 \text{ kWh}$
 $V_e = 1088 \text{ m}^3$
 $H = H_T + H_V = 306,1 \text{ W/K}$

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit kann näherungsweise für ein leichtes Gebäude bestimmt werden.

$$C_{\text{Wirk}} = 15 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot V_e = 15 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot 1088 \text{ m}^3 = 16.322 \frac{\text{Wh}}{\text{K}}$$

$$\gamma = \frac{Q_{\text{source}}}{Q_{\text{sink}}} = \frac{1639,5 \text{ kWh}}{4623,1 \text{ kWh}} = 0,355$$

$$\tau = \frac{C_{\text{Wirk}}}{H} = \frac{16.322 \text{ Wh/K}}{306,1 \text{ W/K}} = 53,3 \text{ h}$$

$$a = 1 + \frac{\tau}{16 \text{ h}} = 1 + \frac{53,3 \text{ h}}{16 \text{ h}} = 4,33$$

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} = \frac{1 - 0,355^{4,33}}{1 - 0,355^{5,33}} = 0,993$$

2.4 Für welche Gebäude kann das Berechnungsverfahren nach DIN V 4701-10 verwendet werden?

Wohngebäude ohne Kühlung

- Skript Wärmeschutz 6. Instationäres Verhalten von Bauteilen und Gebäuden
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 93 bis 116

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GK Bauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 6. Instationäres Verhalten <https://youtu.be/oZ9cZISWW9w>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Kontaktemperatur

Bestimmen Sie Kontakttemperatur, wenn eine Hand eine Eisen- oder Korkoberfläche unter folgenden Randbedingungen berührt: 5°C

Hand	$\theta_1 = 30^\circ\text{C}$	$b_1 = 1100 \text{ J}/(\text{s}^{0.5}\text{m}^2\text{K})$
Eisen	$\theta_2 = 20^\circ\text{C}$	$b_2 = 14000 \text{ J}/(\text{s}^{0.5}\text{m}^2\text{K})$
Kork	$\theta_3 = 20^\circ\text{C}$	$b_3 = 200 \text{ J}/(\text{s}^{0.5}\text{m}^2\text{K})$

$$\theta_{12} = \frac{b_1 \cdot \theta_1 + b_2 \cdot \theta_2}{b_1 + b_2} = 6,8^\circ\text{C}$$

$$\theta_{13} = \frac{b_1 \cdot \theta_1 + b_3 \cdot \theta_3}{b_1 + b_3} = 26,2^\circ\text{C}$$

2 Instationäres Verhalten von Bauteilen

2.1 Wie ist beim Durchgang einer Temperaturwelle das Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) und die Phasenverschiebung Δt definiert.

$$\text{TAV} = \frac{\theta_{si, \text{Amp}}}{\theta_{se, \text{Amp}}}$$

Δt : Zeitverschiebung zwischen innenem und außenem Maximum

2.2 Bei einem monolithischen Mauerwerk ($d = 36,5 \text{ cm}$, $\rho = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$) beträgt die Temperaturamplitude um 14:00 Uhr auf der Außenseite $\theta_{se, \text{Amp}} = 12 \text{ K}$. Geben Sie den Zeitpunkt und die Höhe der Temperaturamplitude auf der Innenseite an.

s. Folie 8, Zeile 3

$$\text{TAV} = 0,047 \Rightarrow \theta_{si, \text{Amp}} = 0,047 \cdot 12 \text{ K} = 0,56 \text{ K} \quad (04:12 \text{ Uhr})$$

2.3 Bei welchen Außenwandkonstruktionen variiert die Wärmestromdichte über einen Tagesgang am meisten?

Folie 11/12 \rightarrow I. Außen-Lichtkonstruktion

3 Sommerliches Verhalten von Gebäuden

3.1 Welche Fassadenorientierung ist hinsichtlich der sommerlichen Aufheizung von Räumen am ungünstigsten?

Westfassade

3.2 Nennen Sie drei wirksame passive Maßnahmen, um im in einer Hitzeperiode im Sommer den Temperaturanstieg im Raum zu begrenzen?

- außen liegender Sonnenschutz
- geringer Fensterflächenanteil
- erhöhte Nachtlüftung

4 Winterliches Verhalten von Gebäuden

Für ein Mehrfamilienhaus sind folgende Angaben bekannt:

Bruttovolumen des Gebäudes	$V_e = 3000 \text{ m}^3$
Raumvolumen (Nettovolumen)	$V = 2400 \text{ m}^3$
Spezifischer Transmissionswärmebedarf	$H_T = 260 \text{ W/K}$
Mittlerer Luftwechsel	$n = 0,24 \text{ 1/h}$
Raumlufttemperatur	$\theta_i = 20^\circ\text{C}$
Mittlere Außentemperatur im Winter	$\theta_e = 5^\circ\text{C}$

4.1 Bestimmen Sie den spezifischen Lüftungswärmebedarf.

$$H_V = 0,24 \frac{1}{h} \cdot 2400 \text{ m}^3 \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} = 196 \frac{\text{Wh}}{\text{K}}$$

4.2 Bestimmen Sie für einen mittleren Wintertag die Wärmemenge, die durch Transmission und Lüftung bei einer Nachtabstaltung der Heizungsanlage über $\Delta t = 12 \text{ h}$ abgegeben wird.

$$\Phi_{T+V} = (H_T + H_V) \cdot (\theta_i - \theta_e) = (260 + 196) \frac{\text{Wh}}{\text{K}} \cdot (20 - 5) \text{K} = 6,84 \text{ kW}$$

$$Q = \Phi_{T+V} \cdot \Delta t = 6,84 \text{ kW} \cdot 12 \text{ h} = 82,1 \text{ kWh}$$

4.3 Bestimmen Sie näherungsweise die wirksame Wärmespeicherefähigkeit für ein schweres Gebäude und die Temperaturänderung bei der Nachtabstimmung.

$$C_{\text{wink}} \approx 50 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot V_e = 150 \frac{\text{kWh}}{\text{K}} \quad (\text{Näherung für schwere Gebäude})$$

$$Q = \sum_i m c_p \cdot \Delta \theta \approx C_{\text{wink}} \cdot \Delta \theta$$

$$\Delta \theta = \frac{82,1 \text{ kWh}}{150 \frac{\text{kWh}}{\text{K}}} = 0,55 \text{ K}$$

- Skript Wärmeschutz 7. Bewertung von Maßnahmen zur Heizenergieeinsparung
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 117 bis 122

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBAuphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 7. Bewertung von Maßnahmen zur Heizenergieeinsparung

<https://youtu.be/q0AugOXMKkc>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Wie ist die statische Amortisationszeit definiert?

$$j = \frac{\text{Investitionsmehrkosten}}{\text{jährl. Heizkostenersparnis}}$$

2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei einer Fenstererneuerung in einem Einfamilienhaus.

Ein Einfamilienhaus wird energetisch modernisiert und wärmeschutztechnisch auf Neubauniveau gebracht. Für den Bauherrn stehen zwei Varianten für die Fenster zur Auswahl:

1. Variante

- 2-fach-Wärmeschutzverglasung mit Kunststoffrahmen
 $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_f = 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_w = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g = 0,58$
- Flächenspezifische Investitionskosten $K_{i,1} = 382 \text{ €/m}^2$

2. Variante

- 3-fach-Wärmeschutzverglasung mit Kunststoffrahmen
 $U_g = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_f = 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_w = 1,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g = 0,50$
- Flächenspezifische Investitionskosten $K_{i,1} = 438 \text{ €/m}^2$

Weitere Angaben:

- Südfassade
- Wärmeerzeugung mit Gas-Brennwertkessel
- Brennstoffkosten $0,07 \text{ €/kWh}$ $0,14 \text{ €/kWh}$
- Preissteigerungsrate Energie 5%
- Zinssatz 4%

2.1 Bestimmen Sie den flächenspezifischen Transmissionswärmebedarf (äquivalenter U-Wert) für beide Varianten. ($-6,07 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, $-12,54 \text{ kWh/m}^2\text{a}$)

$$q_{tr} = \frac{Q_{tr}}{A_{Bau teil}} = F_x \cdot U \cdot F_{G,T} = F_x \cdot U_{w,eq} \cdot F_{G,T}$$

$$U_{w,eq,1} = 1,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - 0,58 \cdot 2,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = -0,092 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad q_{tr,1} = 10 \cdot (-0,092) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 66 \frac{\text{h}}{\text{a}} = -6,07 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$$

$$U_{w,eq,2} = 1,01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - 0,50 \cdot 2,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = -0,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad q_{tr,2} = 10 \cdot (-0,19) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 66 \frac{\text{h}}{\text{a}} = -12,54 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$$

2.2 Bestimmen Sie die flächenspezifische Heizenergieeinsparung von Variante 2 gegenüber Variante 1. (7,76 kWh/m²a)

$$\Delta q_E = (q_{h,1} - q_{h,2}) \cdot e = (-6,07 - (-12,54)) \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}} \cdot 1,2 = 7,76 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

2.3 Bestimmen Sie die flächenspezifische Brennstoffeinsparung und Energiekosteneinsparung. (0,776 m³/m²a, 0,54 €/m²a)

$$\Delta B = \frac{\Delta q_E}{b} = \frac{7,76 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 0,776 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$\Delta K_E = \Delta q_E \cdot k = 7,76 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}} \cdot 0,07 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,54 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

1,08 €/m²a

2.4 Bestimmen Sie die dynamische Amortisationszeit für Variante 2. (74,3 a)

- Investitionsmehr kosten ΔK_I

$$\Delta K_I = K_{I,2} - K_{I,1} = (438 - 382) \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 56 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$$

- statische Amortisationsdauer

$$j = \frac{\Delta K_I}{\Delta K_E} = \frac{56 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}}{0,54 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{a}}} = 103,7 \text{ a}$$

- dynamische Amortisationsdauer n

$$n = \frac{\ln \left[i \cdot q \left(\frac{i}{q} - 1 \right) + 1 \right]}{\ln \frac{i}{q}} = \frac{\ln \left[103,7 \cdot 1,04 \left(\frac{1,05}{1,04} - 1 \right) + 1 \right]}{\ln \left(\frac{1,05}{1,04} \right)} = 74,3 \text{ a}$$

$n = 43,6 \text{ a}$

2.5 Bestimmen Sie die dynamische Amortisationszeit für Variante 2, wenn das Fenster sich in der Nordfassade befindet. (40,3 a)

Berechnung wie vorher:

$$U_{w,eq,1} = 0,749 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$q_{h,1} = 49,43 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$U_{w,eq,2} = 0,535 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$q_{h,2} = 35,31 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$\Delta q_E = 16,94 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$\Delta K_E = 1,19 \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$j = 47,1 \text{ a}$$

$$n = 40,3 \text{ a}$$

$n = 22,1 \text{ a}$

- Skript Wärmeschutz 8. Wärmeschutztechnische Anforderungen
- Lehrbuch der Bauphysik Seite 123 bis 140

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GK Bauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 8. Wärmeschutztechnische Anforderungen <https://youtu.be/A4DITyjCqyk>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Wärmeschutztechnische Vorschriften – DIN 4108

1.1 Welche Zielsetzung haben die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108?

*Mindestwärmeschutz an jeder Stelle
 => hygienisches Raumklima, Vermeidung von Schimmelbildung*

1.2 Welche Anforderung ist an ungünstigen Stellen beim Temperaturfaktor einzuhalten?

$$f_{Rsi} \geq 0,70$$

2 Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz

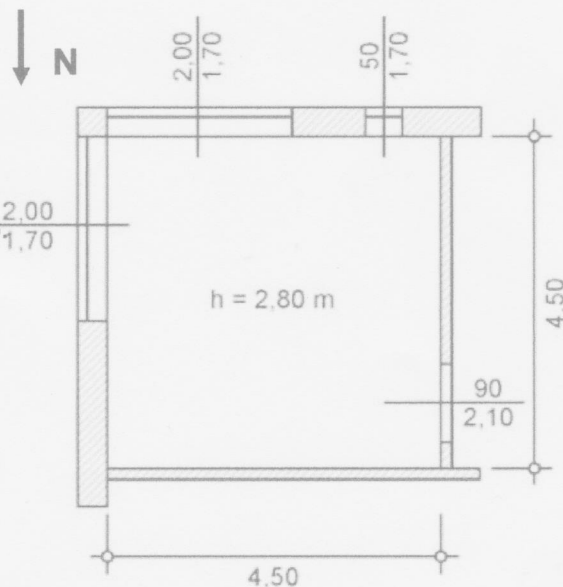
Für den Eckraum eines Wohngebäudes (schwere Bauart) in München soll der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes geführt werden. Der Energiedurchlassgrad aller Fenster beträgt $g = 0,58$. Ein Sonnenschutz ist zunächst nicht geplant.

2.1 Bestimmen Sie den vorhandenen Sonneneintragskennwert ($S_{vorb} = 0,219$)

$$S_{vorb} = \frac{\sum_j A_{w,j} \cdot g_{total,j}}{A_G}$$

$$= \frac{7,65 \text{ m}^2 \cdot 0,58 \cdot 1,0}{(4,5 \times 4,5) \text{ m}^2} = 0,219$$

$$A_{w} = 2 \times (2 \text{ m} \times 1,7 \text{ m}) + 0,5 \text{ m} \times 1,7 \text{ m} = 7,65 \text{ m}^2$$



2.2 Bestimmen Sie den zulässigen Sonneneintragskennwert. ($S_{zul} = 0,0857$)

$S_1 = 0,113$ Folie 14 (Klimaregion B, schwere Bauart, erhöhte Nachlüftung)

$S_2 = a - b \cdot f_{WG} = a - b \cdot \frac{A_w}{A_a} = 0,060 - 0,231 \cdot \frac{7,65 \text{ m}^2}{20,25 \text{ m}^2} = -0,0273$

$S_{zul} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 = 0,113 - 0,0273 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0,0857$

$S_{vork} > S_{zul} \Rightarrow$ Nachweis nicht erfüllt

2.3 Welcher Sonnenschutz ist für die Einhaltung des Nachweises erforderlich? ($F_c \leq 0,39$)

$S_{vork} \cdot F_c \leq S_{zul} \Rightarrow F_c \leq \frac{0,0857}{0,279} = 0,307$

\Rightarrow außenliegender Sonnenschutz mit $F_c = 0,25$ wäre ausreichend

3 Gebäudeenergiegesetz GEG 2020

3.1 Welche beiden Hauptanforderungen enthält das GEG?

$Q_{p,vork} \leq 0,75 \cdot Q_{p,Referenzg.}$

$H_{T,vork} \leq H_{T,Referenzg.}$

3.2 Wie wird eine PV-Anlage mit Stromspeicher nach GEG angerechnet?

- 200 kWh je kWp
- 100% des elektrischen Endenergiebedarfs
- max. 45% des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes

3.3 Ab 1. Januar 2016 wurde der Primärenergiefaktor für Strom von $f_p = 2,6$ auf $f_p = 1,8$ herabgesetzt. Nennen Sie den Grund dafür.

Mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung sinkt der Primärenergiefaktor für Strom.

3.4 Das GEG (Gebäudeenergiegesetz) ist am 01.11.2020 in Kraft getreten. Welche drei Gesetze/Verordnungen wurden im GEG zusammengefasst?

EnEG Energieeinsparungsgesetz

EnEV Energieeinsparverordnung

EEWärmeG Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

- Skript Wärmeschutz 9. Passivhaus

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 9. Passivhaus https://youtu.be/fvu_nkr75Bc

- > größte Passivhaussiedlung der Welt https://www.youtube.com/watch?v=I_CCjVd_C5U
- > Energie PLUS Gebäude <https://www.youtube.com/watch?v=5kkbznbhSIE>
- > Effizienzhaus Plus-Siedlung Hügelschart <https://www.youtube.com/watch?v=xwzV-wVj3g>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Passivhaus

1.1 Welcher U-Wert der Außenwand kann bei monolithischer Bauweise etwa erreicht werden?

$$\lambda = 0,07 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \text{ (Unipor-Isolo) } > U = 0,74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$s = 4 \text{ gem}$$

1.2 Wie wird die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle überprüft und welcher Grenzwert ist einzuhalten?

- Blower door test
- $n_{50} \leq 0,6 \frac{1}{\text{h}}$

1.3 Warum darf bei einem Passivhaus ohne konventionellem Heizsystem die Heizlast nicht mehr als 10 W/m^2 betragen?

$$n = 0,4 \frac{1}{\text{h}}, \text{ max. Zulufttemperatur } 50^\circ\text{C}$$

$$\dot{q} = 0,34 \frac{\text{W}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot 0,4 \frac{1}{\text{h}} \cdot 25 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot (50 - 20) \text{K} = 10,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

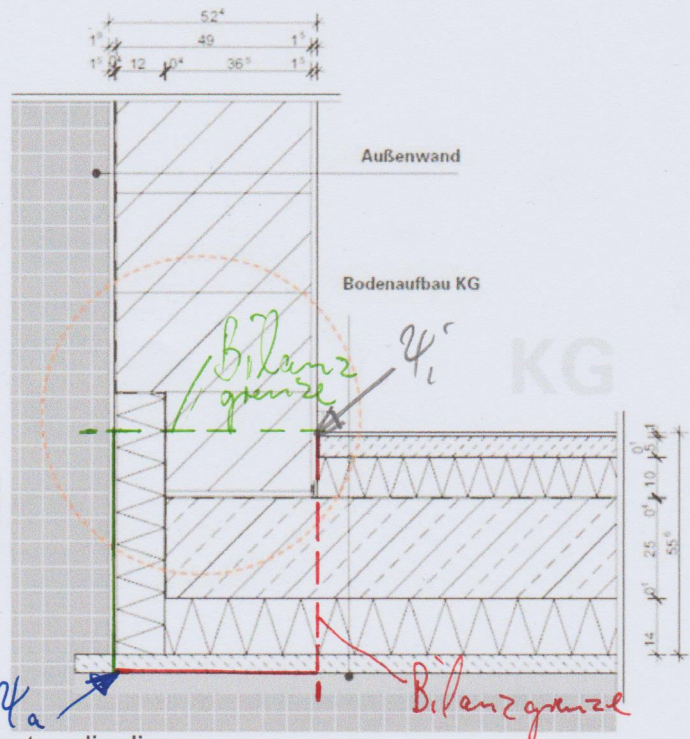
1.4 Nennen Sie drei grundlegende Anforderungen an die Wohnraumlüftung bei Passivhäusern

- Behaglichkeitskriterium
> min. Zulufttemperatur $16,5^\circ\text{C}$ (bei -10°C Außenlufttemp.)
- Effizienz kriterium Wärme
> Wirkungsgrad der WRG $\geq 75\%$
- Effizienz kriterium Strom
> max. $0,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^3\text{h}}$ bezogen auf geförderter Zuluft - Volumenstrom

2 Wärmebrücken im Passivhaus

Für die Kellerwand eines Passivhauses wurde die dargestellte Sockelausbildung geplant. Der Kellerraum ist beheizt und hat eine Innentemperatur von 20°C. Der U-Wert der Außenwand beträgt $U_{AW} = 0,135 \text{ W/m}^2\text{K}$, der U-Wert der Bodenplatte $U_{BP} = 0,140 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ψ_a	-0,049 W/(mK)
$f_{R_{si}}$	0,95
$\theta_{si,min}$	18,6 °C



2.1 Bestimmen Sie die mittlere Erdreichtemperatur, die diesem Wärmebrückenbeispiel zugrunde liegt. (2 Punkte)

$$\theta_e = \frac{f \cdot \theta_i - \theta_{si}}{f - 1} = \frac{0,95 \cdot 20^\circ\text{C} - 18,6^\circ\text{C}}{0,95 - 1} = -8,0^\circ\text{C}$$

2.2 Bestimmen Sie die innere Oberflächentemperatur der Bodenplatte bei einer Erdreichtemperatur von $\theta_e = 5^\circ\text{C}$. (3 Punkte)

$$\dot{q} = U \cdot \Delta\theta = 0,140 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (20 - 5)\text{K} = 2,10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\theta_{si} = \theta_i - \dot{q} \cdot R_{si} = 20^\circ\text{C} - 2,10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,17 \text{m}^2\text{K/W} = 19,64^\circ\text{C}$$

2.3 Bestimmen Sie den inneren Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ_i für die Bilanzierung über die Innenflächen. (4 Punkte)

$$\Psi_i \cdot K \cdot A_0 = (\Psi_a \cdot K + U_{AW} \cdot s_{BP} \cdot K + U_{BP} \cdot s_{AW} \cdot K) \cdot A_0$$

$$\Psi_i = -0,049 \frac{\text{W}}{\text{mK}} + 0,135 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,556 \text{m} + 0,140 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,524 \text{m}$$

$$= 0,0994 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

- Skript Wärmeschutz
10. Wohnungslüftung - Messergebnisse von Niedrigenergie- und Passivhäusern

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Skript 10. Wohnungslüftung - Messergebnisse von Niedrigenergie- und Passivhäusern

<https://youtu.be/2QabeEIEpSE>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Lüftungswärmebedarf bei Fensterlüftung

1.1 Welcher nutzungsbedingte Mindestaußenluftwechsel wird bei der Referenzausführung nach GEG 2020 (Anlage 1) angesetzt?

$$n_{\text{Nutz}} = 0,55 \frac{1}{h} \quad (\text{DIN V 18599-10})$$

1.2 Geben Sie den spezifischen Lüftungswärmebedarf für einen Neubau (Luftwechsel wie Aufgabe 1.1) an, wenn die lichte Raumhöhe 2,5 m beträgt.

$$q_V = 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 0,55 \frac{1}{h} \cdot 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 66 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}} = 30,9 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

1.3 Wie hoch sind die gemessenen Luftwechselraten bei Niedrigenergiehäusern mit Fensterlüftung im Winter? Geben Sie den spezifischen Lüftungswärmebedarf für die gemessene Luftwechselrate (Neubau) an, wenn die lichte Raumhöhe 2,5 m beträgt.

$$n = 0,15 \dots 0,25 \frac{1}{h}$$

$$q_V = 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 0,15 \frac{1}{h} \cdot 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot 66 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}} = 8,4 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

1.4 Erläutern sie die meist großen Unterschiede zwischen berechnetem und gemessenem Lüftungswärmebedarf bei Niedrigenergiehäusern mit Fensterlüftung.

$$\text{Annahme } n = 0,15 \frac{1}{h}$$

$$\Delta q_V = (30,9 - 8,4) \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}} = 22,5 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

Im GEG 2020 ist der Luftwechsel ($n_{\text{Nutz}} = 0,55 \frac{1}{h}$) hoch angesetzt und kann zu großen Unterschieden zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch führen.

- Skript Wärmeschutz
11. Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV)

Videos

Das Video zur Vorlesung darf nur von den eingetragenen Nutzern der Plattform MyMoodle / ► Fakultät 05 / ► Energie- und Gebäudetechnik / ► GKBauphysik verwendet werden. Eine Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

11. Energieanalyse aus dem Verbrauch <https://youtu.be/5fRxdSHebls>

Fragen und Übungsaufgaben

1 Abschätzung der Heizsteigung und des Jahresheizwärmebedarfes

Für ein kompaktes Einfamilienhaus wird im Rahmen der Vorplanung die Heizsteigung und der Jahresheizwärmebedarf näherungsweise bestimmt.

- Abmessungen des EFH (nach Kap. 5, S.29, Gebäudehüllzahl)

Länge	L = 10 m	Breite	B = 6 m
Geschoßhöhe	H = 3 m	Anzahl der Etagen	n = 3
Bruttovolumen	$V_e = 540 \text{ m}^3$		
- Fensterlüftung $n = n_{\text{min}} \cdot \zeta_{\text{gleichzeitigkeit}} = 0,5 \text{ 1/h} \cdot 0,5 = 0,25 \text{ 1/h}$
- Klimarandbedingungen für München

Heizgrenztemperatur	$t_{\text{HG}} = 12^\circ\text{C}$
mittlere Außenlufttemperatur	$t_{\text{A,HP}} = 3,8^\circ\text{C}$
Dauer der Heizperiode	$d_{\text{HP}} = 217 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} = 5208 \text{ h/a}$
- Heizverteilverluste im unbeheizten Bereich werden vernachlässigt

Für den Wärmeschutzstandard der Gebäudehülle stehen zwei Varianten zur Auswahl:

Variante 1	(EnEV-Standard)	$U_m + \Delta U_{\text{WB}} = (0,25 + 0,05) \text{ W/m}^2\text{K} = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
Variante 2	(Passivhaus-Standard)	$U_m + \Delta U_{\text{WB}} = (0,10 + 0,00) \text{ W/m}^2\text{K} = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$

1.1 Bestimmen Sie Energiebezugsfläche A_E , die Gebäudehüllfläche A_{th} und die Gebäudehüllzahl A_E/A_{th} (nach Kap. 5).

Energiebezugsfläche:

$$A_E = 3 \times 6 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 180 \text{ m}^2$$

Gebäudehüllfläche

$$A_{\text{th}} = 2 \times (6 \times 10 + 6 \times 9 + 10 \times 9) \text{ m}^2 = 408 \text{ m}^2$$

Gebäudehüllzahl

$$\frac{A_{\text{th}}}{A_E} = 2,267$$

1.2 Bestimmen Sie die Heizsteigung und den Jahresheizwärmebedarf für beide Varianten.

$$h = \frac{H_T + H_V + \overset{\sim 0 \text{ (s. Angaben)}}{H_d}}{A_E} = \frac{(\alpha_m + \Delta\alpha_{WB}) \cdot A_{t,h}}{A_E} + \frac{n \cdot V \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}}}{A_E}$$

$$h_{\text{Var1}} = 0,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2,267 + \frac{0,25 \frac{1}{\text{h}} \cdot 0,76 \cdot 540 \frac{\text{m}^3}{180 \text{m}^2} \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}}}{180 \text{m}^2}$$

$$= (0,680 + 0,194) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,874 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} < 1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \text{ "gut"}$$

Anmerkung: Nettovolumen $V = 0,76 \cdot V_e$
 ↳ bis 3 Vollgeschosse nach EnEV (grüne Ampel)

$$h_{\text{Var2}} = 0,10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2,267 + 0,194 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} =$$

$$= (0,2267 + 0,194) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,421 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \ll 1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \text{ "sehr gut"}$$

Jahresheizwärmebedarf:

$$q_{h, \text{Var1}} = h_{\text{Var1}} \cdot (t_{H6} - t_{A, \text{HP}}) \cdot d_{\text{HP}} / 1000$$

$$= 0,874 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (12 - 3,8) \text{K} \cdot 5208 \frac{\text{h}}{\text{a}} / 1000 = 37,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

$$q_{h, \text{Var2}} = 0,421 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot (12 - 3,8) \text{K} \cdot 5208 \frac{\text{h}}{\text{a}} / 1000 = 18,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$