

# Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

## Thermische Eigenschaften von Baustoffen und -konstruktionen

Die Baustoffkunde ist wesentliches Element für die energetische Qualität eines Bauwerks und verlangt nicht nur in Sachen Energieeffizienz eine ganzheitliche Betrachtung von Baustoffen. Bei der thermischen Beurteilung von Baustoffen gilt es, neben dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) sämtliche physikalischen Eigenschaften eines Baustoffes, die ebenso von Bedeutung sind, zur Kenntnis zu nehmen – nicht nur hinsichtlich eines sommerlichen Hitzeschutzes.

Obleich die ganzheitlichen (und nachhaltigen) Aspekte bei der Beurteilung von Baumaterialien an erster Stelle stehen sollten, ist darüber in einschlägigen Lehrbüchern und der praktischen Umsetzung wenig zu finden. Es werden immer noch vorwiegend physikalisch-chemische und technisch-technologische Merkmale auf die Wärmedämmeigenschaften reduziert beschrieben. Dementsprechend wird die Qualität eines Baustoffes oft ausschließlich im U-Wert dingfest gemacht.

Zu stark liegt dabei der Fokus auf dem winterlichen Wärmeschutz. Der sommerliche Hitzeschutz wird beispielsweise oft gar nicht, oder nur ungenügend, berücksichtigt. Beim modernen Leichtbau von Energieeffizienzhäusern weisen diese zwar einen hervorragenden Wärmeschutz auf, allein es fehlt aber an Masse für die Speicherung von Wärme. Die Anordnung von entsprechenden Bauteilen mit einer hohen Wärmespeicherkapazität hat sich in der Praxis bewährt.

Die Ausgewogenheit vom sommerlichen Hitzeschutz und winterlichen Wärmeschutz spiegelt sich in ihrem Wechselspiel von innen nach außen und außen nach innen im Jahreslauf wider. Der Übergang ist die thermische Hülle und deren konstruktiver Aufbau. Ebenso die Qualität der Bauelemente, vorwiegend der transparenten Flächen, sowie die Vermeidung von Wärmebrücken. Dementsprechend ist die Ausgewogenheit von Wärmeschutz und Wärmespeicherung die Grundlage einer thermischen Ordnung im umbauten Raum.

Die wichtigsten physikalischen Kennwerte:

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (auch Wärmeleitzahl genannt) in W/mK ist eine Stoffkonstante, die den Wärmestrom in W durch 1 m Materialdicke angibt, der von 1 Grad (K) gleichbleibender Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen je m<sup>2</sup> bewirkt wird. Je kleiner dieser Zahlenwert

ist, desto besser ist die Dämmeigenschaft. (Materialien mit  $\lambda < 0,1$  gelten als Wärmedämmstoffe). Die Wärmeleitfähigkeit wird unter Laborbedingungen ermittelt und ist als sehr theoretischer Wert anzusehen, der sicherlich eine Orientierung zur Planungssicherheit gibt, aber unter Praxisbedingungen weit schlechter (z. B. bei zu feuchten Bauteilen) oder auch besser (z. B. solare Energiegewinne) sein kann.

Daraus ergeben sich folgende Wärmeübergangswiderstände ( $R_{si}$  und  $R_{se}$ ):

- Außenwand 0,17 (0,13 + 0,04)
- Oberste Geschossdecke; Warmdach 0,14 (0,10 + 0,04)
- Decke über Außenluft 0,21 (0,17 + 0,04)

Der Wärmedurchgangskoeffizient U in W/m<sup>2</sup>K ist der Wärmestrom in Watt durch 1 m<sup>2</sup> eines Bauteils je Grad (K) gleichblei-

Tabelle 1: Wärmeübergangswiderstände Bauteil-Luft.

	Richtung des Wärmestroms		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
<b>R<sub>si</sub> Innenraum</b>	0,10	0,13	0,17
<b>R<sub>se</sub> Außenluft</b>	0,04	0,04	0,04
<b>R<sub>se</sub> Außenluft (abgedeckt)</b>	0,10	0,13	0,17

*Quelle: IBN / Forum Wohnenergie*

Der Wärmedurchlasswiderstand R in m<sup>2</sup>K/W wächst mit steigender Schichtdicke d und mit geringerer Wärmeleitfähigkeit. Je größer der Zahlenwert, desto besser die Dämmwirkung.

Formel:  $R = d / \lambda$

Beispiel A: 10 cm Flachsdämmung:

$R = 0,10/0,04 = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$

Beispiel B: 10 cm Schilfrohrdämmung:

$R = 0,10/0,055 = 1,82 \text{ m}^2\text{K/W}$

Beispiel C: 10 cm konventionelles WDVS:

$R = 0,10/0,035 = 2,85 \text{ m}^2\text{K/W}$

Die Wärmeübergangswiderstände  $R_{si}$  (innen) und  $R_{se}$  (außen) in m<sup>2</sup>K/W sind der Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten h, der den Widerstand des Übergangs von Bauteiloberfläche zu Luft - und umgekehrt - angibt. Die Rechenwerte werden nach DIN EN ISO 6946 als Konstanten angegeben. Diese Konstanten sind zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) erforderlich.

bender Temperaturdifferenz der beidseits angrenzenden Luft.

Je kleiner der U-Wert ist, desto geringer ist der Wärmestrom bzw. Wärmeverlust eines Bauteils.

Formel:  $U = 1 / (R_{si} + R_T + R_{se})$

$R_T = \text{Total (gesamt) also: } R_1 + R_2 + R_3 + R_n$

Beispiel: Außenwand in Massivbauweise:

Innen Lehmputz 1,5 cm;  $d = 0,015 \text{ m}; \lambda = 0,80 \text{ W/mK}$

Hochloch-Ziegel 36,5 cm;  $d = 0,365 \text{ m}; \lambda = 0,08 \text{ W/mK}$

Außen Kalkputz 2,5 cm;  $d = 0,025 \text{ m}; \lambda = 0,87 \text{ W/mK}$

$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}; R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

$R_T = 0,015/0,8 + 0,365/0,08 + 0,025/0,87 = 4,61 \text{ m}^2\text{K/W}$

$1 / (R_{si} + R_T + R_{se} = 0,04)$

$= 1 / 4,78 = 0,209 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die Wärmestromdichte q in W/m<sup>2</sup> gibt den Wärmeverlust je Bauteil in W je m<sup>2</sup> Bauteilfläche an:

Formel:  $q = U (\Theta_i - \Theta_e)$   $\Theta = \text{Theta}$  (Celsius-Temperaturen innen und außen)

Beispiel: Außenwand wie oben  $U = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  
 $\Theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\Theta_e = -10 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $0,209 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 30 \text{ K} = 6,27 \text{ W/m}^2$ .

Durch die Wärmestromdichte sämtlicher Bauteile der thermischen Hülle können die Transmissions-Wärmeverluste ermittelt werden. Sie sind gemeinsam mit den Lüftungswärmeverlusten die wichtigsten Parameter der Heizlastberechnung bzw. des Heizwärmebedarfs in W.

Bei einer Außentemperatur von  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  würde ein Außenwandanteil der thermischen Hülle von beispielsweise  $250 \text{ m}^2$  bei zuvor genanntem Aufbau des Bauteils  $3000 \text{ W}$  durch Transmission verlieren. Zusätzlich  $30 \text{ m}^2$  Fensterflächen mit einem U-Wert von  $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei gleicher Temperaturdifferenz  $810 \text{ W}$ . Insgesamt würde also die Fassade unter diesen Bedingungen  $3810 \text{ W}$  durch Transmission verlieren. Weitere Wärmeverluste entstehen über die Dachflächen und die erdberührten Flächen.

### Trenn- und Oberflächentemperatur

Neben den Trennflächentemperaturen zwischen zwei oder mehreren Bauteilen sowie den Oberflächentemperaturen raumumschließender Flächen sind jedoch auch weitere Aspekte bezüglich der thermischen Eigenschaften von Baustoffen relevant, die ich als wohnklimatische Aspekte hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit des Menschen bezeichnen möchte: Denn es sind eben auch jene Trennflächentemperaturen, welche an den Oberflächen von raumumschließenden (Außen-)Wänden wesentlich das thermische Wohlbe-

Tabelle 2: Wärmedämmende und wärmespeichernde Baustoffe.

Wärmedämmende und wärmespeichernde Baustoffe (eine Auswahl)			
Besonders gut wärmedämmende Baustoffe		Besonders gut wärmespeichernde Baustoffe	
Bezeichnung	$\lambda$ in $\text{W/mK}$	Bezeichnung	s in $\text{kJ/m}^3\text{K}$
Flachs- und Hanfdämmung	0,040	Sandstein	2.232
Holzweichfaserplatten	0,045	Massivlehm	1.800
Zellulose-Schüttung	0,045	Kalkputz	1.728
Korkplatten und Kokoswolle	0,045	Lehmputz	1.700
Strohballen	0,045	Strohlehm	1.200
Holzspäne	0,055	Ziegel	1.104
Schilfrohr	0,055	Kalksandstein	880

*Quelle: IBN / Forum Wohnenergie*

finden des Menschen ausmachen. Diesbezüglich lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Oberflächen umso höher temperiert sind, desto besser (also niedriger) der U-Wert ist.

Entsprechend den wohnklimatischen Aspekten sind besonders zu erwähnen:

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  in  $\text{J/kgK}$  gibt an, wie viel Wärme in J (Joule) je kg Masse bei  $1 \text{ K}$  Temperaturdifferenz aufgenommen wird.

Formel:  $c_p = Q / (m \cdot \Delta T)$

Beispiel:

Ziegel HLZ	= 920 $\text{J/kgK}$
Porenbeton	= 1050 $\text{J/kgK}$
Kalksandstein	= 880 $\text{J/kgK}$
Vollholz	= 2100 $\text{J/kgK}$
Holzweichfaserplatten	= 2100 $\text{J/kgK}$
Schilfrohr	= 1300 $\text{J/kgK}$
Strohballen	= 1260 $\text{J/kgK}$
Glas- und Mineralwolle	= 800 $\text{J/kgK}$

Des Weiteren ist die Wärmespeicherfähigkeit (Wärmespeicherzahl)  $s$  in  $\text{J/m}^3\text{K}$  von Baustoffen relevant. Sie gibt an, welche Wärmemenge in Joule je  $\text{m}^3$  Material bei einem Kelvin Temperaturunterschied gespeichert werden kann, bzw. welche Wärmemenge notwendig ist, um  $1 \text{ m}^3$  eines Baustoffes um  $1 \text{ K}$  zu erwärmen.

Je schwerer der Baustoff (Rohdichte) ist, desto größer wird die Wärmespeicherzahl. Die Wärmespeicherfähigkeit ermittelt sich ergo aus der spezifischen Wärmekapazität und der Rohdichte  $p$ .

Formel:  $s = c_p \cdot p$

Beispiele: Gipsfaserplatte,  $c_p$   $0,840 \text{ J/kgK}$ ;  
 Rohdichte  $p = 1000 \text{ kg/m}^3$   
 $s = 840 \cdot 1000 = 840\,000 \text{ J/m}^3\text{K}$   
 $= 840 \text{ kJ/m}^3\text{K}$

Um die tatsächliche Wärmespeicherung von Baustoffen zu ermitteln, ist die Wärme-



## Produktfamilie Friwa

- Komplett vormontiert und mit voreingestelltem Regler, für eine einfache Inbetriebnahme
- Integrierte Regler-Zusatzfunktionen, wie Rücklaufventilsteuern und Zirkulation
- Optional: beflammbare Probeentnahmeventile, entsprechend den Anforderungen der TrinkwV 2011
- Alle Stationen können zu einer 2fach-Kaskade erweitert werden



**FriwaMidi**  
DN 20 - 50 l/min

**FriwaMaxi**  
DN 25 - 73 l/min

**FriwaMega**  
DN 32 - 130 l/min



**Weitere Informationen unter: [www.paw.eu](http://www.paw.eu)**

Tabelle 3: Formel-Auswahl zur thermischen Bewertung von Baustoffen.

Wichtige Formeln zur thermischen Bewertung von Baustoffen (eine Auswahl)		
Bezeichnung	Einheit	Formel
Wärmedurchlasswiderstand R	m <sup>2</sup> K/W	$R = d / \lambda$
Wärmedurchgangskoeffizient U	W/m <sup>2</sup> K	$U = 1 / (R_{si} + R_T + R_{se})$
Wärmestromdichte q	W/m <sup>2</sup>	$q = U (\theta_i - \theta_e)$
Wärmespeicherzahl s	J/m <sup>3</sup> K	$s = c_p \cdot \rho$
Wärmespeicherfähigkeit Q <sub>sp</sub>	J/m <sup>2</sup> K	$Q_{sp} = s \cdot d$
Temperaturleitfähigkeit a	cm <sup>2</sup> /s	$a = \lambda / s$
Wärmemenge Q	kJ	$Q = s \cdot V \cdot \Delta T$
Wärmeeindringkoeffizient b	J/m <sup>2</sup> K s <sup>0,5</sup>	$b = \sqrt{s \cdot p}$

*Quelle: Forum Wohnenergie*

speicherzahl s mit der Materialstärke eines jeweiligen Baustoffes/Bauteils zu multiplizieren. Daraus resultiert aus der Wärmespeicherzahl die Wärmespeicherfähigkeit Q<sub>sp</sub> in J/m<sup>2</sup>K bei einer Fläche von 1 m<sup>2</sup>.  
Formel:  $Q_{sp} = s \cdot d$

Beispiele: Gipsfaserplatte 12,5 mm (0,0125 m);

$$s = 840 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

$$Q_{sp} = 840 \text{ kJ/m}^3\text{K} \cdot 0,0125 \text{ m}$$

$$= 10,5 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

Lehmputz 12,5 mm (0,0125 m);

$$s = 1700 \text{ kJ/m}^3\text{K}$$

$$Q_{sp} = 1700 \text{ kJ/m}^3\text{K} \cdot 0,0125 \text{ m}$$

$$= 21,25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

Je mehr Wärme ein Baustoff aufnehmen bzw. speichern kann, umso träger reagiert er bei Aufheizung und Abkühlung (= Amplitudendämpfung). Hohe Wärmespeicherwerte verhindern ein zu rasches Aufheizen (passive Solarnutzung) oder Abkühlen (Nachtabenkung/Absenkbetrieb der Heizungsanlage). Für ein ausgeglichenes Raumklima bzw. eine optimale Speicherung (solarer oder interner) Wärmeenergie sind vor allem die ersten raumseitigen 8 bis 16 mm eines Bauteils relevant.

Die Wärmemenge Q in kJ gibt an, wieviel Wärme in einem Bauteil bei bekannter Temperaturdifferenz ΔT gespeichert ist.  
Formel:  $Q = s \cdot V \cdot \Delta T$

Die errechnete Wärmeenergie ist Grundlage dafür, um die Aufheiz- bzw. Auskühlzeiten für ein Gebäude berechnen bzw. abschätzen zu können.

Der Wärmeeindringkoeffizient b in J/m<sup>2</sup> · K · s<sup>0,5</sup> ist der Stoffwert für die Eindring- und Ausdringgeschwindigkeit. Er gibt zahlenmäßig die Empfindung an, die unterschiedliche Materialien bei Berührung trotz gleicher Oberflächentempera-

tur wärmer oder kälter erscheinen lassen (z. B. fußkalter Steinboden oder fußwarmer Korkboden). Das Material wird umso angenehmer (oberflächenwärmer) empfunden, je kleiner der Wärmeeindringwert b ist.  
Formel: b = Wurzel aus s · p

Dementsprechend sind Materialien, die einen guten Wärmedämmwert besitzen solche, die einen niedrigen b-Wert aufweisen.

Die Temperaturleitfähigkeit a in cm<sup>2</sup>/s ist zusammen mit der Wärmeeindringzahl b entscheidender Kennwert für die Schnelligkeit von Wärmeaufnahme und Verteilung bei Speichervorgängen, z. B. ist a das Maß, wie schnell hohe Außentemperaturen durch Sonneneinstrahlung nach innen eindringen können.

Formel:  $a = \lambda / s$  oder  $a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$

Beispiel: Holz

$$\lambda = 0,13 \text{ W/mK} = 0,13 \text{ J/smK};$$

$$c_p = 2100 \text{ J/kgK};$$

$$\rho = 600 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 0,13 / (2100 \cdot 600)$$

$$= 0,000.000.103 \text{ m}^2/\text{s} = 0,001.03 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$= 1,03 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot 10^{-3}$$

Ein Baustoff für die thermische Hülle ist für den sommerlichen Wärmeschutz umso geeigneter, wenn einem guten Dämmvermögen (kleine Wärmeleitfähigkeit λ) ein hohes Wärmespeichervermögen (große Wärmespeicherzahl s) gegenübersteht. Baustoffe mit diesen Eigenschaften sind: Holzspäne, Kork, Kokos, Strohballen, Holzweichfaserplatten, Holzwolle-Leichtbauplatten, Schilfrohr, Zellulose.

#### Materialauswahl für Wohnhausbau

Organische Baustoffe, wie insbesondere Vollholz, Holzwerkstoffe, Leichtbauplatten, Holzspäne, Holzfasern oder Kork, weichen bezüglich der thermischen Eigenschaften

von den anderen Baustoffen deutlich ab. Im Vergleich mit anderen Baustoffen ähnlicher oder gleicher Rohdichte ρ ist die Speicherkapazität s sehr groß und dadurch bedingt die Temperaturleitfähigkeit a sehr klein. Hinsichtlich der thermischen Eigenschaften von Baustoffen sind diese in zwei Gruppen zu unterteilen, die da lauten:

- Baustoffe für die thermische Hülle sind Materialien mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit λ und zugleich einer hohen Wärmespeicherzahl s, wie beispielsweise Holzfaserverleimungen sowie weitere Holzbaustoffe, Zellulose oder Schilfrohr. Damit lässt sich einerseits ein hoher winterlicher Wärmeschutz aufgrund der kleinen Wärmeleitfähigkeit (= hohe Wärmedämmung) erreichen. Aber andererseits auch ein sommerlicher Wärmeschutz durch große Pufferung der Wärme im Material und verzögerte Abgabe nach der Durchdringung (Phasenverschiebung) der thermischen Hüllflächen in der Sommerhitze.
- Baustoffe für den Innenbereich sind – nicht zuletzt um solare oder interne Wärmeenergie effektiv zu nutzen bzw. zu „verwalten“ – Materialien mit einer hohen Temperaturleitfähigkeit a. Dies sind z. B. Massivlehm, Lehmputz, Sandstein, Kalkputz und Kalksandstein, aber auch Flachs und Hanf und Zellulose. Sie sorgen für ausgeglichene Temperaturverhältnisse: schnelle Aufnahme solarer Gewinne, schnelles Erreichen der Ausgangslufttemperatur nach dem Lüften, geringe Temperaturschwankungen (oder keine) bei Absenkbetrieben. Hinsichtlich der Wärmeeindringzahl, die – wenn sie hoch ist – einen flinken Temperaturengleich schafft, sind massive Bauteile mit entsprechenden Rohdichten vorteilhafter als die zuvor genannten organischen Baustoffe.

#### Fazit

Für eine nachhaltige Bauweise ist die Materialauswahl wegweisend. Mit der Auswahl der entsprechenden Materialien, Aufbauarten und Schichten und Bauelemente sowohl der thermischen Hülle als auch der Innenbauteile wird die Grundlage einer thermischen Ordnung weit über den baulichen Feuchteschutz und den Anforderungen der EnEV gebildet. Je ausgewogener das Verhältnis von Wärmedämmung und Wärmespeicherung umgesetzt wird, desto einfacher wird es sein, ganzjährig eine thermische Ordnung ohne technische Überfrachtung herzustellen. ■

Autor: Frank Hartmann