

**HAWK - HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFT UND KUNST**

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauen und Erhalten in Hildesheim

**Vorlesungsskripte zur Bauphysik
Masterstudium**

Wärmeschutz

Inhalt

1	Wärmeschutztechnische Größen	3
2	Wärmeleitung	4
2.1	Definition	4
2.2	Das Temperaturfeld	4
2.3	Die stationäre eindimensionale Wärmeleitung durch eine ebene Wand (ohne Wärmequelle)	5
3	Konvektion (Grundlagen)	7
3.1	Definition	7
3.2	Ähnlichkeitstheorie	7
3.3	Freie Konvektion	9
3.4	Erzwungene Konvektion	9
3.5	Stoffwerte für die Berechnung der Wärmekonvektion	9
4	Wärme- oder Temperaturstrahlung (Grundlagen)	10
4.1	Definition	10
4.2	Energiebilanz der Strahlung	11
4.3	Gesetz von Stefan und Boltzmann	12
4.4	Gesetz von Kirchhoff	13
4.5	Strahlungsaustausch	13
4.6	Erfassung des Wärmeaustausches bei praktischen Berechnungen	15
5	Wärmedurchgang	16
5.1	Der eindimensionale Wärmedurchgang durch eine homogene Wand	17
5.2	Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein mehrschichtiges Bauteil	19
5.3	Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit inhomogenen Schichten	19
5.4	Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit keilförmigen Schichten	21
5.5	Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit Luftschichten	23
5.6	Der Wärmedurchgang durch Fenster	25
5.6.1	Allgemeines	25
5.6.2	Einfachfenster	26
5.6.3	Kastenfenster	27
5.6.4	Verbundfenster	28
5.6.5	Bemessungswerte nach DIN V 4108-4	29
5.7	Wärmeübertragung über das Erdreich	31
5.7.1	Allgemeines	31
5.7.2	Bodenplatte auf Erdreich	32
5.7.3	Aufgeständerte Bodenplatte	36
5.7.4	Beheizter Keller	39
5.7.5	Unbeheizter oder teilweise beheizter Keller	41
5.8	Wärmedurchgang durch unbeheizte Räume	41
6	Wärmeübertragungsvorgänge infolge Sonnenstrahlung	42

6.1	Allgemeines	42
6.2	Wärmedurchgang durch nichttransparente Bauteile mit Sonnenstrahlung	43
6.3	Wärmedurchgang durch transparente Bauteile mit Sonnenstrahlung	44
7	Mindestwärmeschutz 46	
7.1	Zweck	46
7.2	Anwendungsbereich	46
7.3	Anforderungen	46
7.3.1	Nichttransparente Bauteile	46
7.3.2	Transparente Bauteile	48
7.3.4	Tauwasserfreiheit der raumseitigen Bauteiloberfläche	49
8	Wärmebrücken51	
8.1	Definition	51
8.2	Klassifizierung	51
8.2.1	Materialbedingte Wärmebrücken	51
8.2.2	Geometrisch bedingte Wärmebrücken	53
8.3	Typische Wärmebrücken und Erkennungsmerkmale	53
8.4	Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken	55
8.4.1	Geometrisch bedingte Wärmebrücken	55
8.4.2	Regelkonstruktionen nach DIN 4108, Beiblatt 2	55
8.4.3	Einzelnachweis zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung	55
8.4.4	Maßnahmen zur Verminderung der Wärmebrückenwirkung	58
8.5	Energetische Betrachtung von Wärmebrücken.....	60
8.5.1	Allgemeines	60
8.5.2	Pauschalmethode ohne Nachweis	60
8.5.3	Pauschalmethode mit Nachweis	61
8.5.4	Detaillierte Ermittlung jeder einzelnen Wärmebrücke	61
9.4	Thermische Vergleichsmessungen durch das IBP Holzkirchen	69
9.5	Thermisch-Energetische Vergleichsrechnungen durch das BBS INSTITUT	71
9.5.1	Grundlagen der Thermisch-energetische Gebäudesimulation	71
9.5.2	Gebäudebeschreibung des betrachteten Gebäudes	71
9.5.3	Thermisch-energetische Gebäudesimulation	72
9.5.4	Zusammenfassung	74

1 Wärmeschutztechnische Größen

Bedeutung	Formelzeichen nach DIN 4108	SI-Einheit
Dicke	d	m
Fläche	A	m^2
Volumen	V	m^3
Masse	m	kg
(Roh-) Dichte	ρ	kg/m^3
Zeit	t	s
Temperatur	θ, T	$^{\circ}C, K$
Temperaturdifferenz	$\Delta\theta, \Delta T$	K
Wärmemenge	Q	J (= Ws)
Wärmestrom	Φ	W
Wärmestromdichte	q	W/m^2
Wärmeleitfähigkeit (Rechenwert)	λ_R	$W/(m \cdot K)$
Wärmedurchlasskoeffizient	Λ	$W/(m^2 \cdot K)$
Wärmedurchlasswiderstand	R	$m^2 \cdot K/W$
Wärmeübergangskoeffizient	h	$W/(m^2 \cdot K)$
Wärmeübergangswiderstand	R_s	$m^2 \cdot K/W$
Wärmedurchgangskoeffizient	U	$W/(m^2 \cdot K)$
Wärmedurchgangswiderstand	R_T	$m^2 \cdot K/W$
Spezifische Wärmekapazität	c	$J/(kg \cdot K)$
Fugendurchlasskoeffizient	a	$m^3/(h \cdot m \cdot daPa^{2/3})$
Gesamtenergiedurchlassgrad	g	-
Abminderungsfaktor einer Sonnenschutzvorrichtung	F_C	-
relative Luftfeuchte	ϕ	%

Tab. 1-1 Symbole, Größen und Einheiten nach DIN 4108

Index	Bedeutung
i	innen
e	außen
a	Umgebung
s	Oberfläche
si	innere Oberfläche
se	äußere Oberfläche

Index	Bedeutung
cd	Wärmeleitung
cv	Konvektion
r	Strahlung

Tab. 1-2 Indizes nach DIN EN ISO 7345

2 Wärmeleitung

2.1 Definition

Wärmeleitung ist Energietransport durch atomaren und molekularen Impulsaustausch unterstützt durch Elektrendiffusion bei Metallen. Wärmeleitung tritt in festen, flüssigen und gasförmigen Medien auf. Bei flüssigen und gasförmigen Medien beinhaltet der Wärmetransport Leitung und Konvektion. Im Vakuum kann keine Wärmeleitung stattfinden.

2.2 Das Temperaturfeld

Die Temperatur in einem Körper kann eine Funktion des Ortes und der Zeit sein.

$$\theta = f(x, y, z, t) \quad (2-1)$$

Die Punkte gleicher Temperatur spannen im Körper isotherme Flächen auf.

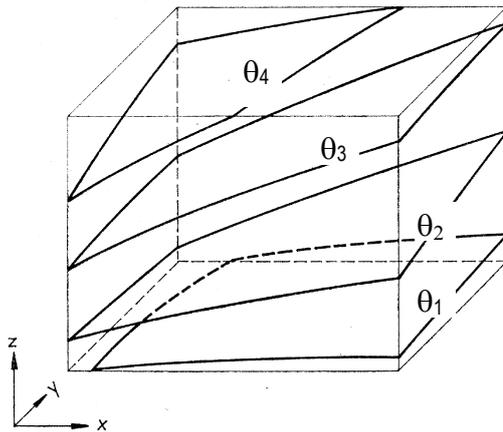


Bild 2-1 Isothermenverlauf in einem Körper

Diese isothermen Flächen können auch eine Funktion der Zeit sein. Man spricht dann von einer **instationären** Temperaturverteilung. Besteht keine Zeitabhängigkeit, so handelt es sich um ein **stationäres** Temperaturfeld.

Wärmeleitung ist in Realität ein instationärer Vorgang. Grundlage bauphysikalischer Nachweisberechnungen für den Winterfall ist jedoch der stationäre Fall (zulässige Vereinfachung). Für den Sommerfall muss aufgrund der ausgeprägten Tagesgänge von Sonnenstrahlung und Außenlufttemperatur mit instationären Randbedingungen gerechnet werden.

Das Temperaturfeld in einem Körper wird mathematisch durch die Lösung der FOURIERschen Differentialgleichung (Dgl.) beschrieben

$$\underbrace{\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}}_A = \underbrace{\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)}_B + \underbrace{q_i}_C \quad (2-2)$$

Die Fouriersche Dgl. für das Temperaturfeld in einem Körper ist eine partielle (Ort, Zeit) inhomogene (q_i) Dgl. 2. Ordnung. Die Lösung dieser Dgl. ist nicht Bestandteil der Bauphysik-Vorlesung. In der Praxis wird die Dgl. auf numerischem Weg gelöst, wobei unterschiedliche Computerprogramme zur Verfügung stehen.

Nachfolgend sind die einzelnen Terme der Fourierschen Differentialgleichung erläutert:

A ... Zeitfunktion $\theta(t)$

c ...spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)

ρ ...Dichte in kg/m³

Dieser Term beschreibt das instationäre (zeitlich veränderliche) Verhalten der Wärmeleitung. Die spezifische Wärmekapazität und die Dichte eines Materiales beeinflussen das instationäre Temperaturverhalten. Je schwerer ein Baustoff und je größer dessen spezifische Wärmekapazität ist, desto stärker kommt das instationäre Verhalten zum Tragen. Man spricht dann auch von Wärmespeicherverhalten oder Temperaturträgheit.

B ... Ortsfunktion $\theta(x, y, z)$

λ ...Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)

Dieser Term beschreibt den zeitlich unabhängigen Wärmeleitvorgang im dreidimensionalen Raum. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Stoffgröße und kennzeichnet das Wärmeleitvermögen des Materials. Gute Wärmeleiter sind alle Metalle (Analogie elektr. Leitung \rightarrow Wärmeleitung). Schlechte Wärmeleiter sind Flüssigkeiten, Gase und Nichtmetalle. Bei Dämmstoffen muss eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit vorliegen ($\lambda \downarrow\downarrow$). Die Dämmeigenschaft eines Dämmstoffes wird durch Gaseinschlüsse (bzw. Lufteinschlüsse) erzeugt.

Metalle	$\lambda = 20 \dots 400 \text{ W/(m K)}$
Mauerwerk, Beton	$\lambda = 0,3 \dots 3,0 \text{ W/(m K)}$
Dämmstoffe	$\lambda = 0,02 \dots 0,20 \text{ W/(m K)}$

C ... innere Wärmequelle

Der durch eine innere Wärmequelle erzeugte Wärmestrom q_i beeinflusst das Temperaturverhalten in einem Körper. In der Baupraxis kommen innere Wärmequellen zum Beispiel in Form von Fußbodenheizungen oder thermisch aktiven Bauteilen vor.

2.3 Die stationäre eindimensionale Wärmeleitung durch eine ebene Wand (ohne Wärmequelle)

Der stationäre Fall ist ein Sonderfall, für den gilt:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (2-3)$$

Diese Vereinfachung ist zulässig, wenn es sich

- um Baustoffe handelt, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften oder ihrer Bauteildicke eine geringe Speichervermögen besitzen (z. B. Fensterglas oder Dämmstoff) oder

- die zeitliche Temperaturänderung gering ist. Bei Nachweisberechnungen zum winterlichen Wärmeschutz darf stationär gerechnet werden, da bei einem Nachweis immer vom ungünstigsten Fall ausgegangen wird ($\theta_e = -15\text{ °C}$, keine Sonnenstrahlung). Bei Berechnungen zum Heizenergiebedarf ist der stationäre Fall zulässig, wenn mit täglichen, monatlichen oder jährlichen Mittelwerten gerechnet wird.

Für den eindimensionalen Fall gilt:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 ; \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (2-4)$$

Bei der Betrachtung einer ebenen Wand ist diese Vereinfachung zulässig, da nach dem FOURIERSchen Erfahrungsgesetz der Wärmestrom immer die Richtung des größten Temperaturgefälles besitzt.

Die Fouriersche Dgl. reduziert sich zu

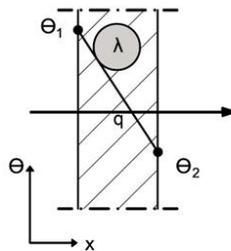
$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (2-5)$$

Auflösung:

1. Integration: $\frac{d\theta}{dx} = C_1$
2. Integration: $\theta = C_1 x + C_2$ (linearer Temperaturverlauf)

1. Randbedingung: $\theta(x=0) = \theta_1 \Rightarrow C_2 = \theta_1$
2. Randbedingung: $\theta(x=d) = \theta_2 \Rightarrow C_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{d}$; d...Wanddicke

$$\Rightarrow \theta(x) = \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} x$$



Der Wärmestrom wird mathematisch durch das Fouriersche Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung beschrieben:

$$\Phi_{cd} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} A \quad \text{Minuszeichen bedeutet: Der Wärmestrom ist dem Temperaturgradienten entgegengerichtet (siehe Skizze oben)} \quad (2-6)$$

Φ_{cd} ... Wärmestrom infolge Wärmeleitung [W]

Häufig verwendet man den auf eine Fläche bezogenen Wärmestrom, die so genannte Wärmestromdichte

$$q_{cd} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2-7)$$

q_{cd} ... Wärmestromdichte in W/m^2

Übungsskript Beispiel 1-1

3 Konvektion (Grundlagen)

3.1 Definition

Wärme­konvektion ist der Wärmetransport von einem fluiden Medium an die Oberfläche eines festen Körpers oder umgekehrt. Wärme­konvektion ist immer an den Transport von Stoffteilchen gebunden (z. B. Luftströmung). Man unterscheidet in freie Konvektion (z. B. thermischer Auftrieb) und erzwungene Konvektion (z. B. Warmluft­heizung oder Wind).

Grundgleichung: $q_{cv} = h_{cv} \cdot (\theta - \theta_s)$ (3-1)

Kenngroße: h_{cv} ...konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

q_{cv} ...Wärmestromdichte (konvektiv)

θ ... Fluidtemperatur (z. B. Lufttemperatur)

θ_s ... Oberflächentemperatur

3.2 Ähnlichkeitstheorie

Konvektion ist abhängig von:

- Geschwindigkeitsverhältnissen
- Temperaturverhältnissen
- Stoffwerten
- Geometrie

1. Weg: analytische Lösung der Differentialgleichungen

- Dgl. Massebilanz
- Dgl. Impulsbilanz
- Dgl. Energiebilanz
- Dgl. Wärmeübergang

⇒ Dieses Dgl.-system ist nur für spezielle Sonderfälle lösbar !

2. Weg: Experimentell in Verbindung mit Ähnlichkeitstheorie

Mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie können die Ergebnisse einer Versuchsanordnung auf ein anderes System übertragen werden, wenn beide Systeme physikalisch ähnlich sind. Ähnlichkeitstheorie bedeutet

Anzahl der Variablen verringern. Differentialgleichungen werden für zwei ähnliche Vorgänge aufgestellt. Lösungen sind identisch, wenn sie sich nur um einen konstanten Faktor (Ähnlichkeitsfaktor) unterscheiden.

Ähnlichkeitsfaktoren sind ohne Einheiten behaftet:

$$\text{NUSSELT – Zahl} \quad Nu = \frac{h_{cv} \cdot l}{\lambda} \Rightarrow \boxed{h_{cv} = \frac{\lambda \cdot Nu}{l}} \quad (3-2)$$

charakterisiert den Wärmetransport

$$\text{REYNOLDS – Zahl} \quad Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (3-3)$$

beschreibt die Form einer erzwungenen Strömung (laminar, turbulent)

$$\text{GRASHOF – Zahl} \quad Gr = \frac{\varepsilon_p \cdot g \cdot l^3 |\theta_s - \theta|}{\nu^2} \quad (3-4)$$

kennzeichnet die Intensität des thermischen Auftriebs bei freier Konvektion

$$\text{PRANDTL – Zahl} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (3-5)$$

stellt eine reine Stoffwertkombination dar

- $h_{cv}...$ konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2K)$
- $l...$ charakteristische Länge in m
- $\lambda...$ Wärmeleitfähigkeit in $W/(m K)$
- $w...$ Geschwindigkeit in m/s
- $\nu...$ kinematische Viskosität in $m^2/s \Rightarrow \nu = \eta / \rho$
- $\eta...$ dynamische Viskosität in $kg/(m s)$
- $\rho...$ Dichte in kg/m^3
- $\varepsilon_p...$ isobarer Volumenausdehnungskoeffizient in K^{-1}
- $g...$ Erdbeschleunigung in m/s^2 ($g = 9,81 m/s^2$)
- $\theta_s...$ Oberflächentemperatur in $^{\circ}C$
- $\theta...$ Fluidtemperatur in $^{\circ}C$
- $a...$ Temperaturleitkoeffizient in m^2/s
- $c_p...$ spezifische isobare Wärmekapazität in $J/(kg K)$

Die gesuchte Größe ist der konvektive Wärmeübergangswiderstand h_{cv} , anhand dessen der konvektive Wärmeübergang berechnet werden kann.

Größenordnung des in der Bauphysik vorkommenden Wärmeübergangskoeffizienten für Luftkonvektion:

$$h_{cv} \approx 2...20 W/(m^2K)$$

3.3 Freie Konvektion

Für die Beschreibung der freien Konvektion benötigt man die drei Ähnlichkeitszahlen Nu, Pr, Gr

Allgemein gilt:

$$Nu = f(Gr, Pr, \text{Geometrie}) \quad (3-6)$$

Kennzahlgleichung für eine freie Konvektion entlang einer ebenen Bauteilfläche mit $\theta_s = \text{const.}$:

$$Nu = 0,11 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} + (Gr \cdot Pr)^{0,1} \quad (3-7)$$

Gültigkeitsbereich: $Pr \geq 0,5$ $10^{-7} \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^{12}$

senkrechte Wände: $l = \text{Wandhöhe}$

waagerechte Bauteile: $l = \text{kleinere Seitenlänge}$

3.4 Erzwungene Konvektion

Für die Beschreibung der erzwungenen Konvektion benötigt man die drei Ähnlichkeitszahlen Nu, Pr, Re

Allgemein gilt:

$$Nu = f(Re, Pr, \text{Geometrie}) \quad (3-8)$$

Kennzahlgleichungen für eine längs angeströmte ebene Bauteilfläche:

1. Fall: laminar wenn $Re < 3,5 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (3-9)$$

Gültigkeitsbereich: $Pr > 0,6$

2. Fall: turbulent wenn $Re > 3,5 \cdot 10^5$

$$Nu = 393 \cdot Pr^{0,33} - 1001 \cdot Pr^{0,43} + 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (3-10)$$

Gültigkeitsbereich: $Pr > 0,6$

charakteristische Länge = Bauteillänge in Strömungsrichtung

3.5 Stoffwerte für die Berechnung der Wärmekonvektion

Die Stoffwerte sind temperaturabhängig. Für Luft ist die zur Auswahl der Stoffwerte benötigte Bezugstemperatur θ_B wie folgt definiert:

$$\theta_B = \frac{\theta + \theta_s}{2} \quad (3-11)$$

θ_B °C	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	λ $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	$10^3 \cdot \epsilon_p$ K^{-1}	$10^6 \cdot \nu$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr -
- 50	1,534	1,004	0,0206	4,51	9,55	0,715
0	1,2930	1,004	0,0243	3,67	13,30	0,711
20	1,2045	1,004	0,0257	3,43	15,11	0,713
40	1,1267	1,009	0,0271	3,20	16,97	0,711
60	1,0595	1,009	0,0285	3,00	18,90	0,709
80	0,9998	1,009	0,0299	2,83	20,94	0,708
100	0,9458	1,013	0,0314	2,68	23,06	0,704
120	0,8980	1,013	0,0328	2,55	25,23	0,700
140	0,8535	1,013	0,0343	2,43	27,55	0,694
160	0,8150	1,017	0,0358	2,32	29,85	0,693
180	0,7785	1,022	0,0372	2,21	32,29	0,690
200	0,7457	1,026	0,0386	2,11	34,63	0,685
250	0,6745	1,034	0,0421	1,91	41,17	0,680
300	0,6157	1,047	0,0454	1,75	47,85	0,680
350	0,5662	1,055	0,0485	1,61	55,05	0,680
400	0,5242	1,068	0,0515	1,49	62,53	0,680

Bild 3-1 Stoffwerte für trockene Luft bei 100 kPa

Übungsskript Beispiel 1-2

4 Wärme- oder Temperaturstrahlung (Grundlagen)

4.1 Definition

Wärme- bzw. Temperaturstrahlung (nachfolgend nur noch Wärmestrahlung genannt) ist Energietransport durch elektromagnetische Wellen. Wärmestrahlung wird thermisch angeregt. Wärmestrahlung findet im Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,8 \dots 300 \mu\text{m}$ statt und wird auch als langwellige Strahlung bezeichnet.

Bezeichnung der Strahlung	Wellenlänge in m
Höhenstrahlung	$< 0,05 \cdot 10^{-12}$
Gamma-Strahlung	0,5 bis $30 \cdot 10^{-12}$
Röntgen-Strahlung	0,006 bis $30 \cdot 10^{-9}$
ultraviolette Strahlung	0,01 bis $0,4 \cdot 10^{-6}$
sichtbare Strahlung	0,4 bis $0,8 \cdot 10^{-6}$
Wärmestrahlung	0,8 bis $300 \cdot 10^{-6}$
Radiowellen	$> 0,2 \cdot 10^{-3}$

Bild 4-1 Wellenlängen verschiedener Strahlung

Für die Wärmeübertragung durch Strahlung ist kein materieller Träger erforderlich. Strahlung kann demzufolge auch durch ein Vakuum erfolgen.

4.2 Energiebilanz der Strahlung

Einfallende Strahlung: $F = A + R + D$

Ausgesendete Strahlung: $S = E + R + D$

F...einfallende Strahlung

A...absorbierte Strahlung

R...reflektierte Strahlung

D...durchgehende Strahlung

S...ausgesendete Strahlung

E...emittierte Strahlung

Energiebilanz für einen Körper:

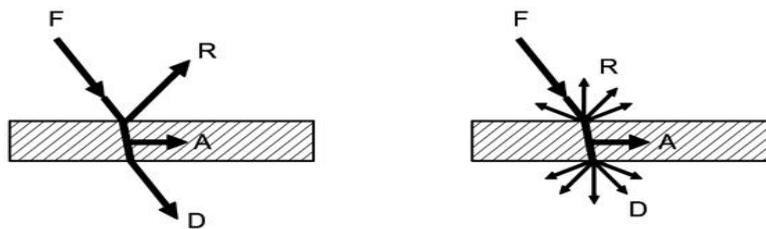


Bild 4-1a Mögliche Aufteilung der auf einen realen Körper auftretenden Strahlung

links: glatte Oberfläche; rechts: rauhe Oberfläche

einfallende Strahlungsenergie = ausgesendete Strahlungsenergie

Es gilt: $F = S \Rightarrow A = E$

$$F = A + R + D \quad | :F \quad \Rightarrow \quad 1 = \frac{A}{F} + \frac{R}{F} + \frac{D}{F}$$

$$1 = a + r + d$$

a... Absorptionsgrad

r... Reflexionsgrad

d... Durchlassgrad

Grenzfälle: a = 1... schwarzer Körper

r = 1... idealer Spiegel

d = 1... diathermer Körper

4.3 Gesetz von Stefan und Boltzmann

Die von einem Körper emittierte Strahlungsenergie ist proportional der 4. Potenz seiner absoluten Temperatur. Es gilt:

$$E = CA \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (4-1)$$

E... Strahlungsenergie (oder Strahlungsemission) in W

C... Strahlungskonstante in $W/(m^2 K^4)$

A... Emissionsfläche in m^2

T... absolute Temperatur in K

Für den so genannten *schwarzen Strahler* (oder *schwarzer Körper*) ist die Strahlungsemission am größten. Für den *schwarzen Strahler* ist daher auch die Strahlungskonstante C am größten, und zwar:

$$C = C_S = 5,67 W/(m^2 K^4) \quad (4-2)$$

C_S... Strahlungskonstante des schwarzen Strahlers

$$C = \varepsilon C_S \quad (4-3)$$

ε... Emissionsgrad

Oberfläche	Emissionsgrad
Silber, poliert	0,03
Kupfer, poliert	0,04
Kupfer, schwarz oxydiert	0,82
Aluminium, walzblank	0,05
Eisen, blank geätzt	0,16
Eisen, geschmiegelt	0,26
Eisen, stark verrostet	0,85
Glas	0,88
Linoleum	0,88
Papier	0,89
Holz	0,91
Mörtel, Putz, Beton	0,93
Ziegel	0,93
Dachpappe	0,93
Aluminiumbronzeanstrich	0,40
Ölfarbenanstrich, schwarz, matt	0,97
Ölfarbenanstrich, schwarz, glänzend	0,88
Ölfarbenanstrich, weiß	0,89
Heizkörperlack	0,93

Bild 4-2 Emissionsgrad verschiedener Oberflächen

Der *graue Strahler* ist nicht identisch mit dem *realen Strahler* sondern auch eine physikalische Näherung. Auf die einzelnen Eigenschaften und Gesetze die dem *grauen Strahler* zugrunde gelegt werden, wird hier nicht näher eingegangen. Im Rahmen der bauphysikalischen Berechnungen ist das Modell des *grauen Strahlers* hinreichend genau.

4.4 Gesetz von Kirchhoff

Das Emissionsvermögen eines beliebigen Körpers verhält sich zum Emissionsvermögen des schwarzen Strahlers wie die entsprechenden Absorptionszahlen. Es gilt:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{E}{E_s} = \frac{a}{a_s}} \quad (4-4)$$

- $\varepsilon...$ Emissionsgrad eines beliebigen Körpers (grauer Strahler)
- $E...$ Strahlungsemission eines beliebigen Körpers (grauer Strahler)
- $E_s...$ Strahlungsemission des schwarzen Strahlers
- $a...$ Absorptionsgrad eines beliebigen Körpers (grauer Strahler)
- $a_s...$ Absorptionsgrad des schwarzen Strahlers

Wegen $a_s = 1$ folgt

$$\boxed{\varepsilon = a} \quad (4-5)$$

Körper bzw. Flächen mit hoher Absorptionszahl strahlen also stark, solche mit geringer Absorptionszahl (polierte Metallflächen) wenig. Dies gilt jedoch nur für den Wellenlängenbereich der langwelligen Wärmestrahlung. Bei anderen Wellenlängenbereichen, so z. B. bei kurzwelliger Sonnenstrahlung, können a und ε sehr verschieden voneinander sein.

4.5 Strahlungsaustausch

Am Strahlungsaustausch sind immer mehrere Flächen beteiligt. Die Intensität der Wärmestrahlung hängt von

- den Flächengrößen
- den Oberflächentemperaturen
- den Einstrahlverhältnissen (Einstrahlwinkel)
- den Emissionsverhältnissen der Oberflächen

der am Strahlungsaustausch beteiligten Flächen ab.

Für die Beschreibung des Strahlungsaustausches mehrerer in beliebiger Lage befindlicher Flächen existiert kein in sich geschlossenes analytisches Modell. Insbesondere die Ermittlung der Einstrahlverhältnisse gestaltet sich sehr aufwendig. Für spezielle Fälle kann der bilaterale Strahlungsaustausch zweier sich gegenüberliegender Flächen berechnet werden.

Allgemein gilt:

$$\Phi_{1,2} = f(A_{1,2}, T_{1,2}, \varphi_{1,2}, \varepsilon_{1,2}) \quad (4-6)$$

- $\Phi_{1,2}...$ Wärmestrom infolge Strahlungsaustausch zwischen den Flächen 1 und 2
- $A_{1,2}...$ Größe der am Strahlungsaustausch beteiligten Flächen 1 und 2
- $T_{1,2}...$ absolute Oberflächentemperatur der Flächen 1 und 2
- $\varphi_{1,2}...$ Einstrahlverhältnis (auch Einstrahlwinkel oder Einstrahlzahl) zwischen den Flächen 1 und 2
- $\varepsilon_{1,2}...$ Emissionsgrade der Flächen 1 und 2

Die Berechnungsformel lautet:

$$\Phi_{1,2} = A_1 \cdot C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (4-7)$$

$C_{1,2}$... Strahlungsaustauschkoeffizient

$$C_{1,2} = f(\varphi_{1,2}, \varepsilon_{1,2}) \quad (4-8)$$

Für zwei sich gegenseitig bestrahlende Flächen gilt allgemein:

$$C_{1,2} = \frac{C_1 C_2}{C_s} \cdot \varphi_{1,2} \quad \text{mit} \quad C_1 = \varepsilon_1 C_s$$

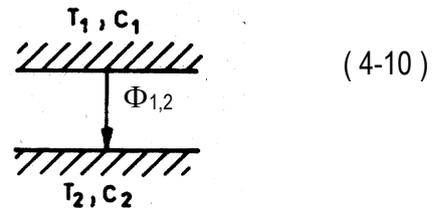
$$C_2 = \varepsilon_2 C_s \quad (4-9)$$

Für die Ermittlung der Einstrahlzahl existieren vielfältige Diagramme und teilweise umfangreiche Berechnungsformeln. Diese können z. B. dem VDI-Wärmeatlas entnommen werden.

Für drei spezielle Sonderfälle kann der Strahlungsaustauschkoeffizient $C_{1,2}$ auf relativ einfache Art und Weise berechnet werden:

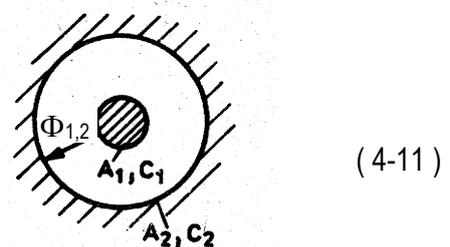
1. Fall: Die Flächen 1 und 2 sind unendlich parallel

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}}$$



2. Fall: Die Fläche 1 ist vollständig von Fläche 2 umschlossen

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)}$$



3. Fall: Die Fläche 1 ist sehr viel kleiner als die Fläche 2 ($A_1 \ll A_2$)

$$C_{1,2} = C_1$$

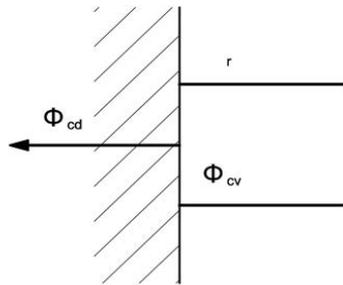
(4-12)

Übungsskript Beispiel 1-3

Übungsskript Beispiel 1-4

4.6 Erfassung des Wärmeaustausches bei praktischen Berechnungen

Im Rahmen der angewandten Wärmetechnik wird die Darstellung der Wärmestrahlung oftmals auf das Modell der Wärmekonvektion überführt und somit in der Handhabung vereinfacht.



Φ_{cd} ... Wärmeleitung
 Φ_r ... Wärmestrahlung
 Φ_{cv} ... Wärmekonvektion

Es gilt:
$$\Phi_{cd} = \Phi_r + \Phi_{cv} \quad (4-13)$$

mit
$$\Phi_r = C_{1,2} \cdot A \cdot \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] \quad (4-14)$$

$$\Phi_{cv} = h_{cv} \cdot A \cdot (\theta - \theta_s) \quad (4-15)$$

T_a ... absolute Temperatur der Umgebung (Die Umgebungstemperatur kann vereinfacht als das flächengewichtete Mittel aller Oberflächentemperaturen der umgebenden Bauteile angesetzt werden.)

T_s ... absolute Oberflächentemperatur

θ_s ... Oberflächentemperatur ($\theta_s + 273,15 \text{ K} = T_s$)

θ ... Lufttemperatur

Daraus folgt:

$$\Phi = \Phi_{cv} + \Phi_r \quad | : A \quad (4-16)$$

$$q = q_{cv} + q_r \quad (4-17)$$

$$q = h_{cv} (\theta - \theta_s) + C_{1,2} \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] \quad (4-18)$$

Definition:
$$q = h_{cv} (\theta - \theta_s) + h_r (\theta - \theta_s) \quad \text{mit} \quad h_r = \frac{C_{1,2} \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right]}{(\theta - \theta_s)} \quad (4-19)$$

h_r ... äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient infolge Strahlung. Das ist eine fiktive Größe zur einfacheren Beschreibung des Wärmeüberganges. Diese Größe besitzt keinen physikalischen Hintergrund.

Jetzt gilt: $q = h (\theta - \theta_s)$ mit $h = h_{cv} + h_r$ (4-20)

h ... kombinierter Wärmeübergangskoeffizient infolge Konvektion und Strahlung. Dieser Wert ist Grundlage bauphysikalischer Berechnungen und in den einschlägigen Normen (z. B. DIN 4108) verankert.

$(\theta - \theta_s)$...Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Luft

Für die überschlägige Ermittlung des kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten h können in guter Näherung folgende Ansätze verwendet werden:

- Wärmestrom von unten nach oben (auch Fußbodenheizung oder Kühldecke):

$$h = 8,92 (|\theta_s - \theta|)^{0,1} \quad \text{in W/(m}^2\text{K)} \quad (4-21)$$

- Wärmestrom von oben nach unten:

$$h = 5,2 + 0,8 (|\theta_s - \theta|)^{0,31} \quad \text{in W/(m}^2\text{K)} \quad (4-22)$$

- Wärmestrom an senkrechten Wänden:

$$h = 5,1 + 1,6 (|\theta_s - \theta|)^{0,3} \quad \text{in W/(m}^2\text{K)} \quad (4-23)$$

- Außenbauteil:

$$h \approx 9,5 + 4 w \quad \text{in W/(m}^2\text{K)} \quad (4-24)$$

mit w ...Windgeschwindigkeit in m/s

5 Wärmedurchgang

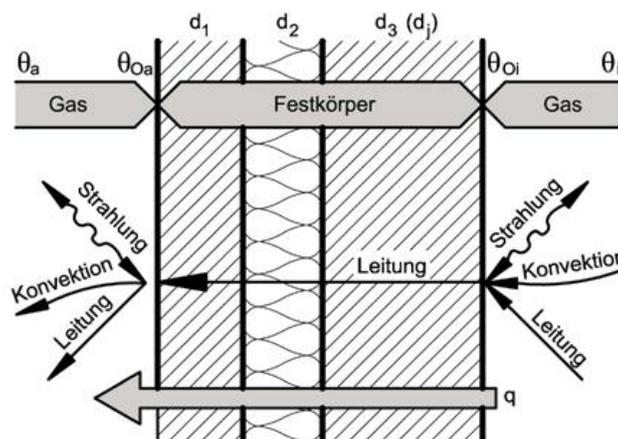


Bild 5-0 Wärmetransportmechanismen an einer Wand ($\theta_i > \theta_e$)

5.1 Der eindimensionale Wärmedurchgang durch eine homogene Wand

Der eindimensionale Wärmedurchgang gliedert sich in drei Einzelvorgänge:

- Wärmeübergang vom Fluid an die Wand
- Wärmeleitung in der Wand (siehe Abschnitt 2.3)
- Wärmeübergang von der Wand an das Fluid

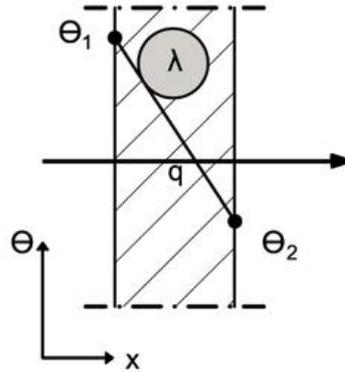


Bild 5-1 Eindimensionaler Wärmedurchgang

Der Wärmeübergang wird durch das NEWTONsche Gesetz beschrieben. Es gilt:

$$\text{Innerer Wärmeübergang: } q = h_i(\theta_i - \theta_{si})$$

$$\text{Äußerer Wärmeübergang: } q = h_e(\theta_{se} - \theta_e)$$

Der flächenbezogene Wärmeübergangskoeffizient h ist eine Kenngröße zur Erfassung des Wärmeüberganges zwischen Oberfläche und Umgebung infolge Konvektion und Strahlung. In der thermischen Bauphysik wird häufig der Kehrwert, der so genannte Wärmeübergangswiderstand R_s verwendet. Es gilt:

$$\text{Wärmeübergangswiderstand innen: } R_{si} = 1 / h_i$$

$$\text{Wärmeübergangswiderstand außen: } R_{se} = 1 / h_e$$

	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Tab. 5-1 Rechenwerte des Wärmeübergangswiderstandes in $\text{m}^2\text{K/W}$ nach DIN EN ISO 6946

Für die Wärmeleitung gilt:

$$q = \frac{\lambda}{d} (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (5-1)$$

Die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit sind für unterschiedliche Baustoffe DIN 4108, Teil 4 zu entnehmen.

Der Quotient $\frac{\lambda}{d}$ wird auch als Wärmedurchlasskoeffizient Λ bezeichnet.

$$q = \Lambda (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (5-2)$$

Der Kehrwert des Wärmedurchlasskoeffizienten heißt Wärmedurchlasswiderstand R:

$$q = \frac{1}{R} (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (5-3)$$

Für den Wärmedurchgang durch eine ebene homogen aufgebaute Wand gilt:

$$q = \frac{1}{R_{si}} (\theta_i - \theta_{si}) = \frac{1}{R} (\theta_{si} - \theta_{se}) = \frac{1}{R_{se}} (\theta_{se} - \theta_e) \quad (5-4)$$

bzw.

$$q = \frac{1}{R_T} (\theta_i - \theta_e) \quad (5-5)$$

mit R_T ... Wärmedurchgangswiderstand

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Anstelle des Wärmedurchgangswiderstandes wird häufiger der Wärmedurchgangskoeffizient U (U-Wert) verwendet.

$$q = U (\theta_i - \theta_e) \quad (5-6)$$

Unter Einbeziehung der wärmeübertragenden Fläche A lässt sich der Wärmedurchgang durch eine ebene Wand wie folgt beschreiben:

$$\boxed{\Phi = U A (\theta_i - \theta_e)} \quad (5-7)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient U ist eine wärmeschutztechnische Kenngröße für den baulichen Wärmeschutz eines Bauteiles. Er lässt sich für ein einschichtiges Bauteil wie folgt ermitteln:

$$\boxed{U = \frac{1}{R_{si} + \frac{d}{\lambda} + R_{se}}} \quad (5-8)$$

5.2 Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein mehrschichtiges Bauteil

In der Realität bestehen die Bauteile meistens aus mehreren Schichten.

Der Wärmedurchgang durch ein mehrschichtiges Bauteil ist sinngemäß wie eine Reihenschaltung von Widerständen zu behandeln. Es gilt:

$$R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} \quad (5-9)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient lässt sich demnach wie folgt berechnen:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{\lambda} \right)_i + R_{se}} \quad (5-10)$$

Der eindimensionale Wärmestrom durch ein mehrschichtiges Bauteil ist in jeder Schicht konstant. Es gilt:

$$\Phi = qA = U A (\theta_i - \theta_e) = \text{const.} \quad (5-11)$$

Übungsskript Beispiel 1-5

Übungsskript Beispiel 1-6

5.3 Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit inhomogenen Schichten

Inhomogene Schichten sind Schichten, die aus mehreren Abschnitten bestehen. Ein typisches Beispiel für ein Bauteil mit inhomogenen Schichten ist ein Holzsparrendach. Die Schicht, welche die Holzsparren enthält, besteht aus Rippe (Holzsparren) und Gefach (Wärmedämmung). Im übertragenen Sinne handelt es sich um eine Parallelschaltung zweier Widerstände. Für eine exakte Berechnung ist außerdem die Wärmelängsleitung zwischen den Abschnitten, d. h. zwischen Rippe und Gefach zu berücksichtigen.

Die Berechnungsvorschrift für ein Bauteil aus homogenen und inhomogenen Schichten ist in DIN EN ISO 6946 geregelt. Hierzu wird das Bauteil (Bild 5-2) in Abschnitte und Schichten geschnitten betrachtet:

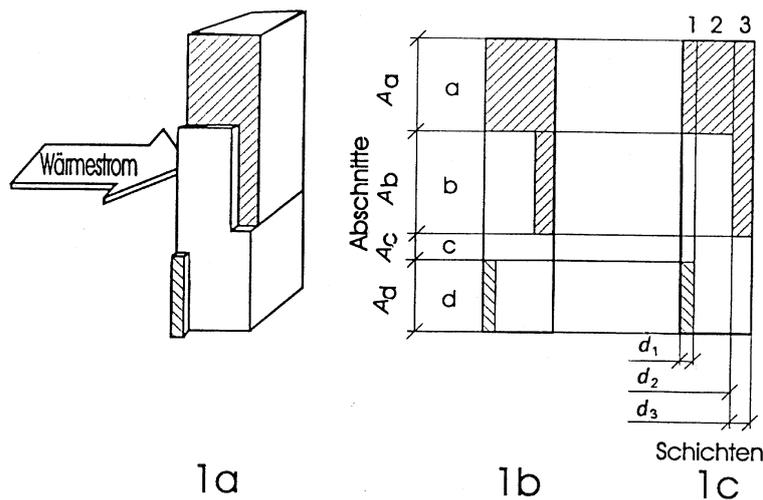


Bild 5-2 Schichteinteilung Bauteil

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad (5-12)$$

- R_T ... mittlerer Wärmedurchgangswiderstand des Bauteiles
 R'_T ... oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes
 R''_T ... unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes

Der obere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes wird unter der Annahme eines eindimensionalen Wärmestromes senkrecht zu den Oberflächen des Bauteiles bestimmt. Es gilt das Prinzip der Parallelschaltung von Widerständen (Analogie zur E-Technik).

$$\frac{1}{R'_T} = \sum_{m=a}^q \frac{f_m}{R_{Tm}} \quad (5-13)$$

- f_m ... Flächenanteil des jeweiligen Abschnittes m (Es gilt: $\sum_{m=a}^q f_m = 1$)
 R_{Tm} ... Wärmedurchgangswiderstand des jeweiligen Abschnittes m. Bei mehrschichtigen Abschnitten erfolgt die Berechnung von R_{Tm} nach dem Prinzip der Reihenschaltung (siehe Abschnitt 5.2.):

$$R_{Tm} = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_{jm} + R_{se} \quad (5-14)$$

- R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand
 R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand
 R_{jm} ... Wärmedurchlasswiderstand der jeweiligen Schicht j innerhalb des Abschnittes m.

Der untere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes wird unter der Annahme bestimmt, dass alle Ebenen parallel zu den Oberflächen des Bauteiles isotherm sind (isotherm: $\theta = \text{const.}$). Es gilt das Prinzip der Reihenschaltung (Analogie zur E-Technik).

$$R_T'' = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se} \quad (5-15)$$

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand

R_j ... Wärmedurchlasswiderstand der jeweiligen Schicht j. Bei inhomogenen Schichten erfolgt die Berechnung von R_j nach dem Prinzip der Parallelschaltung (siehe oberer Grenzwert):

$$\frac{1}{R_j} = \sum_{m=a}^q \frac{f_m}{R_{mj}} \quad (5-16)$$

f_m ... Flächenanteil des jeweiligen Abschnittes m innerhalb der Schicht j (Es gilt: $\sum_{m=a}^q f_m = 1$)

R_{mj} ... Wärmedurchlasswiderstand des jeweiligen Abschnittes m innerhalb der Schicht j.

Übungsskript Beispiel 1-7

5.4 Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit keilförmigen Schichten

Bauteile mit keilförmigen Schichten sind z. B. Flachdächer mit Gefälledämmung. Aufgrund der unterschiedlichen Bauteil- bzw. Dämmdicke besitzt der Wärmedurchgangskoeffizient U an jeder Stelle der Bauteilfläche A einen anderen Wert.

Es gilt:

$$U = f(d) \quad (5-17)$$

d... Bauteil- oder Dämmdicke

Die Bauteilfläche A befinde sich in der Ebene (x,y). Dann gilt wegen $d = f(x,y)$:

$$U = f(x,y) \quad (5-18)$$

Um den eindimensionalen Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit keilförmigen Schichten berechnen zu können, benötigt man das energetische Mittel des Wärmedurchgangskoeffizienten:

$$U_m = \frac{\sum_i (U_i A_i)}{A_{ges}} \quad (5-19)$$

U_m ... mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient (energetisches Mittel)

A_i ... Flächenelement

U_i ... Wärmedurchgangskoeffizient des Flächenelementes

A_{ges} ... gesamte Bauteilfläche $A_{ges} = \left(\sum_i A_i \right)$

Für ein beliebig kleines Flächenelement gilt dann:

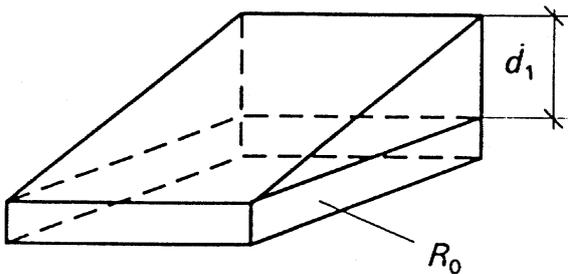
$$U_m = \frac{1}{A_{ges}} \iint_{x,y} U(x,y) dx dy \quad (5-20)$$

mit

$$U(x,y) = \frac{1}{R_{si} + \frac{d(x,y)}{\lambda} + R_{se}} \quad (5-21)$$

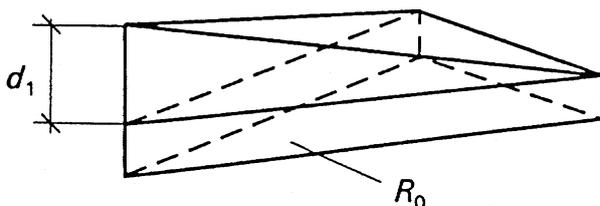
In DIN EN ISO 6946 ist das Doppelintegral für verschiedene Spezialfälle aufgelöst:

1. Rechteckige Fläche



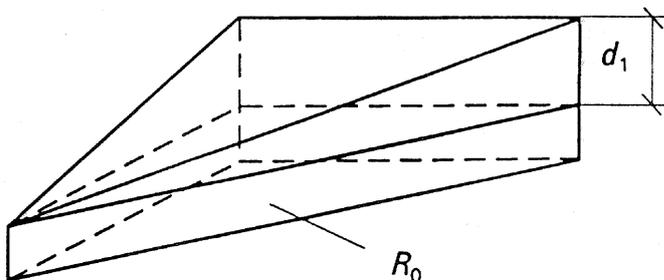
$$U = \frac{1}{R_1} \ln \left[1 + \frac{R_1}{R_0} \right]$$

2. Dreieckige Fläche, dickste Stelle am Scheitelpunkt



$$U = \frac{2}{R_1} \left[\left(1 + \frac{R_0}{R_1} \right) \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_0} \right) - 1 \right]$$

3. Dreieckige Fläche, dünnste Stelle am Scheitelpunkt



$$U = \frac{2}{R_1} \left[1 - \frac{R_0}{R_1} \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_0} \right) \right]$$

R_0 ... Bemessungswert des Wärmedurchgangswiderstandes des restlichen Teiles, einschließlich der Wärmeübergangswiderstände auf beiden Seiten des Bauteils

R_1 ... maximaler Wärmedurchlasswiderstand der keilförmigen Schicht

Für Bauteile mit mehreren keilförmigen Einzelabschnitten i , wie sie in der Regel bei Flachdächern mit Gefälledämmung vorkommen, lässt sich der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient wie folgt ermitteln:

$$U = \frac{\sum_i U_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (5-22)$$

Beispiele für Flachdächer mit zusammengesetzten keilförmigen Einzelabschnitten i :

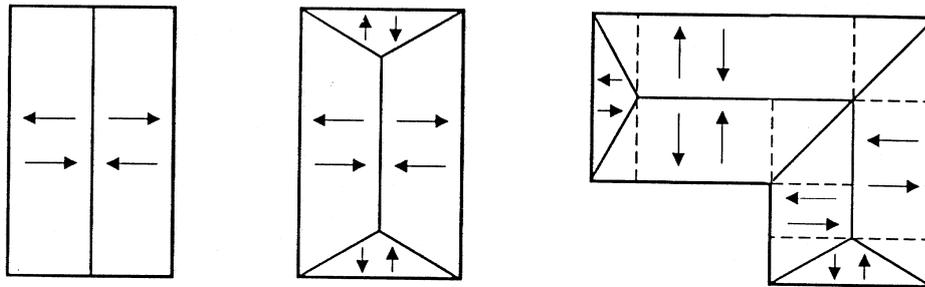


Bild 5-3 Beispiele für die Unterteilung von Dächern in einzelne Teile

Der Wärmedurchgangswiderstand eines Bauteiles mit keilförmigen Schichten ergibt sich nach

$$R_T = \frac{1}{U} \quad (5-23)$$

5.5 Der eindimensionale Wärmedurchgang durch ein Bauteil mit Luftschichten

Luftschichten in Bauteilen werden unterschieden

- in ruhenden Luftschichten innerhalb des Bauteiles ohne Verbindung mit der Umgebung und
- belüftete Luftschichten mit höhenversetzten Zu- und Abluftöffnungen zur Umgebung.

Im Gegensatz zu festen Bauteilschichten, bei denen die Wärmeübertragung ausschließlich über Wärmeleitung erfolgt, wird in ruhenden Luftschichten die Wärme über *Leitung* und *Strahlung* übertragen. In DIN EN ISO 6946 sind Wärmedurchlasswiderstände in Abhängigkeit der Luftschichtdicke angegeben.

Dicke der Luftschicht (mm)	Richtung des Wärmestromes		
	aufwärts	horizontal	abwärts
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.1	0.19
50	0.16	0.18	0.21
100	0.16	0.18	0.22
300	0.16	0.18	0.23

Anm. Zwischenwerte werden interpoliert

Tab. 5-2 Wärmedurchlasswiderstände R in m²K/W von ruhenden Luftschichten nach DIN EN ISO 6946

Bei belüfteten Luftschichten findet eine Luftströmung infolge thermischen Auf- oder Abtriebes statt. Neben den Wärmeübertragungsvorgängen *Leitung* und *Strahlung* ist demzufolge auch der Wärmeübergang durch *freie Konvektion* zu berücksichtigen. Der Wärmedurchlasswiderstand einer belüfteten Luftschicht ist daher kleiner als der einer ruhenden Luftschicht.

Übungsskript Beispiel 1-8

In DIN EN ISO 6946 wird unterschieden in

1. *Schwach belüftete Luftschichten*

Schwach belüftet ist eine Luftschicht, wenn der Luftaustausch mit der Außenumgebung durch Öffnungen folgender Maße begrenzt wird:

- über 500 mm² bis 1 500 mm² je m Länge für vertikale Luftschichten
- über 500 mm² bis 1 500 mm² je m² Oberfläche für horizontale Luftschichten

Die Belüftung hängt von der Größe und Verteilung der Lüftungsöffnungen ab. Als Näherungswert kann der Wärmedurchlasswiderstand einer Bauteilkomponente mit schwach belüfteter Luftschicht wie folgt berechnet werden:

$$R_T = \frac{1500 - A_v}{1000} R_{T,u} + \frac{A_v - 500}{1000} R_{T,v}$$

Dabei ist

$R_{T,u}$ der Wärmedurchlasswiderstand mit einer ruhenden Luftschicht nach Tab. 2.2

$R_{T,v}$ der Wärmedurchlasswiderstand mit einer stark belüfteten Luftschicht

Übungsskript Beispiel 1-9

2. Stark belüftete Luftschichten

Eine Luftschicht gilt als stark belüftet, wenn die Öffnungen zwischen Luftschicht und Außenumgebung

- 1 500 mm² je m Länge für vertikale Luftschichten;
- 1 500 mm² je m² Oberfläche für horizontale Luftschichten überschreiten.

Der Wärmedurchgangswiderstand eines Bauteiles mit einer stark belüfteten Luftschicht ist zu bestimmen, indem der Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht und aller anderen Schichten zwischen Luftschicht und Außenumgebung vernachlässigt wird und ein äußerer Wärmeübergangswiderstand verwendet wird, der

dem bei ruhender Luft entspricht (d. h. gleich dem inneren Wärmeübergangswiderstand desselben Bauteiles ist).

Hinweis für die Praxis: Im Zweifelsfall ist die Berechnungsmethode für stark belüftete Luftschichten anzuwenden.

Übungsskript Beispiel 1-10

5.6 Der Wärmedurchgang durch Fenster

5.6.1 Allgemeines

Die Berechnungsmethode für den Wärmedurchgang durch Fenster und Türen ist in DIN EN ISO 10077-1 angegeben. Die Definition der Bemessungswerte, als Grundlage für wärmeschutztechnische Berechnungen ist in DIN V 4108-4 geregelt.

Allgemein gilt:
$$U_w = f(U_g, U_f, \Psi) \quad (5-24)$$

mit

U_w ... Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters

U_g ... Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung

U_f ... Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens;

Anhaltswerte sind: Holzrahmen: $U_f = 1,1 \dots 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Kunststoffrahmen: $U_f = 1,5 \dots 2,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Metallrahmen mit thermischer Trennung: $U_f = 1,8 \dots 3,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

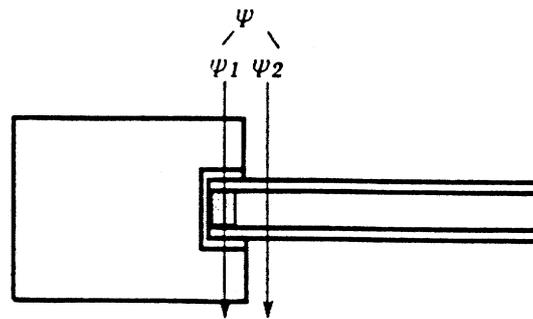
Ψ ... linearer Wärmedurchgangskoeffizient infolge des kombinierten Einflusses von Abstandhalter, Glas und Rahmen. Dieser Wert beschreibt den Einfluss des Randverbundes bei Mehrfachverglasungen. Bei Einfachverglasung ist $\Psi = 0$

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (5-25)$$

Ψ ... linearer Wärmedurchgangskoeffizient des metallischen Abstandhalters bei Mehrfachverglasung

Ψ_1 ... zusätzlicher Wärmestrom pro Meter Länge durch den Rahmen, abhängig von der Art des Rahmens

Ψ_2 ... zusätzlicher Wärmestrom pro Meter Länge, abhängig von U_g



Ψ -Werte für bestimmte Kombinationen aus Rahmen und Verglasung sind in nachfolgender Tabelle aus DIN EN ISO 10077-1 angegeben.

Rahmenwerkstoff	Zweischeiben- oder Dreischeiben-Isolierverglasung, unbeschichtetes Glas, Luft- oder Gaszwischenraum	Zweischeiben-Isolierverglasung mit niedrigem Emissionsgrad, Dreischeiben-Isolierverglasung mit zwei Beschichtungen mit niedrigem Emissionsgrad
	Ψ W/(m · K)	Ψ W/(m · K)
Holz- und Kunststoffrahmen	0,04	0,06
Metallrahmen mit wärmetechnischer Trennung	0,06	0,08
Metallrahmen ohne wärmetechnische Trennung	0	0,02

2) Diese Werte beziehen sich auf Doppelverglasungen mit niedrigem Emissionsgrad; $U_g \sim 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und Dreischeibenverglasung mit niedrigem Emissionsgrad $U_g \sim 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Tab. 5-3 Ψ -Werte für bestimmte Kombinationen aus Rahmen und Verglasung,

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_w erfolgt nach DIN EN ISO 10077-1 getrennt für Einfachfenster, Kastenfenster und Verbundfenster.

5.6.2 Einfachfenster

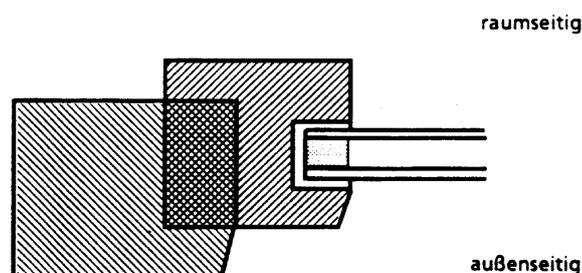


Bild 5-4 Einfachfenster

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_p U_p + A_f U_f + l_g \Psi_g + l_p \Psi_p}{A_g + A_p + A_f} \quad (5-26)$$

mit

- A_g ... verglaste Fläche; Das ist die kleinere der beidseitig sichtbaren Flächen
 A_p ... Fläche einer opaken Füllung (z. B. Paneel); Das ist die kleinere der beidseitig sichtbaren Flächen
 A_f ... Rahmenfläche; Das ist die größere der beidseitigen Projektionsflächen
 l_g ... Gesamtumfang der Verglasung; Das ist die Summe der Umfänge der einzelnen Glasbereiche innerhalb eines Fensters. Unterscheiden sich diese Längen zu beiden Seiten des Elements, dann gilt als Gesamtumfang l_g der größere der beiden Werte
 l_p ... Gesamtumfang der opaken Füllung, analog zu l_g
 U_g ... Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung
 U_p ... Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Füllung
 U_f ... Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens
 Ψ_g ... linearer Wärmedurchgangskoeffizient für den Einfluss des Randverbundes bei Glas
 Ψ_p ... linearer Wärmedurchgangskoeffizient für den Einfluss des Randverbundes bei opaken Füllungen;
 Wenn die opake Füllung im Randverbund durch eine schlecht isolierende Randausbildung thermisch kurzgeschlossen ist, soll dieser Einfluss in gleicher Art und Weise wie bei den Verglasungen berücksichtigt werden

5.6.3 Kastenfenster

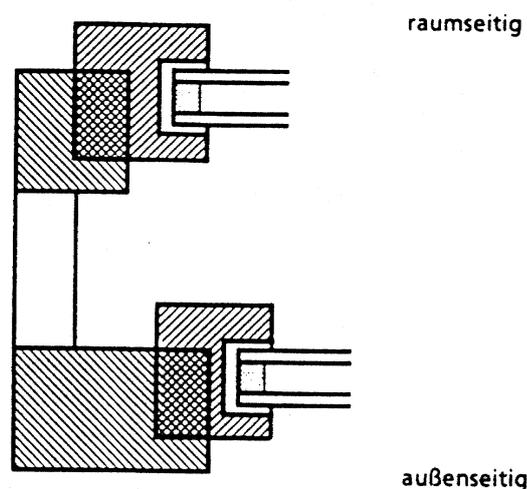


Bild 5-5 Kastenfenster

$$U_w = \frac{1}{(1/U_{w1} - R_{si} + R_s - R_{se} + 1/U_{w2})} \quad (5-27)$$

U_{w1}, U_{w2} ... Wärmedurchgangskoeffizient des äußeren bzw. des inneren Fensters, berechnet nach der Gleichung für Einfachfenster

R_{si} ... der entsprechende raumseitige Wärmeübergangswiderstand des äußeren Fensters; $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... der entsprechende äußere Wärmeübergangswiderstand des raumseitigen Fensters; $R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_s ... der Wärmedurchlasswiderstand des Raumes zwischen der Verglasung der beiden Fenster

Dicke des Luftraums mm	Einseitige Beschichtung mit normalem Emissionsgrad von:				Beide Seiten unbeschichtet
	0,1	0,2	0,4	0,8	
6	0,211	0,190	0,163	0,132	0,127
9	0,298	0,259	0,211	0,162	0,154
12	0,376	0,316	0,247	0,182	0,173
15	0,446	0,363	0,276	0,197	0,186
50	0,406	0,335	0,260	0,189	0,179
100	0,376	0,315	0,247	0,182	0,173
300	0,333	0,284	0,228	0,171	0,163

Tab. 5-4 Wärmedurchlasswiderstände für Luftzwischenräume in Kastenfenstern

5.6.4 Verbundfenster

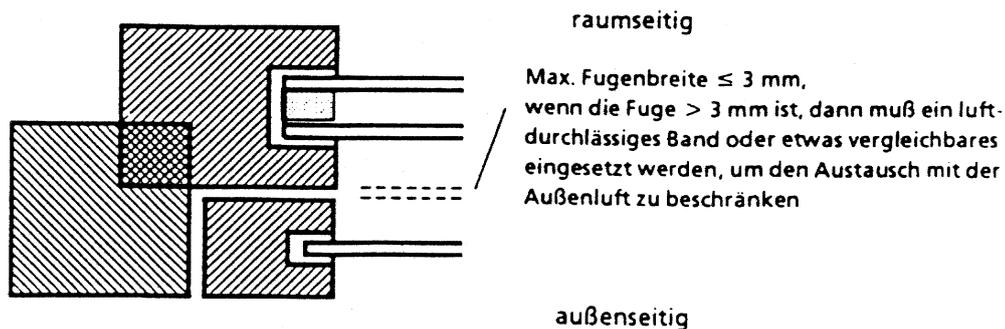


Bild 5-6 Verbundfenster

$$U_g = \frac{1}{(1/U_{g1} - R_{si} + R_s - R_{se} + 1/U_{g2})} \quad (5-28)$$

mit

U_{g1}, U_{g2} Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung im inneren bzw. äußeren Flügel

R_{si} ... der entsprechende raumseitige Wärmeübergangswiderstand des äußeren Fensters; $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... der entsprechende äußere Wärmeübergangswiderstand des raumseitigen Fensters; $R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_s ... der Wärmedurchlasswiderstand des Raumes zwischen der Verglasung der beiden Fenster

Der Wärmedurchgangskoeffizient U_w des Verbundfensters berechnet sich nach der Formel für Einfachfenster

unter Verwendung des U_g -Wertes für Verbundfenster (siehe oben).

Übungsskript Beispiel 1-11

5.6.5 Bemessungswerte nach DIN V 4108-4

Für Nachweisberechnungen zum baulichen Wärmeschutz werden grundsätzlich Bemessungswerte im Sinne der DIN V 4108-4 verwendet. Bemessungswerte sind u. a. auch in bauaufsichtlichen Zulassungen angegeben.

- Merke:
- Nennwert ist die Produktangabe nach DIN-gemäßer Messung oder Berechnung
 - Bemessungswert ist der Rechenwert, der die Einflüsse der Temperatur sowie Schwankungen der Stoffeigenschaften und Alterung der Produkte berücksichtigt

Der Bemessungswert des Fensters lässt sich wie folgt ermitteln:

$$U_{w,BW} = U_w + \sum \Delta U_w \quad (5-29)$$

mit

$U_{w,BW}$... Bemessungswert für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters

U_w ... Nennwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters

ΔU_w ... Korrekturwert nach DIN V 4108-4

Bezeichnung des Korrekturwertes	Korrekturwert ΔU_w W/(m ² ·K)	Grundlage
Glasbeiwert	+ 0,1	Bei Verwendung einer Verglasung ohne Überwachung nach Anhang B
	± 0,0	Bei Verwendung einer Verglasung mit Überwachung nach Anhang B
Korrektur für wärmetechnisch verbesserten Randverbund des Glases ^a	- 0,1	Randverbund erfüllt die Anforderung nach Anhang C
	± 0,0	Randverbund erfüllt die Anforderung nach Anhang C nicht
Korrekturen für Sprossen ^{a,b}		Abweichungen in den Berechnungsannahmen und bei der Messung
- aufgesetzte Sprossen	± 0,0	
- Sprossen im Scheibenzwischenraum (einfaches Sprossenkreuz)	+ 0,1	
- Sprossen im Scheibenzwischenraum (mehrfache Sprossenkreuze)	+ 0,2	
- Glasteilende Sprossen	+ 0,3	
^a Korrektur entfällt, wenn bereits bei Berechnung oder Messung berücksichtigt ^b Eine detaillierte Untersuchung zum Einfluss von Sprossenkonstruktionen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern ist in [2] angegeben.		

Tab. 5-5 Korrekturwerte ΔU_w zur Berechnung der $U_{w,BW}$ -Bemessungswerte nach DIN V 4108-4

Hinweis: Sofern keine näheren Angaben vorliegen, ist $\Delta U_w = + 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu setzen.

In der Regel setzt sich ein Fensterrahmen aus mehreren Einzelprofilen zusammen. Der Bemessungswert des Fensterrahmens $U_{f,BW}$ wird ermittelt aus den Nennwerten der Einzelprofile dieses Rahmens.

U_f -Wert für Einzelprofile $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$		$U_{f,BW}$ -Bemessungswert
	< 0,90	0,80
$\geq 0,90$	< 1,1	1,0
$\geq 1,1$	< 1,3	1,2
$\geq 1,3$	< 1,6	1,4
$\geq 1,6$	< 2,0	1,8
$\geq 2,0$	< 2,4	2,2
$\geq 2,4$	< 2,8	2,6
$\geq 2,8$	< 3,2	3,0
$\geq 3,2$	< 3,6	3,4
$\geq 3,6$	< 4,0	3,8
	$\geq 4,0$	7,0

Tab. 5-6 Zuordnung der U_f -Werte von Einzelprofilen zu einem $U_{f,BW}$ -Bemessungswert des Rahmens nach DIN V 4108-4

Der Bemessungswert des Rahmens wird für die Berechnung des Nennwertes für das Fenster gemäß DIN EN ISO 10077-1 benötigt. Das heißt, der Nennwert des Fensters U_w wird gemäß DIN EN ISO 10077-1 aus dem Bemessungswert des Rahmens $U_{f,BW}$ und dem Nennwert der Verglasung U_g ermittelt (s. a. Abschn. 5.6.1. bis 5.6.4):

$$U_w = f(U_{f,BW}, U_g) \quad (5-30)$$

Sofern keine näheren Angaben über die Fensterabmaße vorliegen, sind für die Ermittlung der U_w - Nennwerte folgende Standardabmaße des Normfensters aus DIN V 4108-4 zu verwenden:

- Fensterabmaß (entspr. Rohbaumaß der Fensteröffnung): 1,23 m x 1,48 m
- durchschnittlicher Rahmenanteil (Blend- und Flügelrahmen): 30 %

daraus lassen sich ermitteln:

- durchschnittliche Fläche der Verglasung pro Fenstereinheit: $A_g = 1,3 \text{ m}^2$
- durchschnittlicher Gesamtumfang der Verglasung pro Fenstereinheit: $l_g = 4,5 \text{ m}$

Für alle Berechnungen mit der Fensterverglasung, die nicht im Zusammenhang mit der U_w -Wert-Ermittlung des Fensters gemäß DIN EN ISO 10077-1 stehen (z. B. Berechnung der kritischen Oberflächentemperatur für Oberflächenkondensat) ist der Bemessungswert für den Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung $U_{g,BW}$ zu verwenden. Dieser lässt sich wie folgt ermitteln:

$$U_{g,BW} = U_g + \Sigma \Delta U_g \quad (5-31)$$

mit

$U_{g,BW}$... Bemessungswert für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung

U_g ... Nennwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung
 ΔU_g ... Korrekturwert nach DIN V 4108-4

Korrekturwert ΔU_g W/(m ² ·K)	Grundlage
+ 0,2	Bei Verwendung einer Verglasung ohne Überwachung nach Anhang B
± 0,0	Bei Verwendung einer Verglasung mit Überwachung nach Anhang B
+ 0,1	Sprossen im Scheibenzwischenraum (einfaches Sprossenkreuz)
+ 0,2	Sprossen im Scheibenzwischenraum (mehrfache Sprossenkreuze)

Tab. 5-7 Korrekturwerte ΔU_g zur Berechnung der $U_{g,BW}$ -Bemessungswerte nach DIN V 4108-4

5.7 Wärmeübertragung über das Erdreich

5.7.1 Allgemeines

Die Berechnungsvorschriften des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen die sich im wärmetechnischen Kontakt mit dem Erdreich befinden sind in DIN EN ISO 13370 festgelegt.

Die Besonderheiten von Wärmeübertragungsvorgängen über das Erdreich sind

1. die wärmespeichernde Masse des Erdreiches selbst und
2. die dreidimensionale Wärmeleitung über das Erdreich an die Außenumgebung und an das Grundwasser (fließendes Grundwasser besitzt eine relativ konstante Temperatur von ca. + 8 °C).

Damit unterscheidet sich die Wärmeübertragung über das Erdreich deutlich von den Wärmeübertragungsvorgängen über an Außenluft grenzende Bauteile. Die beim Wärmedurchgang durch an Außenluft grenzende Bauteile getroffenen Vereinfachungen, insbesondere die der eindimensionalen Wärmeleitung, sind zur Beschreibung von Wärmeübertragungsvorgängen im Gründungsbereich von Bauwerken nicht mehr zulässig.

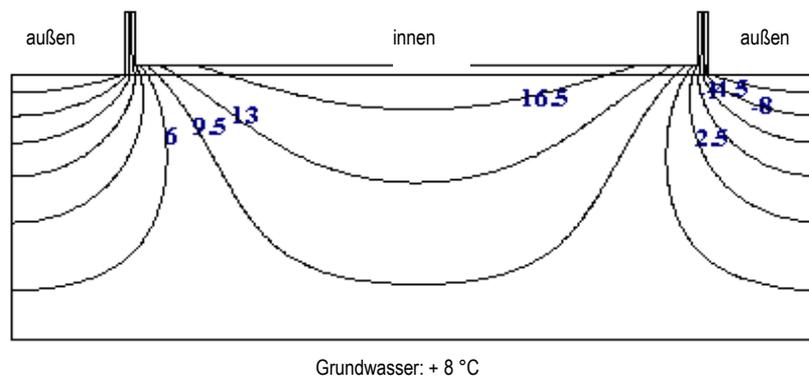


Bild 5-7 Isothermenverlauf am Beispiel einer ungedämmten Bodenplatte

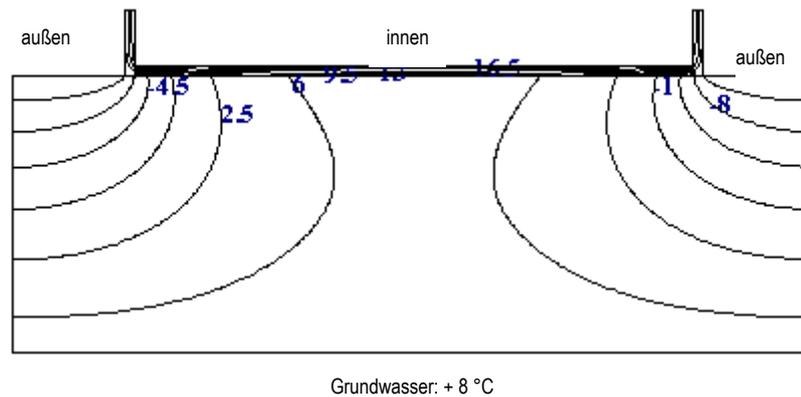


Bild 5-8 Isothermenverlauf am Beispiel einer wärmedämmten Bodenplatte

Bei Bodenplatten mit großer Fläche und relativ schlechter Wärmedämmung bildet sich unterhalb der Bodenplatte im Erdreich eine so genannte „Wärmelinse“ (siehe Bild 5-7). Aufgrund der thermischen Trägheit des Erdreiches kann die Ausbildung dieser „Wärmelinse“ bis zu einem Jahr dauern. Die „Wärmelinse“ behindert den Wärmeabfluss an das Grundwasser und die Umgebung und wirkt gewissermaßen wie eine zusätzliche Wärmedämmung.

Das dreidimensionale zeitabhängige Wärmeleitproblem wird durch die FOURIERsche Differentialgleichung beschrieben (siehe Abschnitt 2.2). Eine allgemeine geschlossene analytische Lösung für diese Dgl. existiert nicht. Sofern keine numerischen EDV-gestützte Verfahren zur Verfügung stehen, müssen für spezielle Geometrien und Randbedingungen Lösungsansätze gefunden werden. In DIN EN ISO 13370 sind für verschiedene Fälle Berechnungsverfahren angegeben.

Dem vereinfachten Berechnungsverfahren liegt die Annahme zugrunde, dass aufgrund der großen thermischen Trägheit des Erdbodens periodische Wärmeströme auftreten, die wiederum vom jährlichen Zyklus von Innen- und Außentemperatur abhängen. Der stationäre Berechnungsfall stellt hierbei eine gute Näherung für die mittlere Wärmeleitung über den Zeitraum einer Heizperiode dar.

Ein erweitertes genaueres Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung des instationären Anteiles ist ebenfalls Bestandteil dieser Norm. Im weiteren werden jedoch nur die vereinfachten stationären Berechnungsansätze vorgestellt.

5.7.2 Bodenplatte auf Erdreich

Berechnung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten:

$$\boxed{U = U_0 + 2 \Delta\Psi / B'} \quad (5-32)$$

mit

U... Wärmedurchgangskoeffizient zwischen innerer und äußerer Umgebung
 U₀... Grundwert des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bodenplatte zur äußeren Umgebung
 ΔΨ... Korrekturwert zum Wärmedurchgangskoeffizienten bei Randdämmung der Bodenplatte

B'... charakteristisches Bodenplattenmaß

Der Grundwert des Wärmedurchgangskoeffizienten lässt sich wie folgt ermitteln:

$$U_0 = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad (5-33)$$

Bei $d_t \geq B'$ (gut gedämmte Bodenplatte) ist:

$$U_0 = \frac{\lambda}{0,457B' + d_t} \quad (5-34)$$

Das dreidimensionale Verhalten der Wärmeleitung im Erdreich ist u. a. von der Größe und Form der Bodenplatte abhängig. Hierfür wird das charakteristische Bodenplattenmaß B' eingeführt:

$$B' = 2 \frac{A}{P} \quad (5-35)$$

mit

A... Bodenplattenfläche (gesamte Grundfläche des Gebäudes)

P... exponierter Umfang der Bodenplatte (Gesamtlänge der Außenwand, die das beheizte Gebäude von der äußeren Umgebung oder von einem unbeheizten Raum außerhalb der gedämmten Gebäudehülle trennt)

Die Dimension bzw. Intensität der Wärmeleitung von innen nach außen hängt von der Wärmedämmung an der Bodenplatte, der Beschaffenheit des Erdreiches und der Dicke der aufgehenden Umfassungswände ab. Hierzu wird die so genannte „wirksame Gesamt-Dicke der Bodenplatte“ d_t eingeführt. Hierbei handelt es sich um die äquivalente thermisch wirksame Dicke der Bodenplatte unter der Annahme das die Wärmeleitung eindimensional erfolgt.

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (5-36)$$

mit

d_t ... wirksame Gesamt-Dicke der Bodenplatte

w ... Dicke der Außenwände (einschließlich sämtlicher Schichten)

λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreichs

Beschreibung	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m · K)
Ton oder Schluff	1,5
Sand oder Kies	2,0
homogener Felsen	3,5

Wenn keine näheren Angaben über die Bodenbeschaffenheit vorliegen, ist $\lambda = 2,0 \text{ W/(m K)}$ zu verwenden.

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_f ... Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplattenkonstruktion einschließlich Dämmschichten

Eine Bodenplatte auf Erdreich kann mit einer Randdämmung versehen sein, die entweder waagrecht oder senkrecht um den Umfang der Bodenplatte angeordnet ist. Gründungen aus Baustoffen geringer Dichte, deren Wärmeleitfähigkeit geringer ist als die des Erdreiches, werden als senkrechte Randdämmung behandelt.

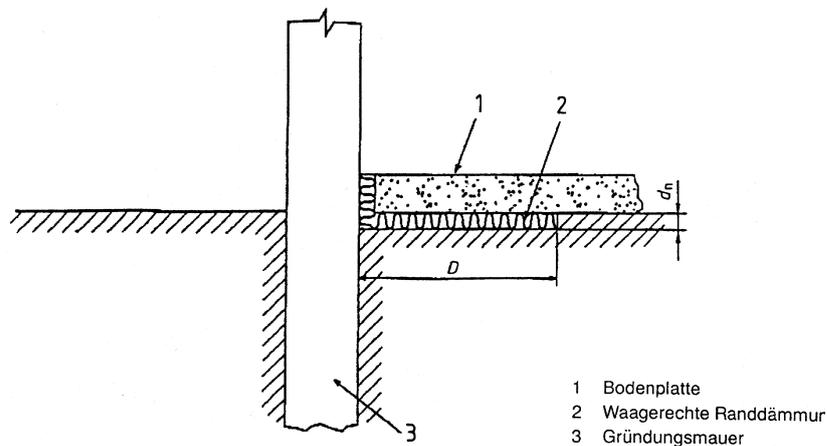


Bild 5-9 Schematische Darstellung einer waagerechten Randdämmung

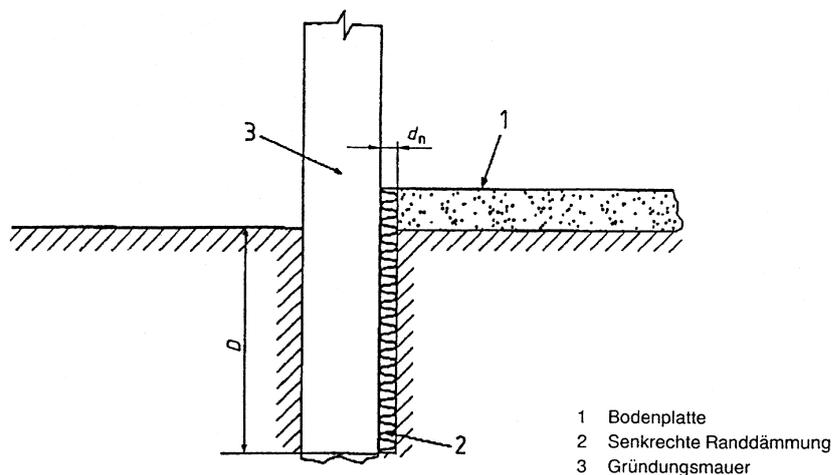


Bild 5-10 Schematische Darstellung einer senkrechten Randdämmung

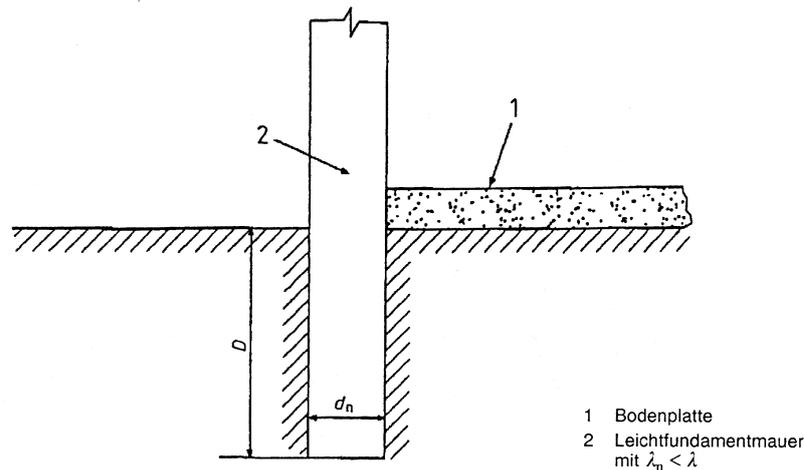


Bild 5-11 Aufgehende Wand aus Baustoffen geringer Dichte mit Funktion einer senkrechten Randdämmung (Gründung aus Baustoffen geringer Dichte)

Der Einfluss einer Randdämmung wird mit dem Korrekturwert $\Delta\Psi$ erfasst. Wenn es sich um eine ungedämmte Bodenplatte ohne Randdämmung oder um eine vollflächig gedämmte Bodenplatte handelt, ist $\Delta\Psi = 0$ und es gilt $U = U_0$. Andernfalls lässt sich $\Delta\Psi$ wie folgt ermitteln:

Waagerechte Randdämmung

$$\Delta\Psi = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln\left(\frac{D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (5-37)$$

D... Breite der Randdämmung

Senkrechte Randdämmung

$$\Delta\Psi = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (5-38)$$

D... Höhe der Randdämmung

Als neue Kenngröße wird hierzu d' eingeführt. Dieser Parameter beinhaltet die zusätzliche wirksame Dicke infolge der Randdämmung. Es gilt:

$$d' = R' \lambda \quad (5-39)$$

mit

$$R' = R_n - d_n / \lambda \quad (5-40)$$

R' ... zusätzlicher Wärmedurchlasswiderstand der Randdämmung (oder Gründung)

R_n ... Wärmedurchlasswiderstand der waagerechten oder senkrechten Randdämmung (oder der Gründung)

d_n ... Dicke der Randdämmung (oder der Gründung)

λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreichs

Wenn einzelne Teile der Gründung aus einer mehrteiligen Randdämmung (senkrecht oder waagrecht, innen oder außen) bestehen, wird $\Delta\Psi$ für jede Randdämmung getrennt berechnet, benutzt wird der Wert, der zum kleinsten Wärmedurchgangskoeffizienten führt.

Übungskript Beispiel 1-12

5.7.3 Aufgeständerte Bodenplatte

Eine aufgeständerte Bodenplatte ist jede Bodenplatte, die auf Abstand zum Erdreich gehalten wird, beispielsweise hölzerne Bodenplatten oder Deckenbalken und Deckensteine. Jede Bodenplatte über einem natürlich mit Außenluft belüfteten Kriechkeller (das kann auch eine natürlich belüftete Tiefgarage sein) ist im Sinne der DIN EN ISO 13370 eine aufgeständerte Bodenplatte. Für den Fall einer mechanisch erzwungenen Lüftung unter aufgeständerten Bodenplatten wird in DIN EN ISO 13370 ein gesondertes Rechenverfahren beschrieben, auf das jedoch hier nicht näher eingegangen wird.

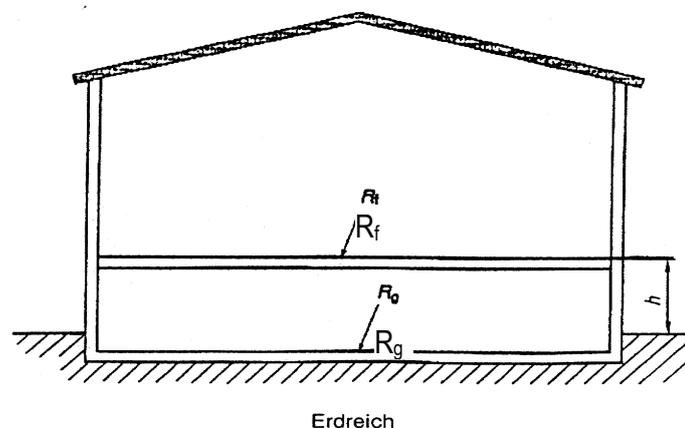


Bild 5-12 Schematische Darstellung einer aufgeständerten Bodenplatte

Der Wärmedurchgangskoeffizient lässt sich wie folgt ermitteln:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x}} \quad (5-41)$$

mit

U ... Wärmedurchgangskoeffizient zwischen innerer und äußerer Umgebung

U_f ... Wärmedurchgangskoeffizient des aufgeständerten Teils der Bodenplatte (zwischen Innenumgebung und Kriechkeller)

U_g ... Wärmedurchgangskoeffizient für den Wärmestrom über das Erdreich

U_x ... wirksamer Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Kriechkeller und Außenumgebung zur Berücksichtigung des Wärmestroms durch die Wände des Kriechkellers und durch Belüftung des Kriechkellers

Die Berechnung von U_f erfolgt nach DIN EN ISO 6946 (siehe Abschnitt 2.5.1), wobei für einen abwärts gerichteten Wärmestrom für die Ober- und Unterseite der aufgeständerten Bodenplatte ein Wärmeübergangswiderstand von

$$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$$

anzusetzen ist.

Die Ermittlung von U_g erfolgt nach folgender Berechnungsvorschrift:

1. Fall: Der Kriechkeller ragt bis maximal 0,5 m unter die Erdreichoberkante in die Tiefe

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_g} \ln \left(\frac{\pi B'}{d_g} + 1 \right) \quad (5-42)$$

mit

B' ... charakteristisches Bodenplattenmaß (siehe Abschnitt „Bodenplatte auf Erdreich“)

d_g ... wirksame Gesamt-Dicke der Fundamentplatte (Unterseite des Kriechkellers),

$$d_g = w + \lambda(R_{si} + R_g + R_{se})$$

w ... Dicke der Außenwände des Kriechkellers

λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreiches

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_g ... Wärmedurchlasswiderstand einer möglicherweise vorhandenen Dämmung auf der Unterseite des Kriechkellers

2. Fall: Der Kriechkeller ragt mehr als 0,5 m unter die Erdreichoberkante in die Tiefe:

$$U_g = U_{bf} + z P U_{bw} / A \quad (5-43)$$

U_{bf} ... Wärmedurchgangskoeffizient der Fundamentplatte (Unterseite des Kriechkellers); Berechnung wie folgt:

$$U_{bf} = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_g + \frac{1}{2}z} \ln \left(\frac{\pi B'}{d_g + \frac{1}{2}z} + 1 \right) \quad (5-44)$$

U_{bw} ... Wärmedurchgangskoeffizient der Kellerwände; Berechnung wie folgt:

$$U_{bw} = \frac{2\lambda}{\pi z} \left(1 + \frac{0,5d_g}{d_g + z} \right) \ln \left(\frac{z}{d_w} + 1 \right); \text{ wenn } d_w < d_g \text{ so ist } d_g = d_w \text{ zu setzen} \quad (5-45)$$

neue Kenngrößen:

z ... Tiefe der Fundamentplatten-Unterkante unter Erdreich-Oberkante

P ... exponierter Umfang der Fundamentplatte

A ... Gesamtfläche der Fundamentplatte

d_w ... wirksame Gesamt-Dicke der Kellerwand

$$d_w = \lambda(R_{si} + R_w + R_{se})$$

λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreiches

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_w ... Wärmedurchlasswiderstand der Kellerwände (einschließlich sämtlicher Schichten)

Der wirksame Wärmedurchgangskoeffizient U_x wird bestimmt nach:

$$U_x = 2hU_w / B' + 1450\varepsilon v f_w / B' \quad (5-46)$$

mit

h ... Höhe der Bodenplatten-Oberkante über der Oberkante des Erdreichs

U_w ... Wärmedurchgangskoeffizient der Wände des Kriechkellers oberhalb der Erdreichoberkante; Berechnung nach DIN EN ISO 6946 (siehe Abschnitt 2.5.1ff)

B' ... charakteristisches Bodenplattenmaß

ε ... die auf den Umfang der Bodenplatte bezogene Fläche der Lüftungsöffnungen in m^2/m

v ... die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in m/s

f_w ... Windabschirmfaktor

Lage	Beispiel	Windabschirmfaktor f_w
Geschützte Lage	Stadtkern	0,02
Mittlere Lage	Stadttrand	0,05
Exponierte Lage	ländlicher Bereich	0,10

Tab. 5-8 Windabschirmfaktor

5.7.4 Beheizter Keller

Für beheizte Kellerräume unterhalb der Erdreichoberkante erfolgt die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten getrennt für:

- Keller-Bodenplatte: U_{bf}
- erdreichberührende Kellerwände: U_{bw}

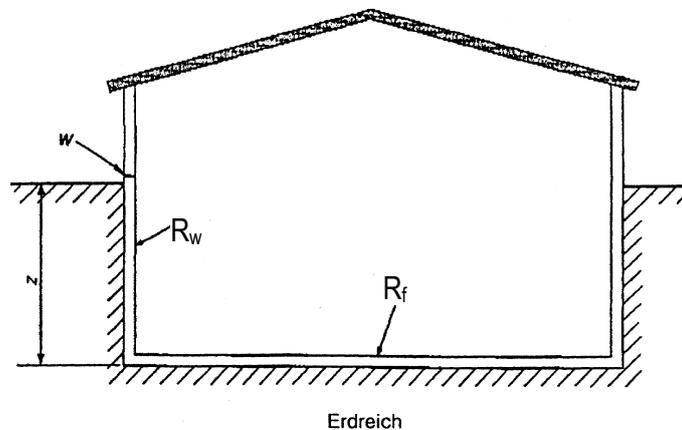


Bild 5-13 Schematische Darstellung eines Gebäudes mit beheiztem Keller

Übungsskript Beispiel 1-13

Keller-Bodenplatte:

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt wie nachstehend:

$$U = U_{bf} = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t + \frac{1}{2}z} \ln \left(\frac{\pi B' + d_t + \frac{1}{2}z}{d_t + \frac{1}{2}z} + 1 \right) \quad (5-47)$$

Bei $(d_t + \frac{1}{2}z) \geq B'$ (gut gedämmte Keller-Bodenplatte) gilt:

$$U = U_{bf} = \frac{\lambda}{0,457B' + d_t + \frac{1}{2}z} \quad (5-48)$$

- U_{bf} ... Wärmedurchgangskoeffizient der Keller-Bodenplatte zwischen innerer und äußerer Umgebung
- λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreiches
- B' ... charakteristisches Bodenplattenmaß (siehe Abschnitt „Bodenplatte auf Erdreich“.)
- z ... Tiefe der Bodenplatten-Unterkante unter Erdreichoberkante
- d_t ... wirksame Gesamt-Dicke der Bodenplatte,

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se})$$

- w ... vollständige Dicke der Gebäudewände in Höhe der Erdreichoberkante, einschließlich sämtlicher Schichten
- R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_f ... Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplattenkonstruktion einschließlich Dämmschichten

Kellerwände gegen Erdreich:

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt wie nachstehend:

$$U = U_{bw} = \frac{2\lambda}{\pi z} \left(1 + \frac{0,5d_t}{d_t + z} \right) \ln \left(\frac{z}{d_w} + 1 \right); \text{ wenn } d_w < d_t \text{ so ist } d_t = d_w \quad (5-49)$$

U_{bw} ... Wärmedurchgangskoeffizient der Kellerwand zwischen innerer und äußerer Umgebung

λ ... Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreiches

z ... Tiefe der Bodenplatten-Unterkante unter Erdreichoberkante

d_t ... wirksame Gesamt-Dicke der Bodenplatte,

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se})$$

w ... vollständige Dicke der Gebäudewände in Höhe der Erdreichoberkante, einschließlich sämtlicher Schichten

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_f ... Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplattenkonstruktion einschließlich Dämmschichten

d_w ... wirksame Gesamt-Dicke der Kellerwand,

$$d_w = \lambda(R_{si} + R_w + R_{se})$$

R_{si} ... innerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_{se} ... äußerer Wärmeübergangswiderstand; $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

R_w ... Wärmedurchlasswiderstand der Kellerwand, einschließlich sämtlicher Schichten

Gesamtes Kellergeschoss

Der wirksame Wärmedurchgangskoeffizient, der den gesamten erdberührten Bereich des Kellergeschosses charakterisiert, ist:

$$U' = \frac{AU_{bf} + zPU_{bw}}{A + zP} \quad (5-50)$$

5.7.5 Unbeheizter oder teilweise beheizter Keller

Berechnungsvorschrift des Wärmedurchgangskoeffizienten für unbeheizte belüftete Keller (Das kann auch eine Tiefgarage sein):

$$U = \left(\frac{1}{U_f} + \frac{A}{AU_{bf} + zPU_{bw} + hPU_w + 0,33nV} \right)^{-1} \quad (5-51)$$

Die erforderlichen Parameter sind größtenteils in Abschnitt „Bodenplatte auf Erdreich“ ff. erläutert. Neue hinzugekommene Kennwerte:

- U... Wärmedurchgangskoeffizient zwischen innerer und äußerer Umgebung
- U_f... Wärmedurchgangskoeffizient der Bodenplatte (zwischen innerer Umgebung und Kellergeschoss)
- U_w... Wärmedurchgangskoeffizient der Kellerwände oberhalb des Erdreiches
- n... Außenluftwechselrate des Kellers in h⁻¹; Bei Fehlen näherer Angaben darf n = 0,3 h⁻¹ angesetzt werden
- V... Luftvolumen des Kellers

Bei teilweise beheizten Kellern sind die Wärmedurchgangskoeffizienten des beheizten und des unbeheizten Teiles getrennt zu ermitteln und anschließend flächengewichtet zu einem resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten zusammenzufassen.

Übungsskript Beispiel 1-14

5.8 Wärmedurchgang durch unbeheizte Räume

Unbeheizte Räume im Sinne der DIN EN ISO 6946 sind z. B.:

- nicht ausgebaute Dachräume
- Garagen
- Lagerräume
- Wintergärten

Zur Beschreibung des Wärmedurchganges durch diese unbeheizten Räume hindurch, kann nach einem vereinfachten Verfahren nach DIN EN ISO 6946 der unbeheizte Raum wie ein Wärmedurchlasswiderstand behandelt werde.

Für nicht ausgebaute belüftete Dachräume werden Wärmedurchlasswiderstände **R_u** des belüfteten Raumes und der (Schräg)-Dachkonstruktion ohne Hinzuziehung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes **R_{se}** angegeben:

Beschreibung des Daches		R_u $m^2 \cdot K/W$
1	Ziegeldach ohne Pappe, Schalung oder ähnlichem	0,06
2	Plattendach oder Ziegeldach mit Pappe oder Schalung oder ähnlichem unter den Ziegeln	0,2
3	Wie 2, jedoch mit Aluminiumverkleidung oder einer anderen Oberfläche mit geringem Emissionsgrad an der Dachunterseite	0,3
4	Dach mit Schalung und Pappe	0,3

Tab. 5-9 Wärmedurchlasswiderstände für nicht ausgebaute belüftete Dachräume

Für alle übrigen kleinen unbeheizten Räume (außer Kellerräume) die sich im baulichen Verbund mit dem beheizten Gebäude befinden, kann der Wärmedurchgangskoeffizient U bestimmt werden, indem der unbeheizte Raum zusammen mit seinen Außenbauteilen so behandelt wird, als wäre er eine zusätzliche homogene Schicht mit einem Wärmedurchlasswiderstand R_u , der sich ergibt nach:

$$R_u = 0,09 + 0,4 \frac{A_i}{A_e} \text{ in } m^2K/W \text{ unter der Bedingung, dass } R_u \leq 0,5 m^2K/W \quad (5-52)$$

Dabei ist:

A_i ... Gesamtfläche aller Bauteile zwischen Innenraum und unbeheiztem Raum

A_e ... Gesamtfläche aller Bauteile zwischen unbeheiztem Raum und Außenumgebung

Befindet sich zwischen Innen- und unbeheiztem Raum mehr als ein Bauteil, sollte R_u in die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten jedes derartigen Bauteiles einbezogen werden.

Für unbeheizte Räume die an Erdreich grenzen (Kellerräume), ist generell das Berechnungsverfahren nach Abschnitt 5.7 anzuwenden.

6 Wärmeübertragungsvorgänge infolge Sonnenstrahlung

6.1 Allgemeines

Das Spektrum der Sonnenstrahlung ist in etwa wie folgt verteilt:

$\lambda < 0,4 \mu m$	(UV-Strahlung)	6 %
$\lambda = 0,4 \dots 0,75 \mu m$	(sichtbare Strahlung)	50 %
$\lambda > 0,75 \mu m$	(Wärmestrahlung)	44 %

Das Energiemaximum liegt bei $\lambda = 0,5 \mu m$.

Die Sonnenstrahlung umfasst einen Wellenlängenbereich der über den der Wärmestrahlung hinausgeht. Die Gesetze der Wärmestrahlung sind daher für die Sonnenstrahlung nicht anwendbar. Während es sich bei der Wärmestrahlung um *langwellige Strahlung* handelt, bezeichnet man im Rahmen der bauphysikalischen Betrachtung die Sonnenstrahlung als *kurzwellige Strahlung*.

6.2 Wärmedurchgang durch nichttransparente Bauteile mit Sonnenstrahlung

Die thermische Belastung der Außenbauteile ist eine Wirkung von vier Klimakomponenten:

- Sonnenstrahlung
- Außenlufttemperatur
- langwellige Gegenstrahlung (d.i. von der Umwelt absorbierte Sonnenstrahlung die in Wärmestrahlung umgewandelt und weitergegeben wird.)
- Wind

Der Wärmeübergang von der Außenumgebung lässt sich unter Berücksichtigung der o. a. Komponenten wie folgt beschreiben:

$$q = h_e (\theta_e - \theta_{se}) + a \cdot I \quad (6-1)$$

mit

q... flächenbezogener Wärmestrom

h_e... äußerer Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Strahlung (berücksichtigt den Einfluss der langwelligen Gegenstrahlung und des Windes)

θ_e... Außenlufttemperatur

θ_{se}... Oberflächentemperatur außen

a... Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung (Achtung! Nicht verwechseln mit Absorptionskoeffizient für Wärmestrahlung)

I... Gesamtstrahlung (= direkte Strahlung + diffuse Strahlung)

Zur Vereinfachung der Berechnungen wird die komplexe Rechengröße *Sonnenlufttemperatur* eingeführt.

$$\theta_s = \theta_e + \frac{a \cdot I}{h_e} \quad (6-2)$$

θ_s... Sonnenlufttemperatur

Die Sonnenlufttemperatur ist eine fiktive Temperatur, die die Luft und die Umgebung annehmen müssten, um auch ohne Sonnenstrahlung die gleiche Wärmemenge zu übertragen wie im realen Fall.

Mit Hilfe der Sonnenlufttemperatur lässt sich der Wärmedurchgang wie folgt darstellen:

$$q = h_e (\theta_s - \theta_{se}) = \frac{\lambda}{d} (\theta_{se} - \theta_{si}) = h_i (\theta_{si} - \theta_i) \quad (6-3)$$

$$q = U (\theta_s - \theta_i) \quad (6-4)$$

Bauwerksoberfläche	Mittelwerte
1 schwarze nichtmetallische Oberflächen (Dachpappe, Asphalt)	0,95
2 dunkle Farben, raue Oberflächen (Ziegel, dunkelrot, dunkelblau)	0,75
3 mittlere Farben, glatte Oberflächen (Beton, Putz, Asbestzement)	0,60
4 helle Farben (gelb, hellblau, hellrot)	0,40
5 weiß	0,35
6 matte Metallflächen	0,55
7 Aluminiumfarbe	0,40
8 blanke, polierte Metallflächen	0,25

Tab. 6-1 Absorptionskoeffizienten für Sonnenstrahlung

Übungsskript Beispiel 1-15

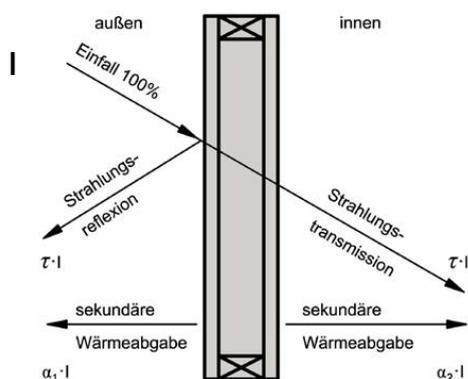
Übungsskript Beispiel 1-16

6.3 Wärmedurchgang durch transparente Bauteile mit Sonnenstrahlung

Transparente Bauteile sind für kurzwellige Sonnenstrahlung durchlässig. Der Anteil der durchgelassenen Sonnenstrahlung ist von der Wellenlänge der Strahlung, dem Einfallswinkel und der Zusammensetzung des Glases abhängig.

Der nicht hindurchgelassene Strahlungsanteil wird reflektiert und absorbiert. Der absorbierte Anteil wird durch Konvektion und langwellige Wärmestrahlung abgegeben.

Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz an einer Zweifachverglasung:



I...Gesamtstrahlung

 τ ...Transmissionsgrad ρ ...Reflexionsgrad α ...Absorptionsgrad q_e ...sekundärer Wärmeabgabegrad nach außen q_i ...sekundärer Wärmeabgabegrad nach innenes gilt: $\tau + \rho + \alpha = 1$

Der Wärmegewinn infolge Sonnenstrahlung setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Phi_S = (\tau \cdot I + q_i \cdot I) \cdot A = g \cdot I \cdot A \quad (6-5)$$

mit

$$g = \tau + q_i \quad (6-6)$$

g ... Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

Der Gesamtenergiedurchlassgrad ist ein Kennwert der Verglasung. Er gibt das Verhältnis der durch die Verglasung in das Gebäudeinnere übertragene Wärmeenergie zur auftreffenden Sonnenstrahlungsenergie an.

Neben dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) ist der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ein wichtiger Glaskennwert für bauphysikalische Berechnungen.

Die Gesamtwärmebilanz für den Wärmedurchgang einer besonnten Außenverglasung lautet:

$$q = \underbrace{U_g (\theta_i - \theta_e)}_{\text{Verluste}} - \underbrace{g \cdot I}_{\text{Gewinne}} \quad (6-7)$$

Der Wärmeübertragungsvorgang der die Raumlufttemperatur außerhalb der Heizperiode maßgeblich beeinflusst lässt sich wie folgt beschreiben:

Die durch die Außenverglasung eingefallene kurzwellige Sonnenstrahlung wird von den raumumschließenden Bauteilen (Fußboden, Wände usw.) absorbiert. Die Oberflächen dieser Bauteile erwärmen sich und es erfolgt eine konvektive Erwärmung der Raumluft und eine langwellige Wärmeabstrahlung an die im Strahlungsaustausch stehenden Bauteiloberflächen. Dieser Vorgang ist stark zeitabhängig, d. h. instationär und hängt u. a. auch vom Wärmespeicherverhalten insbesondere der Innenbauteile ab. D. h. vom Zeitpunkt des Strahlungseinfallens bis zum Zeitpunkt des Anstieges der Raumlufttemperatur können mehrere Stunden, evtl. auch ein Tag vergehen. Neben der zeitlichen Verzögerung findet auch eine Dämpfung des Temperaturverlaufes statt. Im Extremfall kann es dazu führen, dass sich erst gar keine Tagesamplituden der Raumlufttemperatur ausbilden (z. B. historische Kirche).

Für die Berechnung von Raumlufttemperaturen oder Kühllasten muss das instationäre Verhalten berücksichtigt werden. Hierzu gibt es die unterschiedlichsten Berechnungsmodelle, wie z. B.

- Korrekturfaktoren oder äquivalente Temperaturdifferenzen (s. a. VDI 2078)
- Analytische Methoden wie Laplace-Transformation
- Numerische Methoden wie Differenzenverfahren, Finite-Elemente-Methode oder Gewichtsfaktorenmethode

Für energetische Berechnungen wird häufig eine so genannte Zeitkonstante eingeführt. Dieser Begriff entstammt der Regelungstechnik. Dem der Regelungstechnik entlehnten Modell liegt zugrunde, dass der Raum oder das Gebäude als Regelstrecke mit Verzögerung 1. Ordnung (PT1-Glied) abgebildet wird. Die Zeitkonstante beschreibt die Zeitverzögerung bzw. Trägheit des Raumes.

Treibhauseffekt

Strahlung im Wellenlängenbereich von $0,3 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$ wird von einer Einfachverglasung zu etwa 87 % durchgelassen, so dass der überwiegende Anteil der Sonnenstrahlung ins Rauminnere gelangt. Die Durchlässigkeit einer Glasscheibe für langwellige Strahlung ($\lambda > 5 \mu\text{m}$) beträgt hingegen nur etwa 5 %. Das ergibt die bekannte Wärmefallenwirkung des Glases. Die durch die Außenverglasung eingefallene Sonnenstrahlung wird von den Innenoberflächen absorbiert und u. a. als langwellige Wärmestrahlung abgegeben die von der Außenverglasung wiederum absorbiert und reflektiert wird und daher den Raum nicht verlassen kann.

7 Mindestwärmeschutz

7.1 Zweck

Mit den Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz soll die Baukonstruktion dauerhaft vor klimabedingten Beanspruchungen von außen durch Witterungseinflüsse und von innen infolge der Gebäudenutzung geschützt und somit vor Feuchtigkeitsschäden bewahrt werden. Zusätzlich soll die Wärmeübertragung durch die Bauteile so weit verringert werden, dass für die bestimmungsgemäße Gebäudenutzung hygienische Raumklimaverhältnisse gewährleistet werden können.

7.2 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108 erstreckt sich auf Räume in Hochbauten, die ihrer Bestimmung nach auf $\theta_i \geq +12\text{ °C}$ beheizt werden. Demzufolge ist für alle an Räume mit Innentemperaturen $\geq +12\text{ °C}$ grenzenden Bauteile der bauliche Mindestwärmeschutz nachzuweisen.

D. h., der Mindestwärmeschutz ist nicht nur auf die Gebäudehülle anzuwenden, sondern auch auf die wärmeübertragenden Innenbauteile, wie z. B. Treppenhauswände, Kellerdecken, Dachgeschossdecken usw.

Unbeheizte Räume die eine lufttechnische Verbindung zu beheizten Räumen aufweisen und durch diese regelmäßig indirekt auf $\theta_i \geq +12\text{ °C}$ beheizt werden, sind im Sinne der DIN 4108 wie beheizte Räume zu behandeln.

Für sonstige unbeheizte Räume mit $\theta_i < +12\text{ °C}$ gelten in der Regel keine Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. Dies trifft auch auf Räume zu, deren Raumluft ausschließlich infolge technischer Abwärme erwärmt wird und nicht für den Daueraufenthalt von Personen vorgesehen sind, z. B. Technikräume, Traforäume, Serverräume o. ä..

Anforderungen an Wärmebrücken gelten nicht für Räume, die ihrer Bestimmung nach auf niedrige Innentemperaturen ($+12\text{ °C} \leq \theta_i < +19\text{ °C}$) beheizt werden.

7.3 Anforderungen

7.3.1 Nichttransparente Bauteile

Die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz sind in der DIN 4108 zusammengestellt. Im Teil 2 dieser Norm sind Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände bauteilspezifisch festgelegt.

Die Bestimmung der Wärmedurchlasswiderstände erfolgt ausschließlich nach DIN EN ISO 6946. Dies trifft auch auf erdreichberührende Bauteile zu.

Bei Bauteilen mit Abdichtungen werden zur Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes grundsätzlich nur die raumseitigen Bauteilschichten bis zur Abdichtungsebene berücksichtigt. Das heißt, dass beispielsweise eine Bodenplatte mit oberseitig aufgebrachtener Abdichtung gegen Bodenfeuchte in die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes des Bauteiles nicht mit eingehen darf. Ausgenommen von dieser Regelung sind Umkehrdächer mit extrudiertem PS-Hartschaum und Bauteile mit Perimeterdämmung aus extrudiertem PS-Hartschaum oder Schaumglas. Zum Beispiel darf bei einer Bodenplatten mit Perimeterdämmung die Dämmschicht gemäß Zulassungsbescheid für den Wärmedurchlasswiderstand berücksichtigt werden, die Betonplatte mit auf-

liegender Abdichtung jedoch nicht.

Für alle Massivbauteile mit einer flächenbezogenen Gesamtmasse von mindestens 100 kg/m² sind die Mindestwerte für die Wärmedurchlasswiderstände in Tabelle 7-1 angegeben (Auszug aus DIN 4108-2).

Spalte	1		2
Zeile	Bauteile		Wärmedurchlasswiderstand, R m ² · K/W
1	Außenwände; Wände von Aufenthaltsräumen gegen Bodenräume, Durchfahrten, offene Hausflure, Garagen, Erdreich		1,2
2	Wände zwischen fremdgenutzten Räumen; Wohnungstrennwände		0,07
3	Treppenraumwände	zu Treppenträumen mit wesentlich niedrigeren Innentemperaturen (z. B. indirekt beheizte Treppenträume); Innentemperatur $\theta \leq 10^\circ\text{C}$, aber Treppenraum mindestens frostfrei	0,25
4		zu Treppenträumen mit Innentemperaturen $\theta_i > 10^\circ\text{C}$ (z. B. Verwaltungsgebäuden, Geschäftshäusern, Unterrichtsgebäuden, Hotels, Gaststätten und Wohngebäude)	0,07
5	Wohnungstrenndecken, Decken zwischen fremden Arbeitsräumen; Decken unter Räumen zwischen gedämmten Dachsträgen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen	allgemein	0,35
6		in zentralbeheizten Bürogebäuden	0,17
7	Unterer Abschluss nicht unterkellerteter Aufenthaltsräume	unmittelbar an das Erdreich bis zu einer Raumtiefe von 5 m	0,90
8		über einen nicht belüfteten Hohlraum an das Erdreich grenzend	
9	Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen; Decken unter beheizten Räumen zwischen Dachsträgen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen, wärmedämmte Dachsträgen		1,75
10	Kellerdecken; Decke gegen abgeschlossene, unbeheizte Hausflure u. ä.		
11	11.1	nach unten, gegen Garagen (auch beheizte), Durchfahrten (auch verschließbare) und belüftete Kriechkeller ^a	1,2
	11.2	nach oben, z. B. Dächer nach DIN 18530; Dächer und Decken unter Terrassen; Umkehrdächer nach 5.3.3. Für Umkehrdächer ist der berechnete Wärmedurchgangskoeffizient U nach DIN EN ISO 6946 mit den Korrekturwerten nach Tabelle 4 um ΔU zu berechnen.	
a Erhöhter Wärmedurchlasswiderstand wegen Fußkälte.			

Tab. 7-1: Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände von Bauteilen

Anforderungen die von den in Tabelle 7-1 angegebenen Mindestwerten der Wärmedurchlasswiderstände abweichen gelten für folgende Fälle:

1. Leichte Bauteile

- Für
- Außenwände
 - Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen
 - Dächer

mit einer flächenbezogenen Gesamtmasse unter 100 kg/m^2 gelten erhöhte Anforderungen mit einem Mindestwert des Wärmedurchlasswiderstandes $R \geq 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$.

2. Rahmen- und Skelettbauarten

Für Leichtbaukonstruktionen in Rahmen- und Skelettbauweise, hierzu darf sinngemäß auch die Holz-Fachwerk- sowie die Holz-Tafelbauweise gezählt werden, darf der mittlere Wärmedurchlasswiderstand ein Wert von $R \geq 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ nicht unterschreiten. Im Gefachbereich des Bauteiles darf der Wärmedurchlasswiderstand einen Wert von $R \geq 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ nicht unterschreiten.

Der Rahmen von nichttransparenten Ausfachungen darf höchstens einen Bemessungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_{f,BW} \leq 3,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ aufweisen.

Der nichttransparente Teil der Ausfachungen von Fensterwänden und Fenstertüren, die mehr als 50 % der gesamten Ausfachungsfläche betragen, muss der Wärmedurchlasswiderstand $R \geq 1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$, bei Flächenanteilen von weniger 50 % $R \geq 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ betragen.

3. Gebäude bzw. Räume mit niedrigen Temperaturen

Für Außenwände von niedrig beheizten Räumen ($12 \text{ °C} \leq \theta_i < 19 \text{ °C}$) gegen Außenluft, offene Hausflure, Garagen und Erdreich gelten verminderte Anforderungen mit einem Mindestwert des Wärmedurchlasswiderstandes $R \geq 0,55 \text{ m}^2\text{K/W}$.

7.3.2 Transparente Bauteile

Außen liegende Fenster und Türen von beheizten Räumen sind mindestens mit Isolier- oder Doppelverglasung auszuführen.

Fensterfassaden von beheizten Räumen in Pfosten-Riegel-Bauweise sind mindestens in wärmetechnisch getrennten Aluminiumprofilen auszuführen.

7.3.3 Lüftungswärmeschutz

Bei Fugen in der wärmeübertragenden Umfassungsfläche des Gebäudes, insbesondere auch bei durchgehenden Fugen zwischen Fertigteilen oder zwischen Ausfachungen und dem Tragwerk, ist dafür Sorge zu tragen, dass diese Fugen nach dem Stand der Technik dauerhaft und luftundurchlässig

abgedichtet sind.

Der aus Messergebnissen abgeleitete Fugendurchlasskoeffizient von Bauteilanschlussfugen muss $a < 0,1 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$ sein.

Für die Funktionsfugen von Fenstern und Fenstertüren gelten die einzuhaltenden Beanspruchungsgruppen nach DIN 18 055. Demnach darf der Fugendurchlasskoeffizient bei Gebäuden bis 8 m Gebäudehöhe $a \leq 2,0 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$ und bei Gebäuden über 8 m $a \leq 1,0 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$ nicht überschreiten.

Bei Außentüren muss der Fugendurchlasskoeffizient $a \leq 2,0 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$ betragen.

7.3.4 Tauwasserfreiheit der raumseitigen Bauteiloberfläche

Bauteile von Aufenthaltsräumen - im wesentlichen Außenbauteile - sind i.a. so auszubilden, dass ihre raumseitige Bauteiloberfläche tauwasserfrei bleibt. Anderenfalls wären Bauschäden möglich, da solche Tauwassermassen bedenkliche Größenordnungen erreichen können. Ausgenommen sind solche Bauteile, bei denen

- auf Grund zumindest zeitweise ungünstiger raumklimatischer Bedingungen (z.B. hohe relative Feuchte, wie in Bädern oder dgl.) eine vorübergehende Tauwasserbildung nicht zu verhindern ist und
- eine darauf abgestimmte, feuchteabweisende Oberflächenausbildung vorliegt (z.B. Fliesen, Dichtanstrich).

Nachfolgend werden u.a. folgende feuchteschutztechnische Größen benutzt (übrige Größen siehe Umdruck "Bauklimatik und Feuchteschutz"):

ϕ	relative Luftfeuchte, dimensionslos oder in %
p	Wasserdampfdruck in Pa (=N/m ²)
p_s	Wasserdampfsättigungsdruck in Pa
θ_s	Taupunkttemperatur eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in °C

Bedingungen für Tauwasserfreiheit

Eine Tauwasserbildung an der Bauteiloberfläche ist solange nicht möglich, wie dort eine der folgenden Bedingungen eingehalten wird:

- Oberflächentemperatur $\theta_{si} >$ Taupunkttemperatur θ_s der Raumluft in diesem Bereich
- vorhandener Dampfdruck p der Raumluft in diesem Bereich $<$ Sättigungsdruck $p_{s,si}$ an der Bauteiloberfläche.

Beide Bedingungen sind gleichwertig; bei Bauteiloberflächen verwendet man - im Gegensatz zum Nachweis des Tauwasserschutzes für den Bauteilquerschnitt - in der Praxis wegen der besseren Anschaulichkeit i.a. die Temperaturbedingung :

$$\theta_{si} > \theta_s \quad (7-1)$$

Erforderlicher Wärmeschutz für Tauwasserfreiheit

Die Bedingung (7-1) kann - abgesehen von Sonderfällen, z.B. geometrisch bedingte Wärmebrücken - ausschließlich über die Größe des Wärmeschutzes der Bauteils (R oder U) erfüllt werden.

Zu den beiden Größen in (7-1):

- θ_s der Raumluft ergibt sich sofort aus den vorgegebenen, raumklimatischen Werten θ_L und ϕ
- θ_{si} an der Bauteiloberfläche ist für das jeweilige Bauteil aus den Temperaturen der Raumluft (θ_i) und der Außenluft (θ_e) rechnerisch zu ermitteln.

Nachweis für ebene Bauteile bei stationären Klimabedingungen unter Benutzung der Gleichungen :

$$q_i = h_i (\theta_i - \theta_{si}) = q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (7-2)$$

Daraus folgt mit

$$\theta_{si} \geq \theta_s \quad (7-3)$$

der erforderliche Wärmeschutz für die Gewährleistung der Tauwasserfreiheit an der raumseitigen Oberfläche ebener Bauteile:

$$U \leq h_i \cdot (\theta_i - \theta_s) / (\theta_i - \theta_e) \quad (7-4)$$

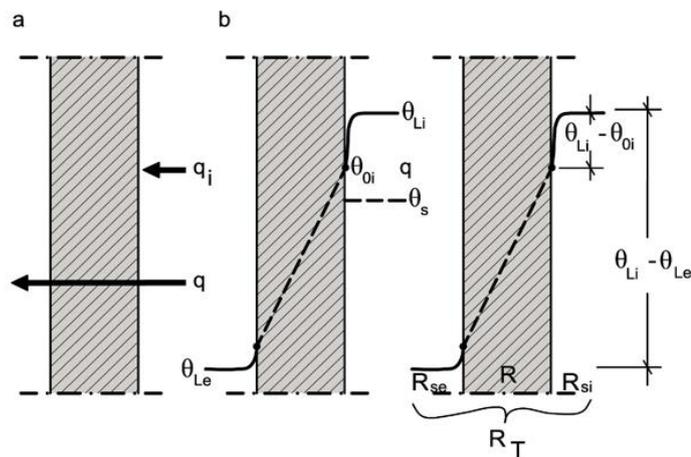


Bild 7-1 Außenbauteil a) Wärmeübergang q_i und Wärmedurchgang q , b) Temperaturverlauf θ im Bereich der Bauteiloberflächen

Aus (2-2) folgt z.B.

$$(\theta_i - \theta_{si}) / (\theta_i - \theta_e) = R_{si} / R_T \quad (7-5)$$

d.h. die Temperaturdifferenzen im Bereich eines Bauteils verhalten sich zueinander wie die zugehörigen Widerstände.

Die Temperaturdifferenz $\theta_i - \theta_{si}$ ist um so größer, d.h. die Oberflächentemperatur θ_{si} um so niedriger (kritischer), je größer der Übergangswiderstand R_{si} ist. Deshalb muss für den Nachweis der Tauwassergefahr an der Bauteiloberfläche - abweichend von den Werten für den Nachweis des Wärmeschutzes und des Tauwasserschutzes für den Bauteilquerschnitt - aus Sicherheitsgründen der Nachweis mit verschärften Randbedingungen geführt werden:

Wärmeübergangswiderstand von mindestens $R_{si} = 0,17$ (gegenüber 0,13)

Außentemperatur $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ (gegenüber -10°C)

Wird der erforderliche Wärmeschutz nach Gleichung (2-3) in Abhängigkeit von den klimatischen Randbedingungen von einem Bauteil nicht erreicht (d.h. vorh $U > \text{zul } U$), dann ist der Wärmeschutz zu verbessern.

Nachweis

Für Aufenthaltsräume in Wohngebäuden oder ähnlich genutzten Gebäuden braucht der Nachweis des Tauwasserschutzes für die Oberfläche im ebenen Bereich von Außenbauteilen nicht geführt zu werden, da der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 Teil 2 so festgelegt ist, dass unter Voraussetzung üblicher Nutzung der Räume (ausreichende Beheizung und Belüftung) eine Tauwassergefahr - zumindest für die ebenen Bereiche - nicht besteht. In allen anderen Fällen als oben beschrieben ist der Nachweis bezüglich Tauwasserfreiheit an der Oberfläche zu führen.

8 Wärmebrücken

Anforderungen an Wärmebrücken gelten nicht für Räume, die ihrer Bestimmung nach auf niedrige Innentemperaturen ($+12\text{ °C} \leq \theta_i < +19\text{ °C}$) beheizt werden.

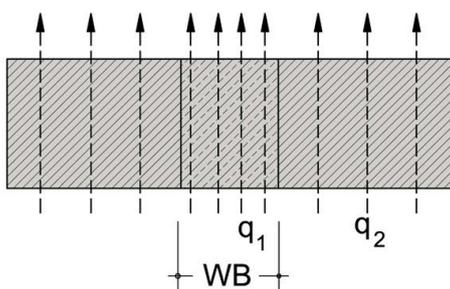
8.1 Definition

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Stellen in der Konstruktion, die gegenüber den benachbarten Stoffschichten eine erhöhte Wärmestromdichte und innenseitig niedrigere Oberflächentemperaturen aufweisen. Jedes Bauwerk hat zahlreiche, oft latente Wärmebrücken unterschiedlicher Art und Auswirkung.

8.2 Klassifizierung

8.2.1 Materialbedingte Wärmebrücken

Materialbedingte Wärmebrücken entstehen durch wärmeleitende Einschlüsse (z. B. Stahlbeton oder Stahlträger) in Baustoffen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit (z. B. Mauerwerk). Der materialbedingte Wärmebrückeneffekt führt zu einer Veränderung der Oberflächentemperatur und zu einem erhöhten Transmissionswärmestrom im Wärmebrückenbereich, d. h. zu zusätzlichen Heizwärmeverlusten.



$$\lambda_1 > \lambda_2$$

$$U_1 > U_2$$

$$q_1 > q_2 \rightarrow \text{zusätzliche Heizwärmeverluste!!!}$$

$$\theta_{si1} < \theta_{si2} \rightarrow \text{Gefahr der Taupunktunterschreitung!!!}$$

Bild 8-1 Prinzip einer materialbedingten Wärmebrücke

allgemein gilt:

$$q = U(\theta_i - \theta_e); \quad U = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_{se}}$$

für den WB-Bereich folgt:

$$\boxed{\lambda_1 \uparrow \rightarrow U_1 \uparrow \rightarrow q_1 \uparrow}$$

d. h. erhöhte Wärmestromdichte im WB-Bereich

allgemein gilt:

$$\Phi = q \cdot A$$

für den WB-Bereich folgt:

wenn $A = \text{const.}$

$$q_1 \uparrow \rightarrow \Phi_1 \uparrow$$

d. h. erhöhter Wärmestrom im WB-Bereich

allgemein gilt:

$$q = U(\theta_i - \theta_e) = h_i(\theta_i - \theta_{si})$$

für den WB-Bereich folgt:

wenn $h_i = \text{const.}$ und $\theta_i = \text{const.}$ dann

$$q \uparrow \rightarrow (\theta_i - \theta_{si}) \uparrow \rightarrow \theta_{si} \downarrow$$

d. h. Absenkung der Innenoberflächentemperatur

Berechnung von θ_{si} im Wärmebrückenbereich:

„Naive“ Methode mit der Annahme, dass sich die nebeneinanderliegende Bereiche nicht beeinflussen (siehe Bild 8-2).

$$\theta_{si,1} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot R_{si} \cdot U_1 \quad (8-1)$$

$$\theta_{si,2} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot R_{si} \cdot U_2 \quad (8-2)$$

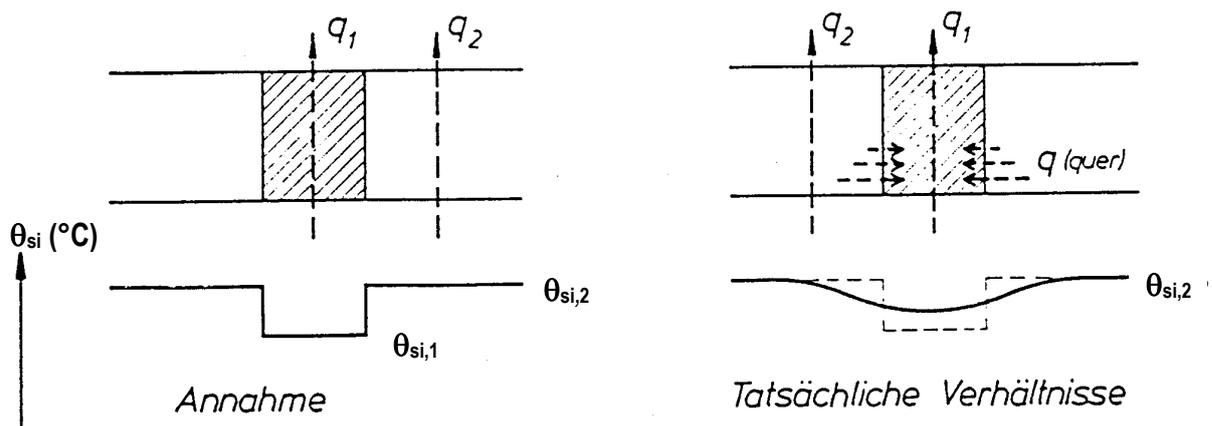
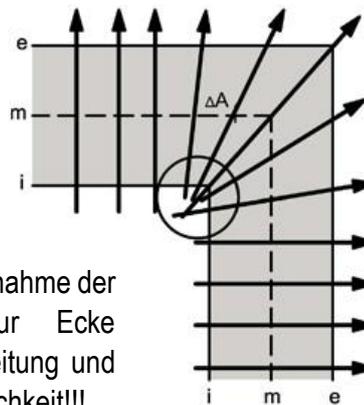


Bild 8-2 Darstellung von angenommenen und tatsächlichem Verlauf von q_{si} im Wärmebrückenbereich

8.2.2 Geometrisch bedingte Wärmebrücken

Geometrisch bedingte Wärmebrücken entstehen durch die Form des Bauteiles bei homogener Materialzusammensetzung. Sie treten regelmäßig z. B. in Form von Gebäudeecken auf. Der geometrisch bedingte Wärmebrückeneffekt führt zu einer Veränderung der Oberflächentemperaturen.

i... Bauteilinnenkante
e... Bauteilaußenkante
m...Mittelachse



erhöhte Wärmestromdichte führt zu einer Abnahme der Oberflächentemperatur in Richtung zur Ecke
→ erhöhte Gefahr von Taupunktunterschreitung und Beeinträchtigungen der thermischen Behaglichkeit!!!

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta A} = \text{const.}$$

$$q_m^m = \text{const.}$$

im WB – Bereich gilt :

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta A_i} \geq \frac{\Delta\Phi}{\Delta A_m}$$

$$q_i \geq q_m$$

Bild 8-3 Prinzip einer geometrisch bedingten Wärmebrücke

allgemein gilt:

$$q_i = h_i (\theta_i - \theta_{si})$$

für den WB-Bereich folgt:

größere Wärmestromdichte an der Bauteilinnenkante $q_i \uparrow$ erfordert größeres Temperaturgefälle $(\theta_i - \theta_{si}) \uparrow$

wenn $h_i = \text{const.}$ und $\theta_i = \text{const.}$ dann

$$q_i \uparrow \rightarrow \theta_{si} \downarrow$$

In Gebäudeecken ist die Raumluftzirkulation und der Strahlungsaustausch mit der Umgebung in der Regel deutlich vermindert. Dies führt zu einer Behinderung des inneren Wärmeüberganges → $h_i \downarrow$ und einer zusätzlichen Absenkung der inneren Oberflächentemperatur im Wärmebrückenbereich.

$$q_i \uparrow + h_i \downarrow \rightarrow \theta_{si} \downarrow \downarrow$$

8.3 Typische Wärmebrücken und Erkennungsmerkmale

Wärmebrücken treten in den verschiedensten Formen und Materialkombinationen auf, wobei es sich oftmals um eine Kombination aus geometrisch bedingtem und materialbedingtem Wärmebrückeneffekt handelt. Aufgabe des Bauphysikers ist es, Wärmebrücken an konstruktiven Details zu erkennen, deren Schadensträchtigkeit zu bewerten und Lösungsvorschläge zur Verminderung bauschädlicher Wärmebrückeneffekte zu erarbeiten.

Als Erkennungsmerkmal und baukonstruktives Gestaltungsprinzip gleichzeitig gilt:

Die wärmeaufnehmende Fläche soll möglichst groß und die wärmeabgebende Fläche möglichst klein sein!

Da Wärmebrückeneffekte nur während der Heizperiode zum Tragen kommen, befindet sich die wärmeaufnehmende Fläche der Wärmebrücke raumseitig und dient als Wärmesammler und die wärmeabgebende Fläche außenseitig kann versinnbildlicht als Wärmeabstrahler angesehen werden.

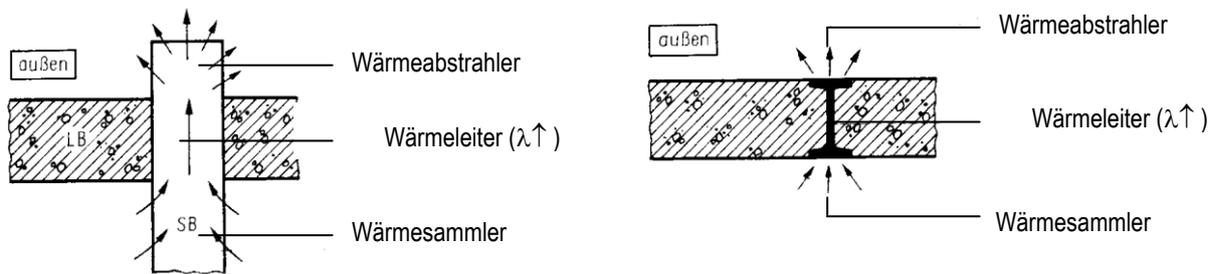


Bild 8-4 Anatomie von Wärmebrücken

Der Wärmestrom durch den Wärmeleiter ist

$$\Phi = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_e) = h_i \cdot A_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (8-3)$$

Wird die wärmeaufnehmende Fläche des Wärmesammlers (A_i) vergrößert, so verringert sich das Temperaturgefälle ($\theta_i - \theta_{si}$) und die Oberflächentemperatur wird in Richtung Raumlufttemperatur angehoben.

$$A_i \uparrow \rightarrow (\theta_i - \theta_{si}) \downarrow \rightarrow \theta_{si} \uparrow \quad \text{bei } \Phi = \text{const.} \quad (8-4)$$

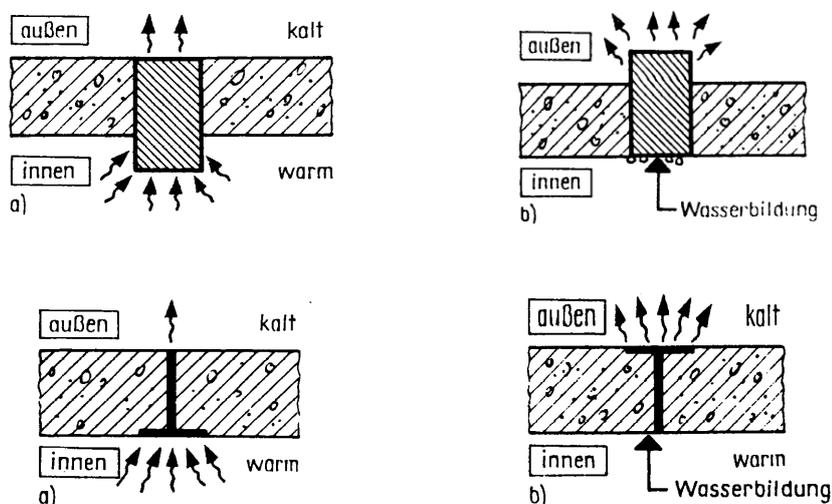


Bild 8-5 a) bauphysikalisch günstig b) bauphysikalisch ungünstig

Unabhängig von den o. g. Zusammenhänge ist jedoch prinzipiell immer anzustreben, den Wärmefluss durch den Wärmeleiter von vornherein zu verringern ($\Phi \downarrow$), indem für den Wärmeleiter ein Material mit einer möglichst geringen Wärmeleitfähigkeit gewählt wird ($U \downarrow$) und der Querschnitt des Wärmeleiters möglichst dünn bleibt ($A \downarrow$).

Aus den oben erläuterten Zusammenhängen wird auch deutlich, warum z. B. eine lückenhaft verlegte Innendämmung bezüglich der Tauwassergefährdung wesentlich kritischer zu bewerten ist als eine lückenhaft verlegte Außendämmung. Denn bei einer Außendämmung ist ein unendlich großer Wärmesammler in Form der Rohbauwand vorhanden.

Typische regelmäßig wiederkehrende Wärmebrücken sind u. a.:

- Fensteranschlüsse (Leibungen, Stürze, Brüstungen)
- auskragende Bauteile (Balkonplatten o. ä.)
- Durchdringungen der Dämmebene (z. B. mit Stahlträgern)
- durchlaufende Säulen vom warmen in den kalten Bereich
- einbindende Innenbauteile an eine Außenwand mit Innendämmung
- Attiken
- Unterbrechungen der Wärmedämmebene jeglicher Art

8.4 Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken

8.4.1 Geometrisch bedingte Wärmebrücken

Gebäudeaußenkanten und Gebäudeaußenecken, deren Wärmedurchlasswiderstände im Regelquerschnitt der angrenzenden Bauteile die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz gemäß DIN 4108-2, Tabelle 3 erfüllen, erfüllen gleichzeitig die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Bereich dieser geometrisch bedingten Wärmebrücke (s. a. Abschnitt 7).

8.4.2 Regelkonstruktionen nach DIN 4108, Beiblatt 2

Im Beiblatt 2 zur DIN 4108 sind 58 Planungs- und Ausführungsbeispiele konstruktiver Details für Gebäude mit einer Innentemperatur $\theta_i \geq + 19 \text{ °C}$ dargestellt.

Für Konstruktionen deren Gleichwertigkeit mit den in DIN 4108, Beiblatt 2 aufgeführten Details im Sinne dieses Beiblattes nachgewiesen werden kann, sind die Mindestanforderungen des baulichen Wärmeschutzes erfüllt. Das heißt, der Schutz vor klimabedingten Feuchte- und Schimmelpilzschäden ist mit diesen Wärmebrückendetails bei bestimmungsgemäßer Nutzung des Gebäudes gewährleistet.

8.4.3 Einzelnachweis zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung

Für material- und konstruktionsbedingte Wärmebrücken die von den Referenzbeispielen aus DIN 4108, Beiblatt 2 abweichen, muss der Einzelnachweis z. B. mit einer Berechnung der raumseitigen Oberflächentemperatur geführt werden. Alternativ ist auch die Verwendung so genannter Wärmebrückenatlanten möglich.

Im Bereich von Wärmebrücken können der Wärmedurchgang und das Temperaturfeld nicht mehr nur eindimensional betrachtet werden. Vielmehr ist die Lösung der FOURIERschen Differentialgleichung für den zwei- oder u. U. auch für den dreidimensionalen Fall erforderlich. In der Praxis wird die Wärmebrückenberechnung EDV-gestützt unter Verwendung numerischer Algorithmen (Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methode) durchgeführt.

Für jede Wärmebrückenberechnung muss ein Berechnungsmodell erstellt werden. Die Berechnungsregeln mit samt aller numerischen Randbedingungen für eine modellhafte Abbildung des konstruktiven Details (Maschenweite des Gitternetzes, Festlegung der Schnittebenen usw.) sind den Normen DIN EN ISO 10211-1 bzw. DIN EN ISO 10211-2 zu entnehmen.

Die Durchführung des Nachweisverfahrens für den Mindestwärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken zur Verhütung von Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbildung ist genormt. Die anzusetzenden Randbedingungen und das Anforderungsniveau sind in DIN 4108-2 kodifiziert.

Klimarandbedingungen:

Außenlufttemperatur:	$\theta_e = -5 \text{ °C}$	(Das ist der niedrigste Tagesmittelwert einer Fünf-Tages-Periode in Deutschland)
Innenlufttemperatur:	$\theta_i = +20 \text{ °C}$	(bzw. gemäß Nutzung)
relative Innenluftfeuchte:	$\phi_i = +50 \text{ %}$	(bzw. gemäß Nutzung)

Zur Erläuterung: Aufgrund der Temperaturträchtigkeit der Bauteile und aufgrund der erforderlichen längeren Einwirkdauer von Tauwasser haben erst Kälteperioden von mehr als fünf Tagen Schimmelpilzprobleme zur Folge.

sonstige Temperaturrendbedingungen:

Keller, Erdreich:	$\theta = +10 \text{ °C}$
unbeheizte Pufferzone:	$\theta = +10 \text{ °C}$
unbeheizter Dachraum:	$\theta = -5 \text{ °C}$

Wärmeübergangswiderstände:

außen:	$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$
beheizte Räume:	$R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ (bei erheblicher Beeinträchtigung des Wärmeüberganges, z. B. durch Möblierung vor der Wand, ist $R_{si} = 0,50 \text{ m}^2\text{K/W}$ zu setzen)
unbeheizte Räume:	$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$

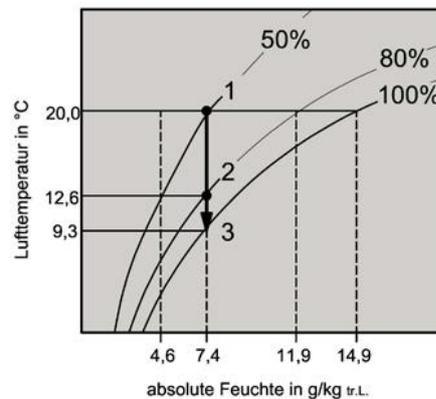
Schimmelpilzbildung kann nicht, wie häufig angenommen, erst im Taupunktbereich, sondern infolge Kapillarkondensation bei porösen Materialien bereits bei einer relativen Oberflächenfeuchte von

$$\phi_{si} \approx 80 \text{ %}$$

einsetzen. Als Voraussetzung für Schimmelpilzwachstum sind jedoch neben der Oberflächenfeuchte noch weitere Einflüsse entscheidend, so z. B. Oberflächenbeschaffenheit (Fliesenbeläge sind z. B. relativ unproblematisch), Nahrungsangebot an organischen Stoffen (Tapetenkleister, Staub o. ä.), Dauer der Feuchteeinwirkung

usw.

Bewertungs- und Anforderungskriterium für den Mindestwärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken ist daher die Temperatur, auf die die Raumluft abgekühlt werden muss, um eine relative Feuchte von $\phi = 80\%$ anzunehmen. Bauteiloberflächen die unter stationären Bedingungen mit den o. g. Klimarand- und Wärmeübergangsbedingungen diese Temperatur θ_{80} über einen längeren Zeitraum (z. B. fünf Tage) unterschreiten sind potentiell schimmelpilzgefährdet.



1...Raumluftzustand

2.. Einsetzende Gefahr der Schimmelpilzbildung

3...Taupunkt

Bild 8-6 Darstellung der Klimazustände im Mollier-Diagramm

Übungsskript Beispiel 1-17

Übungsskript Beispiel 1-18

Zur Bewertung der Schimmelpilz- und Tauwassergefahr nach DIN 4108-2 wird anstatt der Oberflächentemperatur auch der so genannte Temperaturfaktor f_{Rsi} verwendet.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \leq 0,70 \quad (8-5)$$

Der Temperaturfaktor wird auch als Relativtemperatur oder normierte Innen-Oberflächentemperatur bezeichnet. Der Temperaturfaktor ist eine konstruktionsabhängige von den Klimabedingungen bereinigte Eigenschaft und dimensionslose Bewertungsgröße einer jeden Wärmebrücke.

Um die Mindestanforderung des Wärmeschutzes im Bereich von Wärmebrücken gemäß DIN 4108-2 zu erfüllen, muss der Temperaturfaktor einer jeden Wärmebrücke bei den o. g. Normbedingungen

$$f_{Rsi} \geq \frac{12,6 - (-5)}{20 - (-5)} = 0,70 \quad (8-6)$$

betragen.

Je größer der Temperaturfaktor f_{Rsi} ist, desto höher ist die wärmeschutztechnische Anforderung an das Wärmebrückendetail. Für von den Normbedingungen nach DIN 4108-2 abweichende Nutzungs- bzw. Raumklimabedingungen müssen die Anforderungen entsprechend angepasst werden.

Der Temperaturfaktor als feste Kenngröße einer Wärmebrücke ändert seinen Wert auch nicht bei veränderlichen Klimarandbedingungen. Daher ist es möglich, anhand des Temperaturfaktors für jede beliebige Kombination der Lufttemperaturen (θ_e , θ_i) die minimale Oberflächentemperatur (θ_{si}) zu berechnen.

Übungsskript Beispiel 1-19

8.4.4 Maßnahmen zur Verminderung der Wärmebrückenwirkung

Wärmebrücken sollten von vornherein durch baukonstruktive Maßnahmen soweit wie möglich vermieden werden. Dies trifft insbesondere für Neubauvorhaben zu. Erst wenn alle bauseitigen Möglichkeiten zur Verminderung der Wärmebrückeneffekte ausgeschöpft sind, ist zu prüfen inwieweit durch flankierende Maßnahmen der Haustechnik, u. U. sogar unter Einsatz von Energie, der Bautenschutz dauerhaft gewährleistet werden kann.

Folgende bauliche Maßnahmen kommen in Betracht und müssen von Fall zu Fall geprüft werden.

1. Außendämmung (Detail einpacken, Konstruktion warm halten)

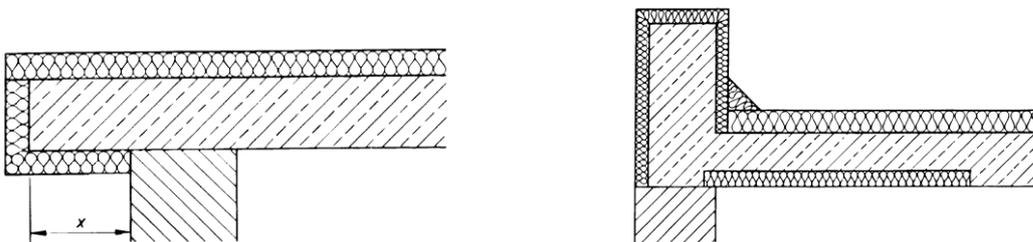


Bild 8-7 Außendämmung einer überstehenden Betonplatte und einer Attika eines Flachdaches

Bei auskragenden Bauteilen mit einer Auskragtiefe $x \geq 1$ Meter ist eine vollflächige Außendämmung nicht mehr notwendig, da sie ab spätestens einer Dämmlänge von $x = 1$ Meter keine weitere Verminderung der Wärmebrückenwirkung mit sich bringt.

2. Flankierende Wärmedämmung außen

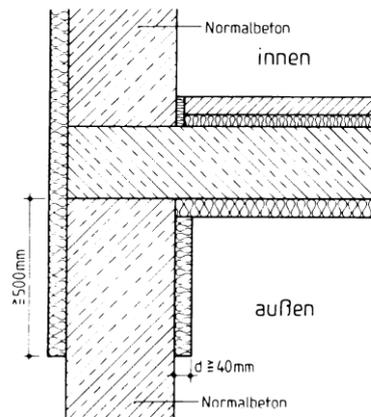


Bild 8-8 Flankierende Außendämmung einer Betonwand eines Luftgeschosses

Der Weg der Wärmeleitung wird verlängert, d. h. dem Wärmestrom wird ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt ($I \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow \Phi \downarrow$). Man sagt auch: Der Wärmestrom wird verzögert. Je nach Situation des konstruktiven Details sollte die Dämmlänge der Flankendämmung mindestens 500...1000 mm betragen. Dämmängen über 1 Meter bringen wegen des Kühlrippeneffektes keine weitere Verbesserung und können daher grundsätzlich unterbleiben.

3. Flankierende Wärmedämmung innen (so genannter Verzögerungsstreifen)

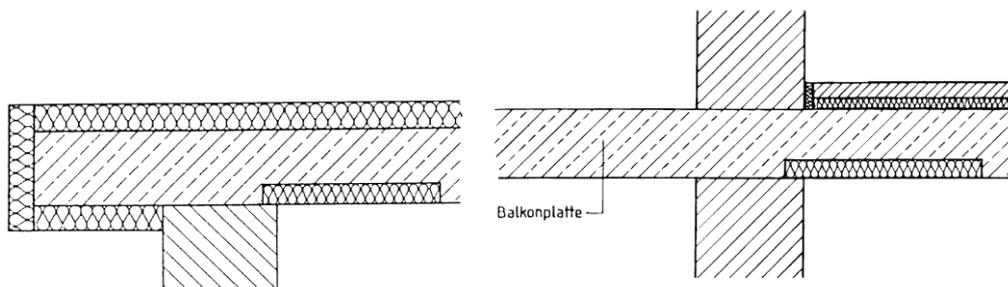


Bild 8-9 Flankierende Innendämmung als zusätzliche oder alleinige Lösung

Das Wirkprinzip einer flankierenden Innendämmung ist analog dem der flankierenden Außendämmung. In der Regel wird die auf der Innenseite angeordnete Wärmebrückendämmung beim Neubau bereits als verlorene Schalung eingebaut. Hierzu eignen sich geschlossenzellige Hartschaumplatten oder Schaumglas. Unter Umständen muss ein Nachweis der Wasserdampfdiffusion geführt werden. Bei Anwendung einer nachträglichen Wärmebrückendämmung auf der Innenseite ist auf einen flächenbündigen und fugendichten Einbau mit einem geeigneten Klebemörtel zu achten. Um Feuchtprobleme zu vermeiden ist insbesondere die Luftdichtigkeit im Bereich der Anschluss- und Stoßfugen zu gewährleisten.

4. Thermische Trennung

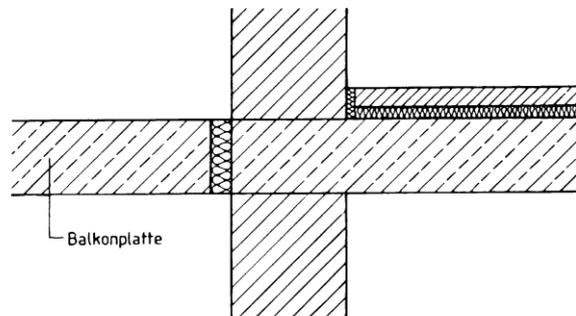


Bild 8-10 Thermische Trennung einer Balkonplatte

Die thermische Trennung eines auskragenden Bauteiles stellt von allen Maßnahmen die wirkungsvollste und damit sicherste Lösung dar. Sofern aus statischer Sicht keine Einwände bestehen, sollte einer solchen Lösung immer der Vorzug gegeben werden. Die Verbindung zwischen Innen- und Außenbauteil erfolgt über Edelstahlanker mit integriertem Wärmedämmelement aus Hartschaum.

5. Kontrollierte Entwässerung des Kondensates an der Wärmebrücke, z. B. bei Stahlträgern mit Korrosionsschutz (absolute Notlösung)

Haustechnische Maßnahmen (in der Regel nicht als Planungsgrundlage für Neubauvorhaben geeignet):

6. Wärmeübergang an der gefährdeten Stelle erhöhen, z. B. mit Lüftungsstrahl einer Lüftungsanlage
7. Gefährdete Stelle beheizen, z. B. Luftheizung, Konvektorheizung, elektrische Heizmatten zum Aufkleben
8. Entfeuchtung der Raumluft mit einer Klimaanlage

8.5 Energetische Betrachtung von Wärmebrücken

8.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Nachweisführung zum energiesparenden Wärmeschutz nach der Energieeinsparverordnung müssen die Wärmebrückeneinflüsse an der wärmeübertragenden Umfassungsfläche des beheizten Gebäudes erfasst werden. Wärmebrücken zwischen normal ($\theta_i \geq 19 \text{ °C}$) und niedrig ($12 \text{ °C} \leq \theta_i < 19 \text{ °C}$) beheizten Bereichen dürfen vernachlässigt werden.

Für die Ermittlung der Energieverluste über Wärmebrücken stehen drei Ansatzmöglichkeiten zur Verfügung.

8.5.2 Pauschalmethode ohne Nachweis

Der Wärmebrückeneinfluss wird wie folgt durch einen pauschalen Korrekturwert $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erfasst.

$$H_T = \sum [(F_{xi} U_i A_i) + (\Delta U_{WB} A_i)] \quad (8-7)$$

- H_T ... spezifischer Transmissionswärmeverlust der wärmeübertragenden Gebäudehülle in W/K
 F_{xi} ... Temperatur-Korrekturfaktor für Bauteile die an unbeheizte oder niedrig beheizte Bereiche oder Erdreichgrenzen
 U_i ... Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteiles in W/(m²K)
 A_i ... Bauteilfläche (Außenmaße) in m²
 ΔU_{WB} ... pauschaler Wärmebrückenzuschlag des Bauteiles in W/(m²K)

Bei Bauteilen bei denen Wärmebrückeneinflüsse bereits im Rahmen der U-Wert - Berechnung berücksichtigt wurden, ist $\Delta U_{WB} = 0$ zu setzen. Hierbei handelt es sich z. B. um Fenster deren Wärmebrückeneinfluss des Randverbundes bereits im Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 10077-1 enthalten ist.

8.5.3 Pauschalmethode mit Nachweis

Der Wärmebrückeneinfluss wird analog zu dem o. a. Ansatzverfahren durch einen pauschalen Korrekturwert $\Delta U_{WB} = 0,05$ W/(m²K) erfasst.

Diese Ansatzmöglichkeit ist zulässig, wenn die energetische Güte aller Wärmebrücken gemäß den Regelkonstruktionen von DIN 4108, Beiblatt 2 nachgewiesen wird.

Im Rahmen des Energieeinsparnachweises nach dem vereinfachten Verfahren für Wohngebäude ist ausschließlich diese Methode anzuwenden.

8.5.4 Detaillierte Ermittlung jeder einzelnen Wärmebrücke

Der erhöhte Transmissionswärmeverlust über linienförmige Wärmebrücken wird über den so genannten längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ erfasst.

Es gilt dann:

$$H_T = \sum (F_{xi} U_i A_i) + \sum (\Psi_j l_j) \quad (8-8)$$

- H_T ... spezifischer Transmissionswärmeverlust der wärmeübertragenden Gebäudehülle in W/K
 F_{xi} ... Temperatur-Korrekturfaktor für Bauteile die an unbeheizte Bereiche oder Erdreichgrenzen
 U_i ... Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteiles in W/(m²K)
 A_i ... Bauteilfläche (Außenmaße) in m²
 Ψ_j ... längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizienten in W/(mK)
 l_j ... Länge der linienförmigen Wärmebrücke

Punktuelle Wärmebrücken, wie z. B. mechanische Befestigungsteile von Vorsatzschalen o. ä. sind soweit möglich in die U-Wert-Berechnung des betreffenden Bauteiles mit aufzunehmen (siehe DIN EN ISO 6946). Ein zusätzlicher Wärmebrückenzuschlag wie bei linienförmigen Wärmebrücken ist für punktuelle Wärmebrücken im Rahmen der Nachweisführung nicht vorgesehen.

Der längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient beschreibt die Wärmeverlustdifferenz des *gestörten* Wärmebrückenbereiches zum *ungestörten* Bereich. Der Ψ -Wert kann Wärmebrückenkatalogen entnommen oder nach DIN EN ISO 10211-2 für jede linienförmige Wärmebrücke wie folgt ermittelt werden:

$$\Psi = L^{2D} - \sum (F_{xj} U_j l_j) \quad (8-9)$$

- Ψ ... längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten in W/(mK)
 L^{2D} ... längenbezogener thermischer Leitwert aus einer 2-D-Berechnung des jeweils zwei Bereiche trennenden Bauteiles in W/(mK)
 F_{xj} ... Temperatur-Korrekturfaktor für Bauteile die an unbeheizte Bereiche oder Erdreich grenzen
 U_j ... Wärmedurchgangskoeffizient für den ungestörten Bereich
 l_j ... Außenkantenlänge des für die 2-D-Berechnung verwendeten Bauteilmodells für den U_j gilt (Achtung: Dieser Wert darf nicht mit der Länge der linienförmigen Wärmebrücke verwechselt werden!)

Der längenbezogene thermische Leitwert einer Wärmebrücke setzt sich wie folgt zusammen:

$$L^{2D} = \frac{q_i}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (8-10)$$

- L^{2D} ... längenbezogener thermischer Leitwert aus einer 2-D-Berechnung des jeweils zwei Bereiche trennenden Bauteiles in W/(mK)
 q_i ... längenbezogene Wärmestromdichte an der Außenkante des für die 2-D-Berechnung verwendeten Bauteilmodells in W/m
 $(\theta_i - \theta_e)$... Temperaturdifferenz zwischen innen und außen für die die 2-D-Berechnung durchgeführt wurde

Übungsskript Beispiel 1-20

Übungsskript Beispiel 1-21

Übungsskript Beispiel 1-22

9 Sommerlicher Wärmeschutz

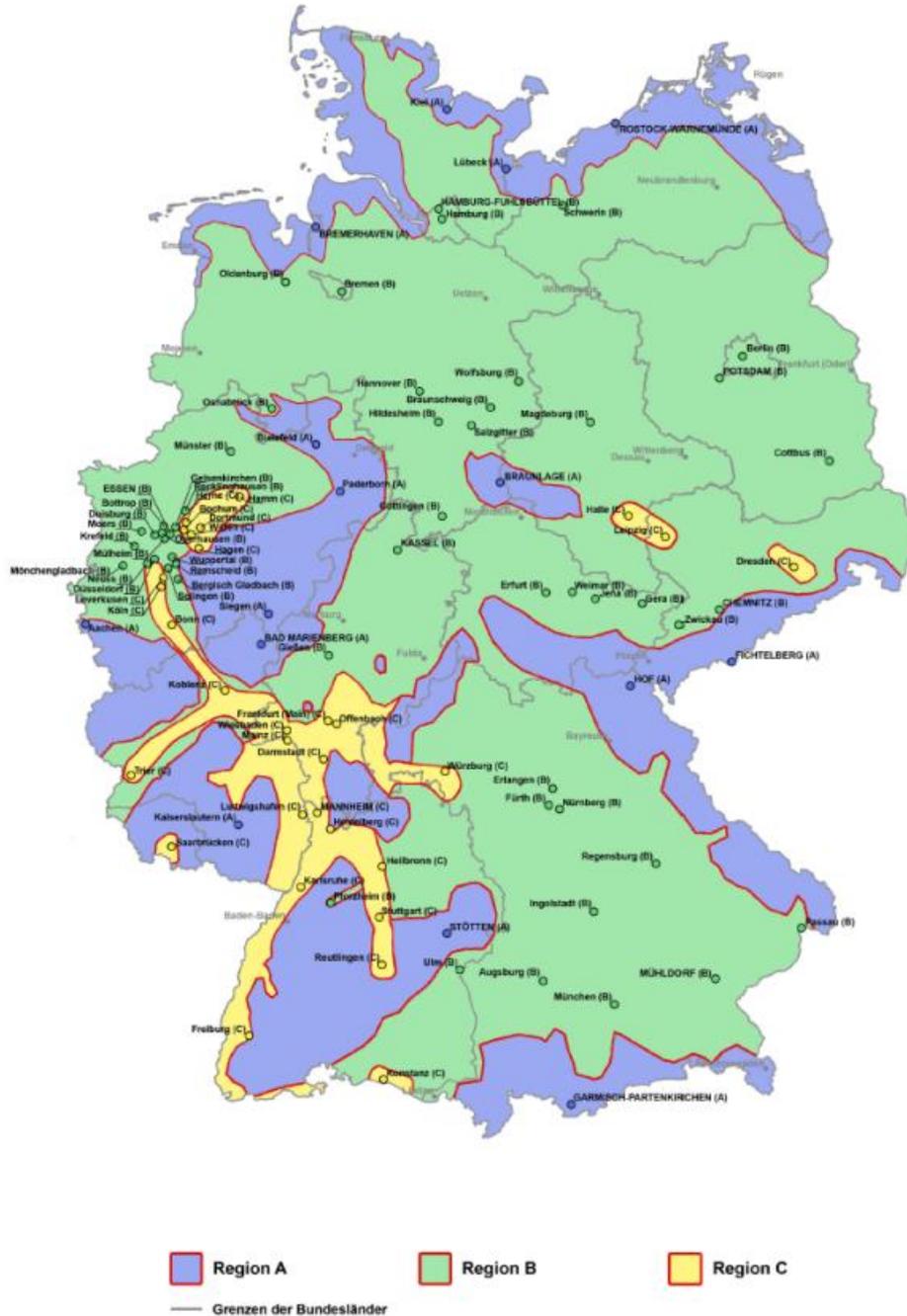
9.1 Zweck

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gelten für beheizte Räume und Gebäude.

Mit den Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 soll erreicht werden, dass Aufenthaltsräume im Sommer ohne Anlagentechnik zur Kühlung auskommen bzw. der Kühlenergiebedarf von nutzungsbedingt klimatisierten Räumen so gering wie möglich gehalten wird. Insbesondere soll in Räumen ein behagliches Raumklima in den Sommermonaten sichergestellt werden, indem die Überschreitungen des Bezugswertes der Innentemperatur (operative Temperatur bzw. Empfindungstemperatur) in Höhe und Dauer (bezogen auf die übliche Anwesenheitszeit) begrenzt sind. Der Bezugswert der Innentemperatur ist abhängig von der Klimaregion und beträgt $\theta_{o,limit} = + 25...+ 27$ °C, je nach Standort. Für die Bewertung der Überschreitung dieses Bezugswertes wird ein Anforderungswert, die sogenannten Übertemperaturgradstunden, definiert.

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ der Innentemperatur °C	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden Kh/a	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A	25	1 200	500
B	26		
C	27		

Tab 9-1 Grenzwerte der Innentemperaturen in Abhängigkeit der Klimaregion



Tab 9-2 Sommer-Klimaregionen für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2

9.2 Der Sonneneintragskennwert

Der sommerliche Wärmeschutz nach DIN 4108-2 stellt konstruktive Anforderungen, insbesondere an Art und Größe der Außenverglasung und die Abschirmqualitäten eines bauseitigen Sonnenschutzes. Im Rahmen der Nachweisführung werden keine Raumtemperaturen ermittelt.

Als bauliche Kenngröße zur Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes eines Raumes wird gemäß DIN 4108-2 der so genannte Sonneneintragskennwert eingeführt.

$$S = \frac{\sum_j (A_{w,j} \cdot g_{total,j})}{A_G} \quad (9-1)$$

S... Sonneneintragskennwert

$A_{w,j}$... Fensterfläche in m^2

A_G ... Nettogrundfläche des Raumes oder des Raumbereiches in m^2

$g_{total,j}$...resultierender Gesamtenergiedurchlassgrad von Verglasung und Sonnenschutz

Der resultierende Gesamtenergiedurchlassgrad aus Verglasung und Sonnenschutz g_{total} kann vereinfacht wie folgt berechnet werden:

$$g_{total} = g \cdot F_C \quad (9-2)$$

g ... Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung nach DIN EN 410

F_C ... Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes

Anhaltswerte für Abminderungsfaktoren von Sonnenschutzvorrichtungen dürfen Tabelle Tab.9-1 aus DIN 4108-2 entnommen werden.

In Wirklichkeit besteht jedoch auch eine Abhängigkeit des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung, die insbesondere bei innenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen sehr ausgeprägt ist:

$$F_C = f(g) ! \quad (9-3)$$

Daher lassen sich die Abschirmqualitäten eines Sonnenschutzes, insbesondere eines innenliegenden Sonnenschutzes, nur in Verbindung mit der Verglasung beurteilen. Für die Formulierung der Sonnenschutzanforderungen ist es deshalb immer günstiger, mit dem resultierenden Gesamtenergiedurchlassgrad g_{total} zu arbeiten.

Zeile	Sonnenschutzvorrichtung ^a	F_C		
		$g \leq 0,40$ (Sonnenschutzglas) zweifach	$g > 0,40$	
			dreifach	zweifach
1	ohne Sonnenschutzvorrichtung	1,00	1,00	1,00
2	Innenliegend oder zwischen den Scheiben ^b			
2.1	weiß oder hoch reflektierende Oberflächen mit geringer Transparenz ^c	0,65	0,70	0,65
2.2	helle Farben oder geringe Transparenz ^d	0,75	0,80	0,75
2.3	dunkle Farben oder höhere Transparenz	0,90	0,90	0,85
3	Außenliegend			
3.1	Fensterläden, Rollläden			
3.1.1	Fensterläden, Rollläden, $\frac{3}{4}$ geschlossen	0,35	0,30	0,30
3.1.2	Fensterläden, Rollläden, geschlossen ^e	0,15 ^e	0,10 ^e	0,10 ^e
3.2	Jalousie und Raffstore, drehbare Lamellen			
3.2.1	Jalousie und Raffstore, drehbare Lamellen, 45° Lamellenstellung	0,30	0,25	0,25
3.2.2	Jalousie und Raffstore, drehbare Lamellen, 10° Lamellenstellung ^e	0,20 ^e	0,15 ^e	0,15 ^e
3.3	Markise, parallel zur Verglasung ^d	0,30	0,25	0,25
3.4	Vordächer, Markisen allgemein, freistehende Lamellen ^f	0,55	0,50	0,50

^a Die Sonnenschutzvorrichtung muss fest installiert sein. Übliche dekorative Vorhänge gelten nicht als Sonnenschutzvorrichtung.

^b Für innen- und zwischen den Scheiben liegende Sonnenschutzvorrichtungen ist eine genaue Ermittlung zu empfehlen.

^c Hoch reflektierende Oberflächen mit geringer Transparenz, Transparenz $\leq 10\%$, Reflexion $\geq 60\%$.

^d Geringe Transparenz, Transparenz $< 15\%$.

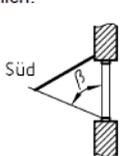
^e F_C -Werte für geschlossenen Sonnenschutz dienen der Information und sollten für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nicht verwendet werden. Ein geschlossener Sonnenschutz verdunkelt den dahinterliegenden Raum stark und kann zu einem erhöhten Energiebedarf für Kunstlicht führen, da nur ein sehr geringer bis kein Einfall des natürlichen Tageslichts vorhanden ist.

^f Dabei muss sichergestellt sein, dass keine direkte Besonnung des Fensters erfolgt. Dies ist näherungsweise der Fall, wenn

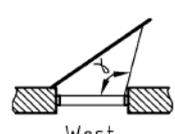
- bei Südorientierung der Abdeckwinkel $\beta \geq 50^\circ$ ist;
- bei Ost- und Westorientierung der Abdeckwinkel $\beta \geq 85^\circ$ ist $\gamma \geq 115^\circ$ ist.

Der F_C -Wert darf auch für beschattete Teilflächen des Fensters angesetzt werden. Dabei darf F_C nach DIN V 18599-2:2011-12, A.2, nicht angesetzt werden.

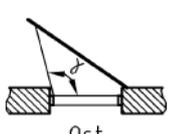
Zu den jeweiligen Orientierungen gehören Winkelbereiche von $22,5^\circ$. Bei Zwischenorientierungen ist der Abdeckwinkel $\beta \geq 80^\circ$ erforderlich.



Süd



West



Ost

Vertikalschnitt durch Fassade
Horizontalschnitt durch Fassade

Tab 9-3 Anhaltswerte für Abminderungsfaktoren F_C von fest installierten Sonnenschutzvorrichtungen

Der resultierende Gesamtenergiedurchlassgrad aus Verglasung und Sonnenschutz kann nach E DIN EN 13363-1 wie folgt ermittelt werden:

1. Außenliegender Sonnenschutz

$$g_{\text{total}} = \tau_e \cdot g + \alpha_e \cdot \frac{\Lambda}{\Lambda_2} + \tau_e (1-g) \cdot \frac{\Lambda}{\Lambda_1} \quad (9-4)$$

2. Innenliegender Sonnenschutz

$$g_{\text{total}} = g \cdot \left(1 - g \cdot \rho_e - \alpha_e \cdot \frac{\Lambda}{\Lambda_2} \right) \quad (9-5)$$

3. Sonnenschutz zwischen den Glasscheiben

$$g_{\text{total}} = g \cdot \tau_e + g \cdot (\alpha_e + (1-g) \cdot \rho_e) \cdot \frac{\Lambda}{\Lambda_3} \quad (9-6)$$

g ... Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung nach DIN EN 410

τ_e ... Strahlungstransmissionsgrad des Sonnenschutzes im solaren Bereich

α_e ... Strahlungsabsorptionsgrad des Sonnenschutzes im solaren Bereich

ρ_e ... Strahlungsreflexionsgrad des Sonnenschutzes im solaren Bereich

U_g ... Nennwert des Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung in $W/(m^2K)$

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{1}{U_g} + \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2}} ; \Lambda_1 = 6 \text{ W}/(m^2K); \Lambda_2 = 18 \text{ W}/(m^2K); \Lambda_3 = 3 \text{ W}/(m^2K); \tau_e + \alpha_e + \rho_e = 1$$

9.3 Anforderungen

Die Anforderung an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 lautet für jeden betreffenden Raum:

$$S \leq S_{\text{zul}} \quad (9-7)$$

Das heißt, der Nachweis ist raum- und nicht fassadenweise zu führen. Hierbei ist es ausreichend den Sonneneintragskennwert einiger repräsentativer Referenzräume des Gebäudes die gleichzeitig den ungünstigsten Fall darstellen zu ermitteln und mit dem zulässigen Höchstwert S_{zul} zu vergleichen.

Der zulässige Höchstwert S_{zul} eines Raumes ist abhängig von:

- der Bauschwere der Innenbauteile
- der Möglichkeit einer erhöhten Nachtlüftung
- der Himmelsorientierung der Fenster
- der Fensterneigung
- der Art der Verglasung
- dem Außenklima

und

wird gemäß DIN 4108-2 wie folgt ermittelt:

$$S_{zul} = \sum \Delta S_x \quad (9-8)$$

Die Zuschlagswerte ΔS_x sind nach dem Bonus-Malus-Prinzip folgender Tabelle aus DIN 4108-2 zu entnehmen:

Nutzung		Anteiliger Sonneneintragskennwert S_x						
		Wohngebäude			Nichtwohngebäude			
Klimaregion ^a		A	B	C	A	B	C	
Nachtlüftung und Bauart								
S ₁	Nachtlüftung	Bauart ^b						
	ohne	leicht	0,071	0,056	0,041	0,013	0,007	0,000
		mittel	0,080	0,067	0,054	0,020	0,013	0,006
		schwer	0,087	0,074	0,061	0,025	0,018	0,011
	erhöhte Nachtlüftung ^c mit $n \geq 2 \text{ h}^{-1}$	leicht	0,098	0,088	0,078	0,071	0,060	0,048
		mittel	0,114	0,103	0,092	0,089	0,081	0,072
		schwer	0,125	0,113	0,101	0,101	0,092	0,083
	hohe Nachtlüftung ^d mit $n \geq 5 \text{ h}^{-1}$	leicht	0,128	0,117	0,105	0,090	0,082	0,074
		mittel	0,160	0,152	0,143	0,135	0,124	0,113
schwer		0,181	0,171	0,160	0,170	0,158	0,145	
Grundflächenbezogener Fensterflächenanteil f_{WG}^e								
S ₂	$s_2 = a - (b \cdot f_{WG})$	a	0,060			0,030		
		b	0,231			0,115		
Sonnenschutzglas^{f,i}								
S ₃	Fenster mit Sonnenschutzglas ^f mit $g \leq 0,4$	0,03						
Fensterneigung^{g,i}								
S ₄	$0^\circ \leq \text{Neigung} \leq 60^\circ$ (gegenüber der Horizontalen)	$-0,035 f_{neig}$						
Orientierung^{h,i}								
S ₅	Nord-, Nordost- und Nordwest-orientierte Fenster soweit die Neigung gegenüber der Horizontalen $> 60^\circ$ ist sowie Fenster, die dauernd vom Gebäude selbst verschattet sind	$+0,10 f_{nord}$						
Einsatz passiver Kühlung								
S ₆	Bauart							
	leicht	0,02						
	mittel	0,04						
	schwer	0,06						

a	Ermittlung der Klimaregion nach Bild 1.
b	<p>Ohne Nachweis der wirksamen Wärmekapazität ist von leichter Bauart auszugehen, wenn keine der im Folgenden genannten Eigenschaften für mittlere oder schwere Bauart nachgewiesen sind.</p> <p>Vereinfachend kann von mittlerer Bauart ausgegangen werden, wenn folgende Eigenschaften vorliegen:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Stahlbetondecke; — massive Innen- und Außenbauteile (flächenanteilig gemittelte Rohdichte $\geq 600 \text{ kg/m}^3$); — keine innenliegende Wärmedämmung an den Außenbauteilen; — keine abgehängte oder thermisch abgedeckte Decke; — keine hohen Räume ($> 4,5 \text{ m}$) wie z. B. Turnhallen, Museen usw. <p>Von schwerer Bauart kann ausgegangen werden, wenn folgende Eigenschaften vorliegen:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Stahlbetondecke; — massive Innen- und Außenbauteile (flächenanteilig gemittelte Rohdichte $\geq 1600 \text{ kg/m}^3$); — keine innenliegende Wärmedämmung an den Außenbauteilen; — keine abgehängte oder thermisch abgedeckte Decke; — keine hohen Räume ($> 4,5 \text{ m}$) wie z. B. Turnhallen, Museen usw. <p>Die wirksame Wärmekapazität darf auch nach DIN EN ISO 13786 (Periodendauer 1 d) für den betrachteten Raum bzw. Raumbereich bestimmt werden, um die Bauart einzuordnen; dabei ist folgende Einstufung vorzunehmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> — leichte Bauart liegt vor, wenn $C_{\text{wirk}} / A_G < 50 \text{ Wh}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ <p>Dabei ist</p> <ul style="list-style-type: none"> C_{wirk} die wirksame Wärmekapazität; A_G die Nettogrundfläche. <ul style="list-style-type: none"> — mittlere Bauart liegt vor, wenn $50 \text{ Wh}/(\text{K} \cdot \text{m}^2) \leq C_{\text{wirk}} / A_G \leq 130 \text{ Wh}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$; — schwere Bauart liegt vor, wenn $C_{\text{wirk}} / A_G > 130 \text{ Wh}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$.
c	Bei der Wohnnutzung kann in der Regel von der Möglichkeit zu erhöhter Nachtlüftung ausgegangen werden. Der Ansatz der erhöhten Nachtlüftung darf auch erfolgen, wenn eine Lüftungsanlage so ausgelegt wird, dass durch die Lüftungsanlage ein nächtlicher Luftwechsel von mindestens $n = 2 \text{ h}^{-1}$ sichergestellt wird.
d	Von hoher Nachtlüftung kann ausgegangen werden, wenn für den zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit besteht, geschossübergreifende Nachtlüftung zu nutzen (z. B. über angeschlossenes Atrium, Treppenhaus oder Galerieebene). Der Ansatz der hohen Nachtlüftung darf auch erfolgen, wenn eine Lüftungsanlage so ausgelegt wird, dass durch die Lüftungsanlage ein nächtlicher Luftwechsel von mindestens $n = 5 \text{ h}^{-1}$ sichergestellt wird.
e	$f_{\text{WG}} = A_W / A_G$ Dabei ist <ul style="list-style-type: none"> A_W die Fensterfläche; A_G die Nettogrundfläche. <p>Hinweis Die durch S_1 vorgegebenen anteiligen Sonneneintragskennwerte gelten für grundflächenbezogene Fensterflächenanteile von etwa 25 %. Durch den anteiligen Sonneneintragskennwert S_2 erfolgt eine Korrektur des S_1-Wertes in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil, wodurch die Anwendbarkeit des Verfahrens auf Räume mit grundflächenbezogenen Fensterflächenanteilen abweichend von 25 % gewährleistet wird. Für Fensterflächenanteile kleiner 25 % wird S_2 positiv, für Fensterflächenanteile größer 25 % wird S_2 negativ.</p>
f	<p>Als gleichwertige Maßnahme gilt eine Sonnenschutzvorrichtung, welche die diffuse Strahlung nutzerunabhängig permanent reduziert und hierdurch ein $g_{\text{tot}} \leq 0,4$ erreicht wird. Bei Fensterflächen mit unterschiedlichem g_{tot} wird S_3 flächenanteilig gemittelt:</p> $S_3 = 0,03 \cdot A_{W, g_{\text{tot}} \leq 0,4} / A_{W, \text{gesamt}}$ <p>Dabei ist</p> <ul style="list-style-type: none"> $A_{W, g_{\text{tot}} \leq 0,4}$ die Fensterfläche mit $g_{\text{tot}} \leq 0,4$; $A_{W, \text{gesamt}}$ die gesamte Fensterfläche.
g	$f_{\text{neig}} = A_{W, \text{neig}} / A_{W, \text{gesamt}}$ Dabei ist <ul style="list-style-type: none"> $A_{W, \text{neig}}$ die geneigte Fensterfläche; $A_{W, \text{gesamt}}$ die gesamte Fensterfläche.
h	$f_{\text{nord}} = A_{W, \text{nord}} / A_{W, \text{gesamt}}$ Dabei ist <ul style="list-style-type: none"> $A_{W, \text{nord}}$ die Nord-, Nordost- und Nordwest-orientierte Fensterfläche soweit die Neigung gegenüber der Horizontalen $> 60^\circ$ ist sowie Fensterflächen, die dauernd vom Gebäude selbst verschattet sind; $A_{W, \text{gesamt}}$ die gesamte Fensterfläche. <p>Fenster, die dauernd vom Gebäude selbst verschattet werden: Werden für die Verschattung F_s Werte nach DIN V 18599-2:2011-12 verwendet, so ist für jene Fenster $S_5 = 0$ zu setzen.</p>
i	Gegebenenfalls flächenanteilig gemittelt zwischen der gesamten Fensterfläche und jener Fensterfläche, auf die diese Bedingung zutrifft.

Tab 9-2 Zuschlagswerte zur Bestimmung des maximal zulässigen Höchstwertes des Sonneneintragskennwertes

9.4 Thermische Vergleichsmessungen durch das IBP Holzkirchen

K ü n z e l hat die sommerlichen Raumtemperaturen in vielen Einfamilienhäusern in Holzbauart einerseits und in schwerer Massivbauart andererseits gemessen. Obwohl keine gleichartigen Randbedingungen vorlagen (weder hinsichtlich Gebäudegeometrie, Wärmeschutz der Außenbauteile, Energiedurchlässigkeit der Fenster, noch hinsichtlich der Nutzungsgepflogenheiten der Bewohner), hat sich gezeigt, dass der Unterschied in den Raumtemperaturen zwischen den Massivgebäuden und den Holzhäusern klein war. Die großen Differenzen hinsichtlich Bauteilmasse und Wärmespeicherfähigkeit wurden durch ein anderes Verhalten der Bewohner kompensiert. In den Holzhäusern wurden z.B. die Rollläden im Mittel öfter betätigt als in den Massivgebäuden (siehe Bild 8-1 und Bild 8-2).

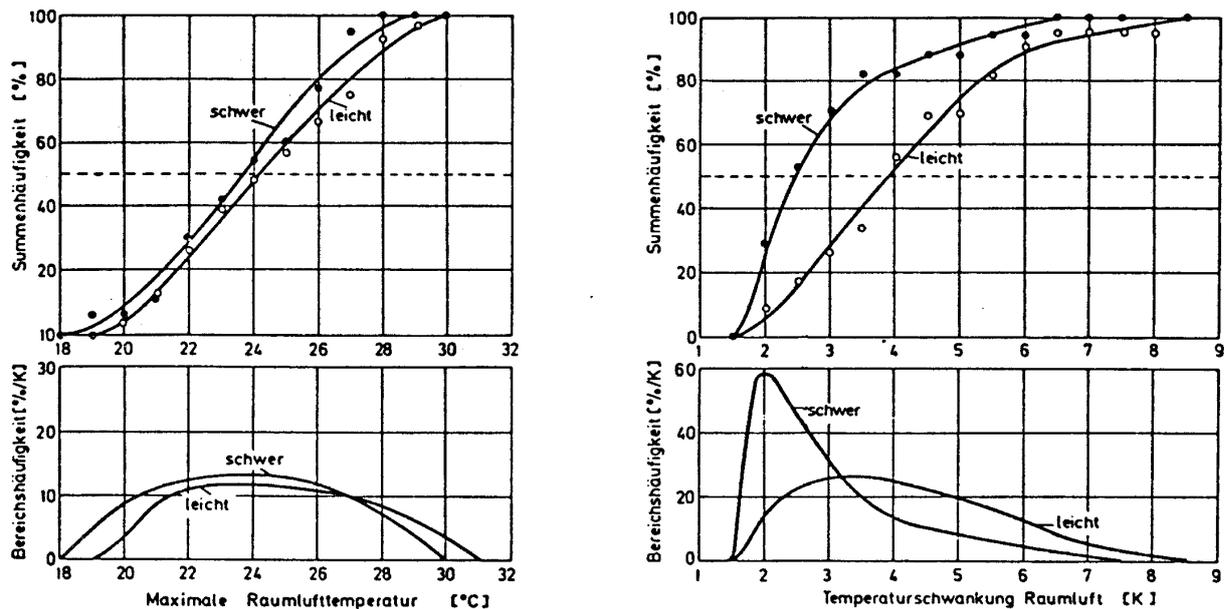


Bild 8-1 Summen- und Bereichshäufigkeitsverteilung für die untersuchten Wohnräume

Links: die Raumlufttemperatur – Maxima Rechts: die Tagesschwankungen der Raumlufttemperatur

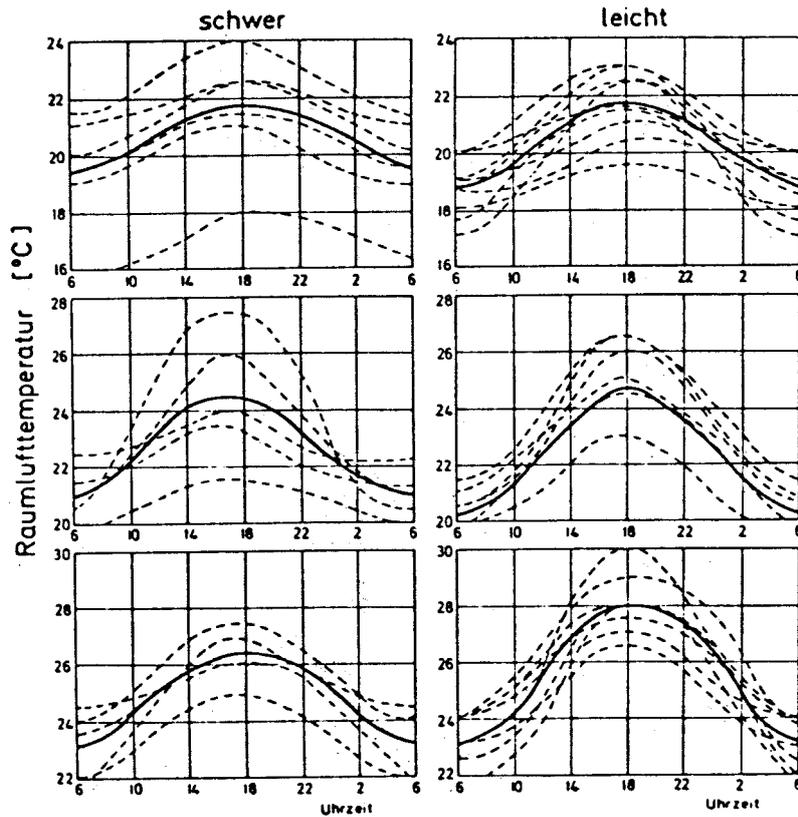


Bild 8-2 Tagesverläufe der Raumlufthemperatur in den Wohnräumen schwerer und leichter Bauart (Einzelobjekte - Mittelwert)

Zur besseren Übersicht werden nachstehend die gewonnenen Häufigkeitswerte zusammengefasst (Tab. 8-).

Bauart	Maximale Raumlufthemperatur	Maximale Temperaturschwankung	Benutzung des Sonnenschutzes
	1)	1)	2)
schwer	23,7 °C	2,5 K	53%
leicht	24,2 °C	4,0 K	70%
1) Im statistischen Mittel (50% - Wert)			
2) Häufigkeit			

Tab. 8-3 Ergebnis der Vergleichsmessungen K ü n z e l

9.5 Thermisch-Energetische Vergleichsrechnungen durch das BBS INSTITUT

9.5.1 Grundlagen der Thermisch-energetische Gebäudesimulation

Thermisch – energetische Berechnungen nach EN 832 und DIN V 4108-6 können nicht alle Abhängigkeiten die für das thermische Verhalten von Gebäuden entscheidend sind ausreichend genau berücksichtigen. Das Nutzerverhalten ist weitestgehend genormt und die Anrechnung des instationären, d. h. zeitabhängigen Anteiles an den Wärmeübertragungsvorgänge erfolgt anhand von relativ grob klassifizierten Pauschalwerten.

Auf der Grundlage eines vom Solar Energy Laboratory der University of Wisconsin-Madison erstellten Rechenprogrammes, TRNSYS, zur Ermittlung von Heiz- und Kühlleistungen sowie Lufttemperaturen und -feuchten können grundlegende Berechnungen ‚realer‘ Energieverbräuche durchgeführt werden. Das Rechenprogramm ist ein modulares Simulationsprogramm, das dynamische Effekte berücksichtigt, die nach aktuellen Angaben zugrunde gelegt werden.

Die sich auf natürliche Weise, d. h. unter den äußeren und inneren thermischen Einflüssen ohne Heizung oder Kühlung einstellende Raumlufftemperaturen sind vor allem ein Beurteilungsmaßstab für die wärmetechnische Ausbildung von Gebäuden im Hinblick auf ein energiesparendes und klimagerechtes Bauen. Ergänzende Anwendungen ermöglichen es, Klimazustände in einem Raum in Abhängigkeit des Außenklimas, der Nutzung, etc. zu beschreiben. Es kann so das thermische Verhalten von Gebäuden bei Aufheiz- und Auskühlvorgängen unter nicht periodischen Tagesgängen untersucht werden. (Weitere Informationen zu Simulationsberechnungen siehe [2])

9.5.2 Gebäudebeschreibung des betrachteten Gebäudes

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein 1 ½ - geschossiges Einfamilienhaus mit quadratischen Grundriss. Untersucht wurde das Gebäude sowohl als Holztafelbau (HT – Bau), wie auch als Massivbau. Bei der Massivbauweise besteht der Außenwandaufbau aus Porenbeton mit einem Wärmedämmverbundsystem. Beide Bauarten weisen einen vergleichbaren Wärmedämmstandard auf. Die Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

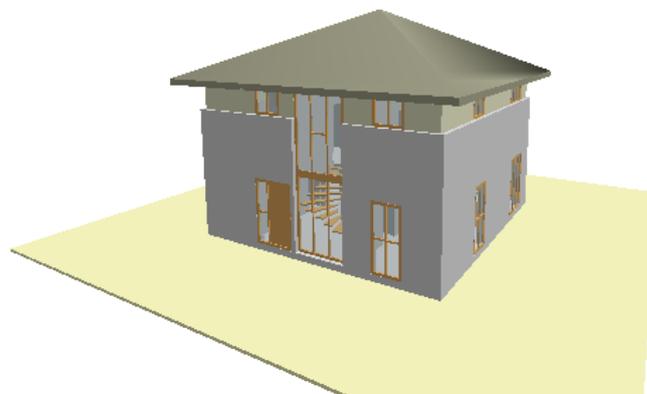


Bild 1 Ansicht des Gebäudes

	Flächen- berechnung	Volumen- berechnung	U-Werte	
			Holzbau- Standard	Massivbau- Standard
		m ² /m ³	W/(m ² K)	W/(m ² K)
Außenwände:				
AW1	74,60		0,19	0,20
AW2	40,92		0,12	
AW3	25,95		0,18	
Fenster:	44,44		1,60	1,60
Bodenplatte:	85,38		0,31	0,31
Steildach:	92,40		0,24	0,24
Gesamt:	363,69			
Volumen:		483,53		
A _N :		155,00		

Tabelle 1 Gebäudedaten der untersuchte Bauweisen

9.5.3 Thermisch-energetische Gebäudesimulation

In der Untersuchung wird das in den Köpfen der Leute angeblich vorhandene „Barackenklima des Holztafelbaus“ im Vergleich zum „angenehmen Raumklima des Massivbaus“ während einer Sommerperiode untersucht werden.

Bestandteil der Untersuchung ist das nutzerspezifische Verhalten bei der Nutzung

- von außenliegenden Sonnenschutzsystem z.B. in Form von Rollläden, Holzlamellen oder sonstigen am Markt üblichen Verschattungselementen
- die erhöhte Nachtlüftung der Räume. Diese Nachtlüftung erfolgt durch Öffnen der Fenster. Besonders effektiv ist sie in der zweiten Nachthälfte.

Grundsätzlich kommen für die Berechnungen der sich im Gebäude frei einstellenden Raumlufttemperaturen zwei Vorgaben der Außenklimabedingungen in Betracht:

1. Simulationsberechnungen unter ‚realen‘ Klimabedingungen nach Testreferenzjahr (siehe auch Skript ENEC!)
2. Simulationsberechnungen unter ‚worst-case‘-Klimabedingungen nach VDI 2078.

Diagramm 1 zeigt den Temperaturverlauf für die Gebäudevarianten während der „worst-case“-Betrachtung (periodische Tagesschwungung der Außenlufttemperatur nach VDI 2078) ohne Verschattung oder Nachtlüftung. Im 1. Teil des Diagramms ist die Einschwingphase der Raumlufttemperatur, im Mittleren Bereich der eingeschwungene Zustand, d.h. den Zeitpunkt zu welchem keine weiteren Temperaturerhöhung der Raumluft stattfindet und im 3. Teil die Ausschwingphase der Raumlufttemperatur für die unterschiedlichen Bauweisen dargestellt.

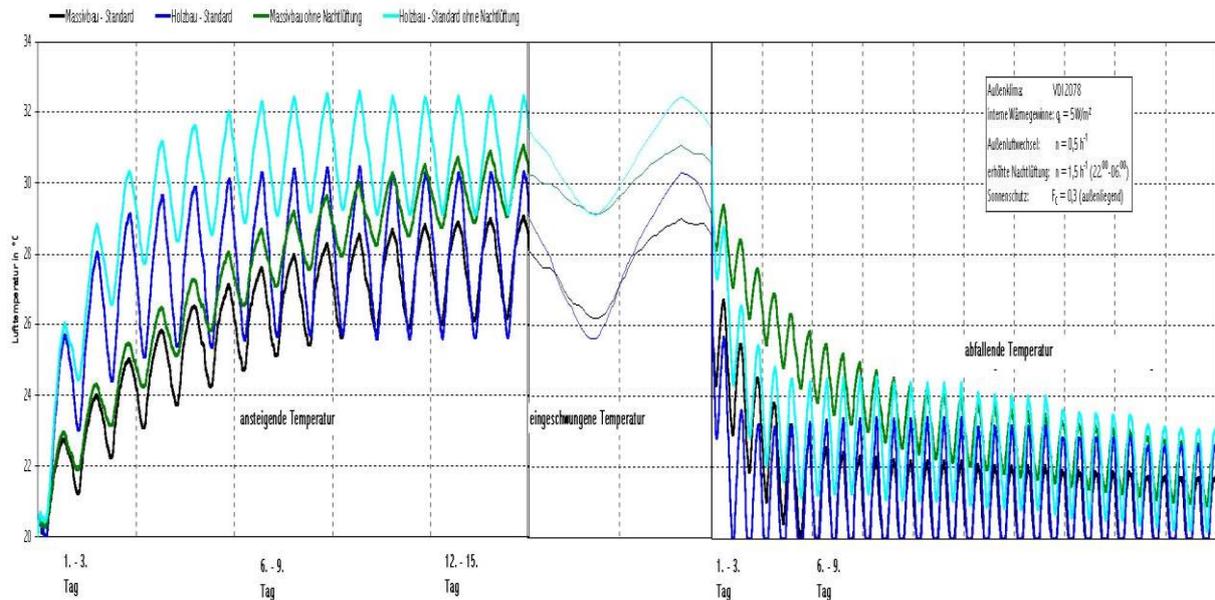


Diagramm 1 Raumlufthemperaturen während einer Sommerperiode "worst case"

	Holztafelbau	Massivbau
ansteigend:		
auf max. Außenlufttemperatur $\theta_e = 33^\circ\text{C}$ in	9 Tage	14 Tage
abkühlend:		
auf max. Außenlufttemperatur $\theta_e = 20^\circ\text{C}$ in	2 Tagen	6 Tage
max. Werte:		
max. Raumlufthtemperatur θ_i	32,5°C	31°C
Temperaturdifferenz Tag / Nacht	4 K	2 K

Tabelle 6 Temperaturentwicklungen während einer Sommerperiode für die untersuchten Bauweisen.

Diagramm 4 zeigt die Gegenüberstellung der maximalen Temperaturen im eingeschwungenen Zustand des Gebäudes mit den sich ‚real‘ einstellenden Temperaturen aus den Simulationen am heißesten Tag des Jahres, bei Einsatz eines außenliegenden Sonnenschutzes und erhöhter Nachtlüftung.

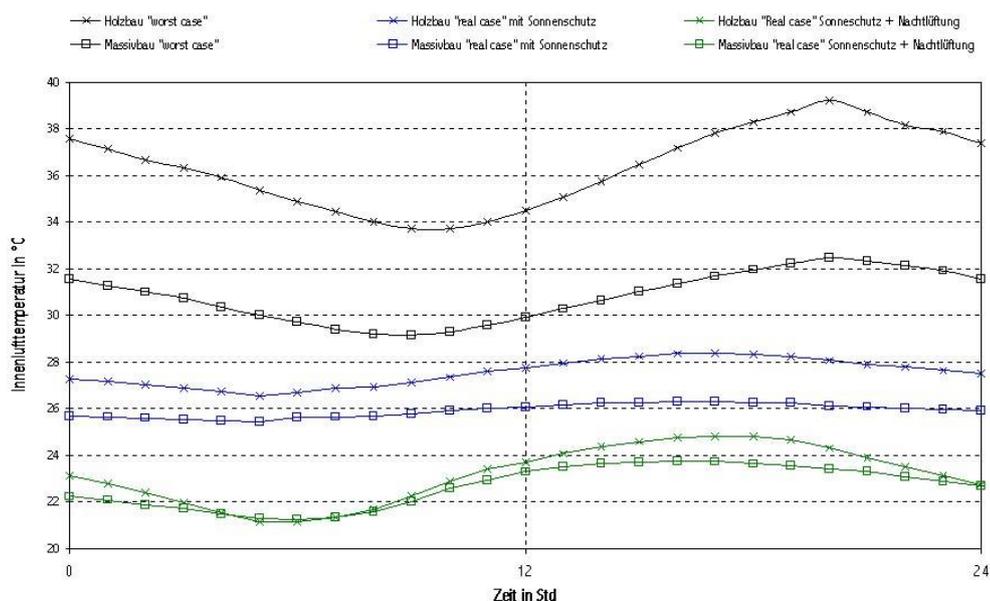


Diagramm 2 Vergleich der Raumlufttemperaturen zwischen "real case" und "worst case"

	Holztafelbau	Massivbau	Differenz
Tag			
"worst case"	39°C	32°C	7 K
"real case"	25°C	24°C	1 K
Nacht			
"worst case"	34°C	29°C	5 K
"real case"	21°C	21°C	0 K

Tabelle 7 Temperaturunterschiede zwischen "real case" und "worst case"

9.5.4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Berechnungen der sich frei einstellenden Raumlufttemperaturen im Holztafelbau und im Massivbau zeigen deutlich, dass die Temperaturen im Rahmen einer "real case" Betrachtung grundsätzlich nicht von einander abweichen! Überaus deutlich, für den Holztafelbau und den Massivbau, werden aber die schon in den von Schulze [] verdeutlichten Einflüsse eines bewussten Nutzerverhalten! Es zeigt sich, dass ein optimales Raumklima unabhängig von der gewählten Bauweise durch einen sorgfältigen Umgang mit Sonnenschutzsystem und einer gezielten Nachtlüftung erreichen lässt.

Sicher wird von Verfechtern der Massivbauweise das Argument des so genannten Barackenklimas und den bedingt durch die geringere Speichermasse, schnellere Aufheizphase bei Holztafelbauten (2 zu 1) in die Waagschale geworfen. Sie dürfen aber den Effekt einer schnelleren Auskühlung nach einer extremen heißen Witterungsperiode (1 zu 3) nicht außer Acht lassen.

Es kommt also mehr denn je auf die Beratung des Bauherren durch den Planer an. Der Planer hat, noch mehr als früher, die Verpflichtung, dem Bauherren die bestmöglichen Alternativen aufzuzeigen.

Die Wahl der ‚wahren‘ Bauweise bleibt so doch mehr Geschmackssache.