

Bauphysik-Handbuch.
Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes.

Inhaltsverzeichnis

05 Wärmebrücken

- 06 Wärmebrücken allgemein
- 06 Arten von Wärmebrücken
- 08 Wärmetechnische Kennwerte von Wärmebrücken
- 09 Linienförmige Wärmebrücken
- 10 Punktförmige Wärmebrücken
- 11 Dreidimensionale Wärmebrücken

13 Feuchteschutz

- 14 Feuchteschutz allgemein
- 14 Luftfeuchtigkeit
- 15 Tauwasserausfall
- 17 Schimmelpilzbildung
- 18 Mindestoberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ und Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi}

21 Normen und Regelwerke

- 22 Allgemeine Anforderungen
- 23 SIA 380/1:2009 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
- 23 SN EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau
- 24 Wärmebrücken-Nachweis nach SIA
- 25 Minergie-Standard

27 Konstruktive Wärmebrücken

- 28 Ursache
- 28 Balkone bzw. ungedämmte auskragende Bauteile
- 29 Beispiel Attikaanschluss
- 30 Beispiel Innendämmung

31 Lexikon

- 32 Jahres-Heizwärmebedarf
- 33 Jahres-Primärenergiebedarf
- 34 Spezifischer Transmissionswärmeverlust Q_T
- 35 Sommerlicher Wärmeschutz
- 35 Wärmestrom Φ
- 35 Die Wärmeleitfähigkeit λ
- 37 Der Wärmedurchlasswiderstand; R-Wert
- 38 Der Wärmedurchgangskoeffizient; U-Wert
- 39 Thermischer Leitwert
- 40 Die Wärmedurchgangskoeffizienten ψ und χ
- 42 Taupunkttemperatur θ_T
- 42 Raumseitige Oberflächentemperatur θ_{si}
- 42 Kritische Oberflächentemperatur θ_{krit}

Wärmebrücken

Wärmebrücken allgemein

Als Wärmebrücken werden Teile der Gebäudehülle verstanden, an denen der ansonsten gleichförmige **Wärmedurchlasswiderstand** signifikant verändert wird durch:

- eine Durchdringung der Gebäudehülle, durch Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit,
- eine Änderung der Dicke der Bauteile,
- eine Differenz zwischen Innen- und Aussenfläche, wie sie bei Wand-, Fussböden und Deckenanschlüssen auftritt

Die Folge von Wärmebrücken sind innenraumseitig niedrigere Oberflächentemperaturen. Die **minimale Oberflächentemperatur** $\theta_{si,min}$ ist die im Einflussbereich einer Wärmebrücke auftretende niedrigste Oberflächentemperatur. Der Wert der minimalen Oberflächentemperatur ist entscheidend dafür, ob an einer Wärmebrücke **Tauwasser** ausfällt oder sich **Schimmel** bildet. Die minimale Oberflächentemperatur ist unter Berücksichtigung der relativen Raumfeuchtigkeit also ein Kennwert für die feuchtetechnischen Auswirkungen einer Wärmebrücke.

Die Ursachen für Wärmebrücken können unterschiedlich sein. Eine hohe Wärmeleitung resultiert daraus, dass der Bauteilbereich von der ebenen Form abweicht („**geometrische Wärmebrücke**“), oder daher, dass im betreffenden Bauteilbereich lokal Materialien mit erhöhter **Wärmeleitfähigkeit** vorhanden sind („**materialbedingte Wärmebrücke**“).

Arten von Wärmebrücken

In der Regel werden vier Typen von Wärmebrücken unterschieden:

- materialbedingte Wärmebrücken
- geometrische Wärmebrücken
- massstrombedingte Wärmebrücke
- umgebungsbedingte Wärmebrücke

Materialbedingte Wärmebrücken

Materialbedingte Wärmebrücken entstehen wenn nebeneinander liegende Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit innerhalb einer- oder mehrschichtigen Bauteile aneinander angrenzen. Ein typisches Beispiel hierfür sind, die Dämmschicht durchstossende Anker. Über die metallischen Anker ist im Vergleich zu der angrenzenden Dämmung der **Wärmestrom** erhöht.

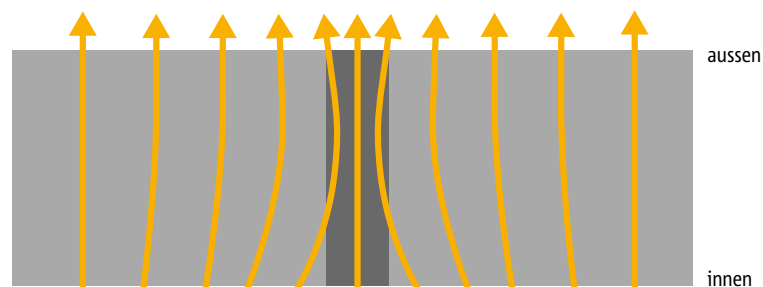


Abbildung 1: Schnittzeichnung durch zwei Materialien (Dunkelgrau mit hoher Leitfähigkeit, Hellgrau mit niedriger Leitfähigkeit), die Richtung des Wärmestroms ist durch Pfeile dargestellt. Der Wärmestrom fließt vom warmen Raum (unterer Bildrand) zum kälteren Raum (oberer Bildrand) durch die Materialien.

Geometrisch bedingte Wärmebrücken

Geometrische Wärmebrücken entstehen, wenn die Wärme abgebende Oberfläche sehr viel grösser ist als die Wärme aufnehmende Oberfläche. Typische Beispiele hierfür sind Gebäudeecken. Hier sinken an den Wärme aufnehmenden Oberflächen die Oberflächentemperaturen stark ab, da die Wärme über die grösseren abgebenden Oberflächen stark abfließen kann.

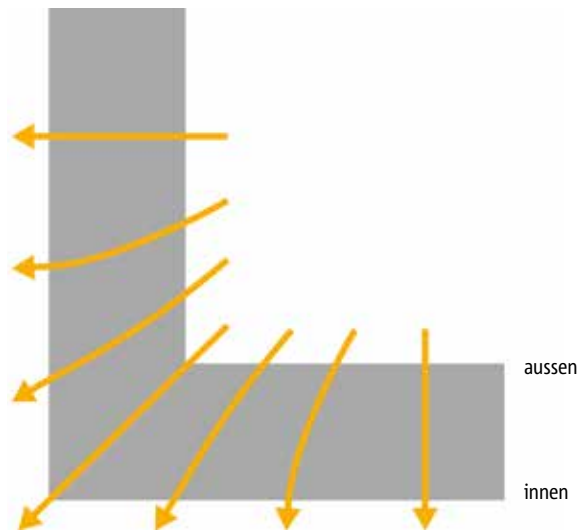


Abbildung 2: Schnittzeichnung einer Gebäudeecke, die Pfeile beschreiben die Richtung des Wärmestroms vom warmen zum kalten Raum. Der linienförmige Wärmestrom durch eine ungestörte Wand wird durch die geometrische Situation stark beeinflusst.

Massenstrom- und Umgebungsbedingte Wärmebrücken

Bei den massenstrombedingten Wärmebrücken handelt es sich um Undichtigkeiten in der Gebäudehülle. Die Gefahr von Tauwasserausfall ist hierbei besonders hoch. Bei umgebungsbedingten Wärmebrücken ist die raumseitige Umgebungstemperatur z.B. durch Heizkörper erhöht.

Die Auswirkungen von Wärmebrücken sind zusammenfassend:

- erhöhtes Risiko von Tauwasserausfall
- erhöhtes Risiko von Schimmelpilzbildung
- gesundheitliche Beeinträchtigungen (Allergien etc.) in Folge Schimmelpilzbefall
- erhöhter Heizenergieverlust
- Beeinträchtigung der Bausubstanz

Wärmetechnische Kennwerte von Wärmebrücken

Um Wärmebrücken in ihrer bauphysikalischen Eigenschaft beurteilen zu können, gibt es verschiedene wärmebrückentechnische Kennwerte. Diese beschreiben unterschiedliche Eigenschaften von Wärmebrücken. Während die **Wärmedurchgangskoeffizienten ψ und χ** Auskunft über die energetischen Wärmeverluste geben, wird durch den **Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi}** und die **minimale Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$** das Risiko für Schimmelpilzbildung und **Tauwasserausfall** beurteilt.

Die Ermittlung dieser Kenngrößen ist rechnerisch ausschliesslich mittels wärmetechnischer Finite-Element-Berechnung (FE-Berechnung) möglich. In der Regel wird damit der Temperatur- und Wärmestromverlauf im Bauteil und an den Bauteiloberflächen ermittelt.

Die Randbedingungen für die Berechnung und Modellierung sind in der **SN EN ISO 10211** geregelt. Hierzu wird der geometrische Aufbau der Konstruktion im Bereich der Wärmebrücke zusammen mit den **Wärmeleitfähigkeiten** der verwendeten Materialien in einem FE-Programm modelliert.

Die FE-Berechnung liefert neben den quantitativen Kennwerten auch den Temperaturverläufe (sogenannte Isotherme) und des Wärmestromverlaufes innerhalb der Konstruktion, welche auch grafisch dargestellt werden kann. Dabei wird meist eine Darstellung des Wärmestroms durch Wärmestromlinien (siehe Abbildung 3) oder Isothermen (siehe Abbildung 4) gewählt.

Die Darstellung mit Wärmestromlinien zeigt, auf welchem Weg durch die Konstruktion die Wärme geleitet wird, und es lassen sich somit die wärmetechnischen Schwachstellen der Wärmebrücke gut erkennen. Die Isothermen sind Linien oder Flächen gleicher Temperatur und zeigen die Temperaturverteilung innerhalb des berechneten Bauteils. Wärmestromlinien und Isothermen stehen stets senkrecht zueinander (siehe Abbildungen 3 und 4).

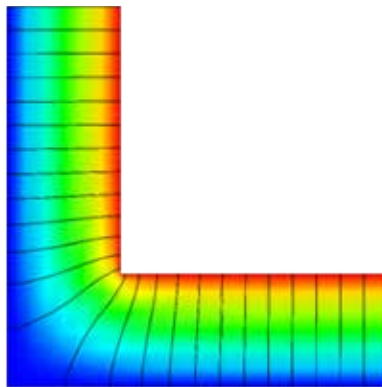


Abbildung 3: Wärmebild mit Wärmestromlinien

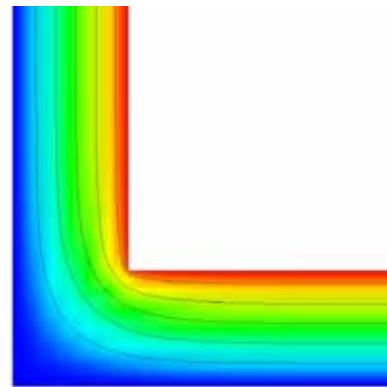


Abbildung 4: Wärmebild mit Isothermen

Linienförmige Wärmebrücken

Linienförmige Wärmebrücken weisen längenbezogen einen höheren Wärmefluss auf (gestörter, thermischer Bereich), als im anliegenden, thermisch gedämmten Regelquerschnitt (ungestörter, thermischer Bereich). Typische Beispiele hierfür sind Balkonanschlüsse bei denen die Deckenplatte durch die Wand läuft (siehe **Balkone bzw. ungedämmte auskragende Bauteile**), Aussenwandkanten, Deckenaufleger und Fensterlaibungen. Die zusätzlichen zum ungestörten Bereich auftretenden, energetischen Verluste, die durch eine linienförmige Wärmebrücke auftreten werden durch den **längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ -Wert** gekennzeichnet.

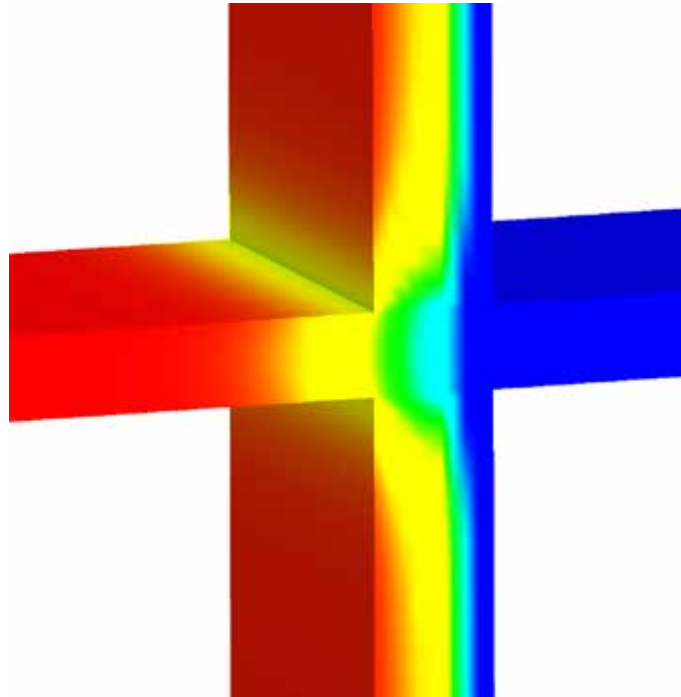


Abbildung 5A: Darstellung eines Isothermenverlaufs aufgrund einer linienförmigen Wärmebrücke an Hand eines Balkonanschlusses. Links ist die warme Wandinnenoberfläche rot dargestellt. Rechts ist die kalte Wandaussenoberfläche blau dargestellt. An den Innenecken ist durch die gelb-grüne Färbung der Innenoberfläche gut zu erkennen, dass hier aufgrund des linienförmigen Wärmebrückeneinflusses sehr niedrige Oberflächentemperaturen vorliegen.

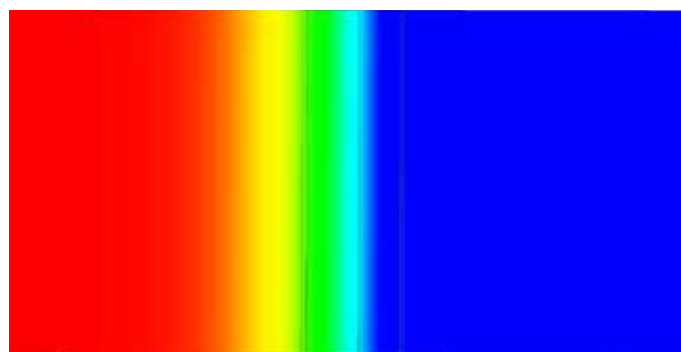


Abbildung 5B: Aufsicht; hier ist ein Längsschnitt durch die in 5A gezeigte Balkonplatte dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Temperaturverlauf über die Länge homogen verläuft und damit der linienförmige Verlauf gegeben ist.

Punktförmige Wärmebrücken

Punktförmige Wärmebrücken sind Störungen der thermischen Hülle die lokal so stark begrenzt sind, dass sie nur punktuell auftreten. Typische Beispiele sind Befestigungselemente wie Dübel, dämmschichtdurchstossende Stützen und Anker von Vorhangfassaden. Die energetischen Verluste durch punktuelle Wärmebrücken werden durch den **punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten χ -Wert** gekennzeichnet.

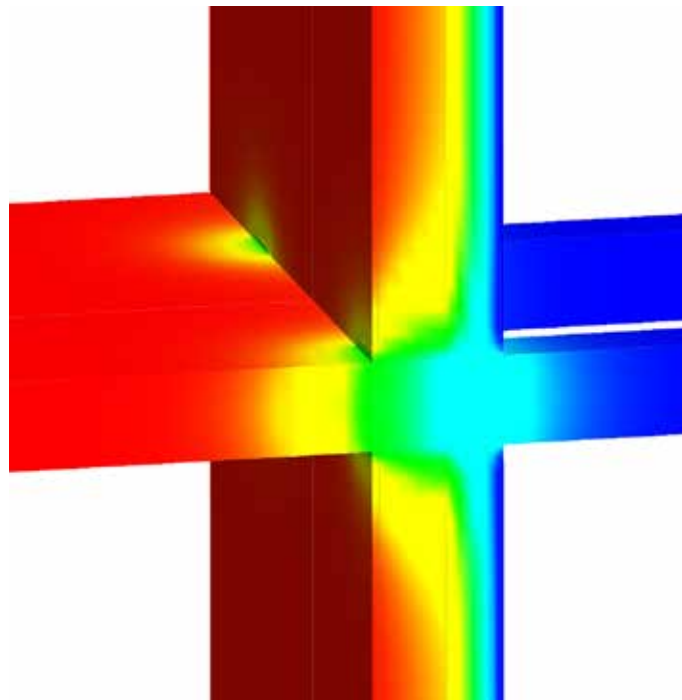


Abbildung 6A: Darstellung einer punktförmigen und linienförmigen Wärmebrücke an einem punktförmigen Balkonanschluss. Hier sind von aussen Stahlträger an eine Betondecke angeschlossen. Links ist die warme Wandinnenoberfläche rot dargestellt, rechts ist die kalte Wandaussenoberfläche blau dargestellt. An den Innenecken ist durch die gelb-grüne Färbung der Innenoberfläche gut zu erkennen, dass hier an zwei Stellen sehr niedrige Oberflächentemperaturen aufgrund des punktuellen Wärmebrückeneinflusses vorliegen.

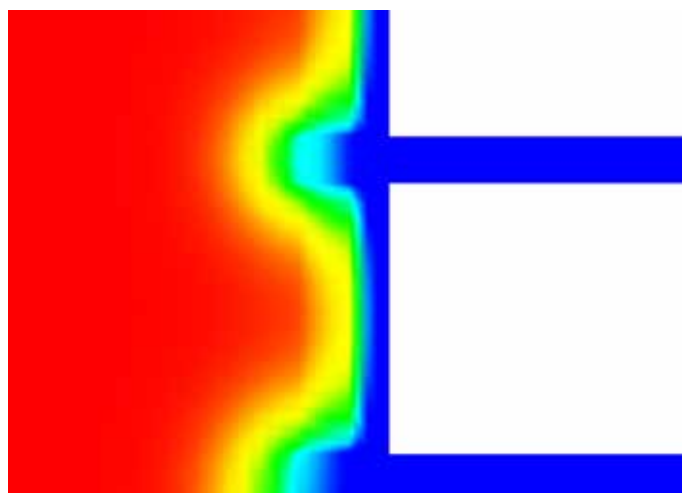


Abbildung 6B: Aufsicht; hier ist ein Schnitt durch die in 6A dargestellte Balkonplatte dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Wärmeverluste durch die beiden durchlaufenden Träger verursacht werden. Hier sind die Wärmeverluste lokal begrenzt, also punktuell.

Dreidimensionale Wärmebrücken (Raumecken)

Hierbei handelt es sich um Wärmebrücken, die dreidimensional betrachtet werden müssen. Typisches Beispiel hierfür ist eine Raumecke. In Abbildung 2 wurde bereits dargestellt, wie sich der **Wärmestrom** durch eine zweidimensionale Raumecke verhält. Bei einer dreidimensionalen Raumecke wird dieses Problem noch verstärkt. Bei einer dreidimensionalen Ecke erhöht sich das ungünstige Verhältnis Aussenoberfläche zu Innenoberfläche, so dass die Oberflächentemperatur hierdurch weiter sinkt.

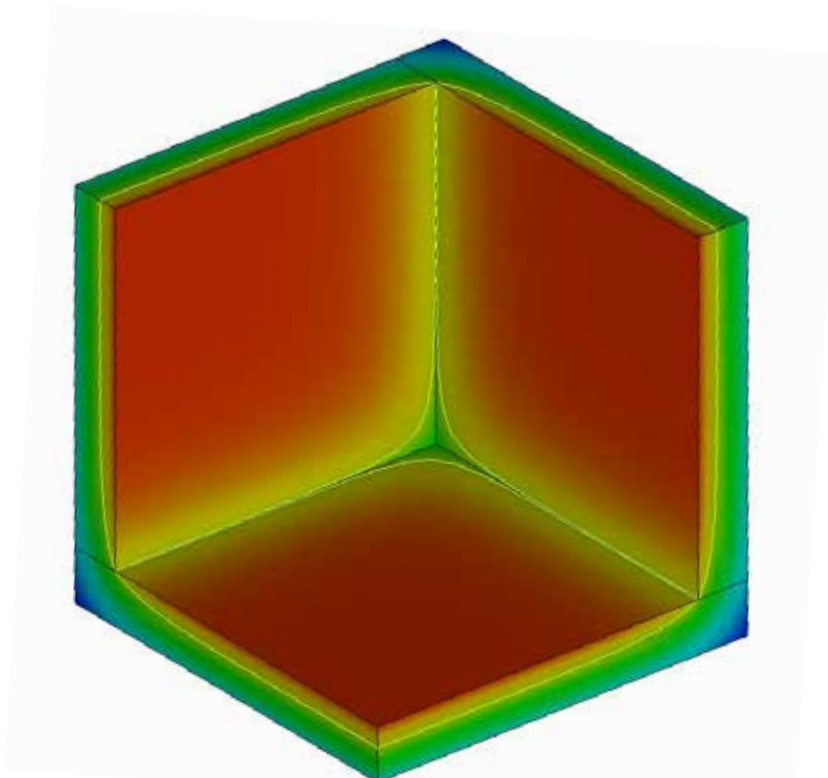


Abbildung 7: Ausschnitt einer Raumecke mit Blick auf die warme Innenecke. Der angrenzende Aussenraum ist kalt, daher ist über die Bauteilquerschnitte der Wärmeverlauf von rot nach blau (warm nach kalt) zu sehen. Während es sich bei den Eckanschlüssen um linienförmige Wärmebrücken handelt, zeichnet sich die dreidimensionale Raumecke als Eckpunkt mit der tiefsten Innenwandoberflächentemperatur ab. Die Gefahr von Tauwasserausfall oder Schimmelpilzbildung ist an diesem Punkt am höchsten.

Feuchteschutz

Feuchteschutz allgemein

Feuchte in Gebäuden entsteht durch die Art der Nutzung wie z.B. durch Kochen oder durch Baden. Sie kann aber auch durch aufsteigende Feuchte in Folge Abdichtungsundichtigkeit oder Bauteildiffusion aus dem Erdreich verursacht werden.

Als Folge können sich Organismen wie Schimmelpilze ansiedeln. An der Bausubstanz können Schäden durch Frost und Korrosion entstehen. Des Weiteren sind eine Verschlechterung der energetischen Bauteileigenschaften und damit einhergehende erhöhte Wärmeverluste im Winter zu erwarten.

Um solch negative Auswirkungen zu vermeiden, müssen Anforderungen an den Feuchteschutz bereits während der Planung berücksichtigt werden. Um einen zuverlässigen Feuchteschutz gewährleisten zu können, gibt es Kenngrößen wie den **Temperaturfaktor** und die **raumseitige Oberflächentemperatur**, deren Grenzwerte einzuhalten sind. In der Regel nehmen diese Kenngrößen Bezug auf ein normales Benutzerverhalten.

Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit bezeichnet allgemein den Anteil von Wasserdampf im Luftgemisch. Die Höchstmenge an Wasserdampf, welche die Luft aufnehmen kann, hängt (neben dem Luftdruck) vor allem von der Lufttemperatur ab. Je höher die Temperatur umso mehr Wasserdampf kann in der Luft gebunden werden. Es wird unterschieden zwischen absoluter (Angabe in %) und relativer Luftfeuchtigkeit (Angabe in g/m³).

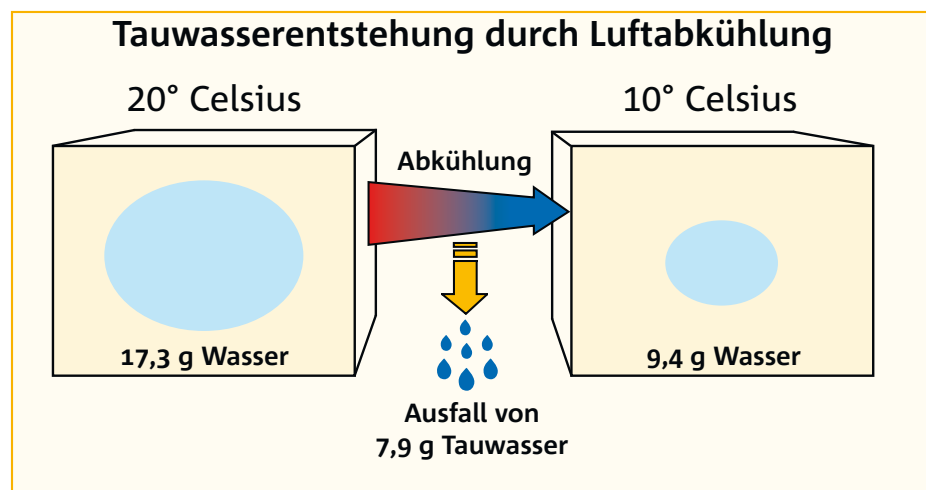


Abbildung 8: Tauwasserentstehung am Beispiel eines m³ Luft. Ein mit Luft gefüllter Würfel (links) enthält eine gewisse Menge Wasserdampf. Kühlt man diese Luft ab, kann weniger Wasserdampf gehalten werden (rechts).

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, fällt beim Abkühlen von Luft ein Teil des enthaltenen Wasserdampfs als **Tauwasser** aus, wenn der Sättigungspunkt erreicht wird. Dies ist eine typische Ursache an kalten Oberflächen in beheizten Räumen. Bei entsprechend hoher Luftfeuchtigkeit besteht an kalten Innenwandoberflächen des Weiteren Gefahr von **Schimmelpilzbildung**. Um den Einfluss des Feuchtegehalts der Luft auf diese Prozesse zu beschreiben wird die **relative Luftfeuchtigkeit** verwendet.

Die relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit gibt den Wasserdampfgehalt der Luft an. Dabei wird beschrieben, wie hoch der Wasserdampfgehalt im Verhältnis zur maximal möglichen Aufnahmemenge ist. 100% relative Luftfeuchte sind das maximale Fassungsvermögen der Luft. Dabei ist zu beachten, dass die relative Feuchte sich auf die vorherrschende Temperatur bezieht. Da von der Temperatur die maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge abhängt, ändert sich mit der Temperatur auch die relative Luftfeuchtigkeit. Senkt man beispielsweise die Raumluft von 20 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% auf 18 °C ab, steigt die relative Luftfeuchtigkeit um 7%. Grund dafür ist, dass bei sinkender Temperatur die maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge abnimmt. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit ist also nicht-linear.

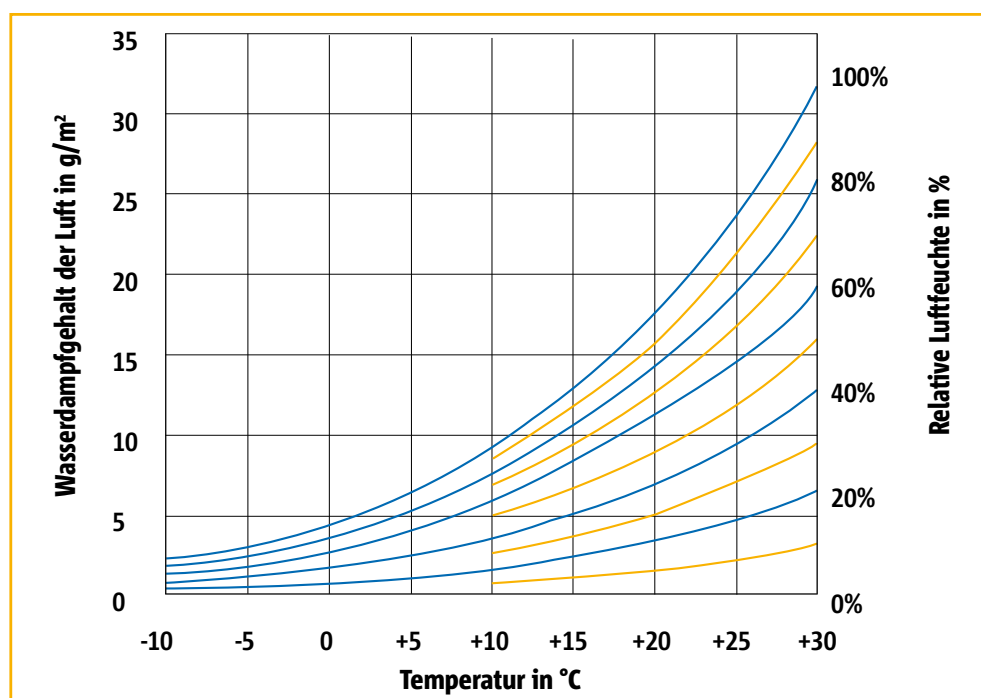


Abbildung 9: Das Carrier-Diagramm zeigt die Sättigungskurve für die relative Luftfeuchtigkeit; sie stellt die Beziehung zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur in Bezug zum aufnehmbaren Wasserdampfgehalt dar.

Tauwasserausfall

Tauwasserausfall (umgangssprachlich: Kondenswasserbildung) bezeichnet die Kondensation von Feuchtigkeit an kühlen Oberflächen. Bei sinkender Temperatur nimmt das Aufnahmevermögen von Wasserdampf in der Luft ab. Wird die maximale Wasserdampfsättigung erreicht, bildet sich die Feuchtigkeit in der Luft in flüssiger Form an der kalten Oberfläche aus: Tauwasser „fällt aus“, siehe Abbildung 8. Die Grenztemperatur ab der diese Situation eintritt, wird als **Taupunkttemperatur** bezeichnet.

Die Taupunkttemperatur hängt von der Raumlufttemperatur und vom Luftdruck ab. Sie steht in Zusammenhang mit der Raumluftfeuchte (siehe Abbildung 10). Je höher die relative Feuchtigkeit im Raum und je höher die Raumlufttemperatur, desto höher ist die Taupunkttemperatur, d. h. desto eher bildet sich an kälteren Oberflächen Tauwasser.

Das übliche Raumluftklima in Innenräumen liegt im Mittel bei ca. 21 °C und bei ca. 45% relativer Raumluftfeuchte im Winter. Das ergibt eine Taupunkttemperatur von 8,6 °C. In stärker feuchtebelasteten Räumen, wie z. B. im Bad, werden auch höhere Feuchten von 60% und mehr erreicht. Entsprechend höher liegt die Taupunkttemperatur und das Risiko von Tauwasserbildung nimmt zu. So beträgt die Taupunkttemperatur bei einer Raumluftfeuchte von 60% bereits 12,9 °C. An der Steilheit der Kurve in Abbildung 9 erkennt man sehr gut diese sensible Abhängigkeit der Taupunkttemperatur von der Raumluftfeuchte: Bereits kleine Erhöhungen der Raumluftfeuchte führen zu einer wesentlichen Erhöhung der Taupunkttemperatur der Raumluft. Dies hat eine deutliche Erhöhung des Risikos von Tauwasserausfall an den kalten Bauteiloberflächen zur Folge.

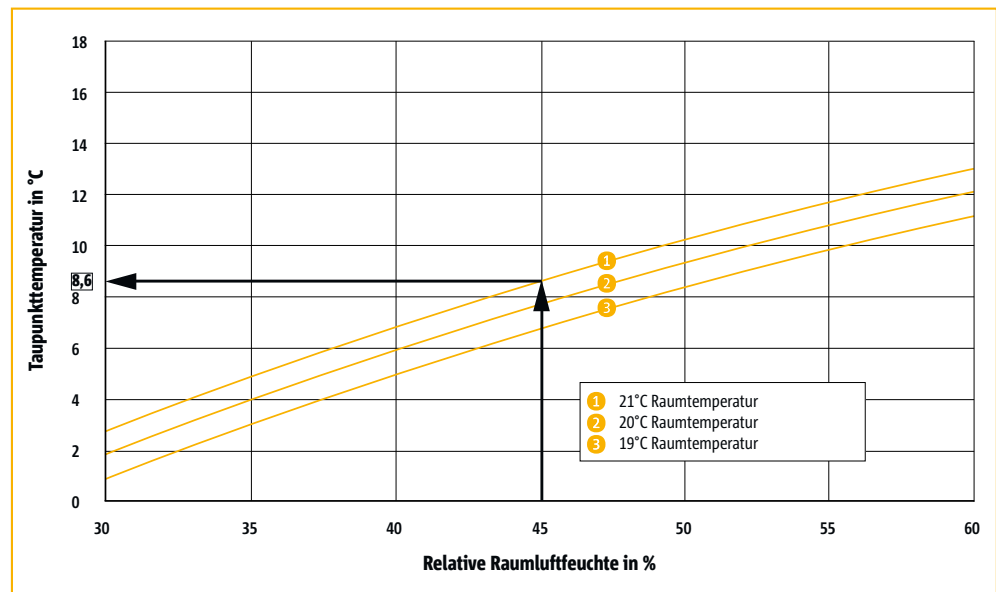


Abbildung 10: Abhängigkeit der Taupunkttemperatur von Raumluftfeuchte und -temperatur.

Beispiele: Ein Schrank an einer Aussenwand; die Luftfeuchte zwischen Wand und Schrank kann sich absetzen, da die Luftzirkulationen hier in der Regel unzureichend ist. Der Luftzwischenraum wirkt wie ein Puffer. Die Lufttemperatur ist hier niedriger als im Raum, sodass die Luftfeuchte hier konstant hoch ist. Dadurch kommt es in solchen Bereichen vermehrt zur Schimmelpilzbildung. Ähnlich kann es sich mit Vorhängen verhalten hinter denen im Fensterbereich Tauwasser ausfallen kann.

Tauwasser im Bauteilinneren

Soll ein Bauteil aus feuchtetechnischer Sicht beurteilt werden, so ist dies mit dem Glaser-Verfahren möglich. Dabei kann die theoretische Feuchteanreicherung bzw. Tauwasserausfall ermittelt werden. Zudem kann auch die zu erwartende Tauwassermenge in der Feuchteperiode und das Austrocknungspotential in der Trocknungsperiode ermittelt werden.

Rahmenbedingungen und Anwendungsgrenzen: Das Glaser-Verfahren betrachtet nur stationäre Zustände für die Feuchte- und die Trocknungsperiode. So wird beispielsweise der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit nicht berücksichtigt, die Analyse bezieht sich nur auf die Betrachtung der Grenzflächen zwischen den Baustoffen.

Schimmelpilzbildung

Ein wesentliches Kriterium für das Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden ist Feuchtigkeit. Das entscheidende Kriterium für Keimung und Wachstum von Mikroorganismen ist dabei das frei zur Verfügung stehende Wasser. Je nach Materialeigenschaft stellt sich an der äusseren und inneren Materialoberfläche eine Luftfeuchtigkeit ein. Je nach Material liegt dann eine unterschiedliche Verfügbarkeit der Feuchtigkeit vor. Verschiedene Materialien bieten im Allgemeinen für Mikroorganismen eine unterschiedliche Verfügbarkeit von Feuchtigkeit, bei gleichem Wassergehalt. Dazu stellt sich ein entsprechendes Schimmelpilzwachstumsverhalten ein.

Die Feuchtgrenze, bei der keine Schimmelpilzbildung stattfindet liegt in der Regel bis ca. 70%. Oberhalb dieser Grenze steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass Schimmelpilzwachstum auftritt. Neben der Luftfeuchtigkeit ist zu beachten, dass die Temperatur in Kombination mit der relativen Luftfeuchtigkeit zu einem entsprechenden Schimmelpilzwachstum führt. Als drittes Kriterium ist der pH-Wert eines Baustoffes zu beachten.

Für ein ideales Raumklima im Winter bei 21 °C und relativer Feuchte von 45 % beträgt die kritische Oberflächentemperatur 12,0 °C und ist also ca. 3,4 °C höher als die Taupunkttemperatur.

Schimmelpilzwachstum tritt also bereits bei Temperaturen oberhalb der Taupunkttemperatur auf. Deshalb ist zur Vermeidung von Bauschäden die zulässige Oberflächentemperatur wichtiger als die Taupunkttemperatur. Die Temperatur, bei der dies auftritt, ist die **kritische Oberflächentemperatur θ_{krit}** . Das Kriterium Schimmelpilzfreiheit nach SIA-Norm verlangt, dass die Oberflächenfeuchte den Wert von 80% nicht langfristig übersteigt.

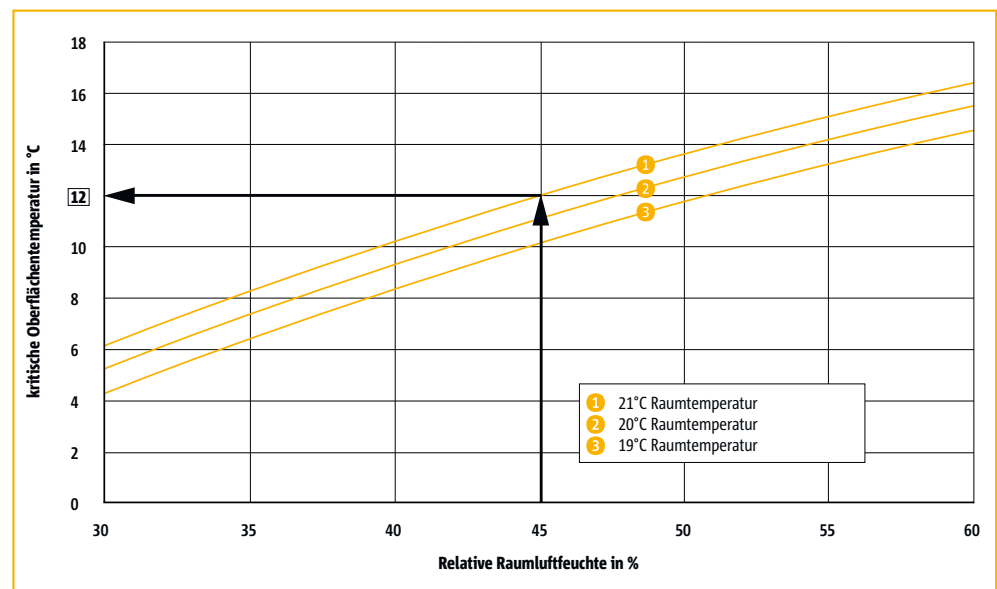


Abbildung 11: Abhängigkeit der Schimmelpilztemperatur von Raumluftfeuchte und –temperatur

Zusammenfassend ist festzuhalten: Es reicht nicht aus, wenn die inneren Oberflächen wärmer sind als die Taupunkttemperatur der Raumluft: Die Oberflächentemperaturen müssen stets oberhalb der kritischen Oberflächentemperatur liegen. Das Kriterium der Schimmelpilzfreiheit verlangt, dass die relative Feuchte auf der Bauteiloberfläche maximal 80% beträgt. Für eine übliche Innenraumtemperatur von 21 °C und bei einer relativen Feuchte von 45% wird dieser bei einer Innenoberflächentemperatur von 12,0 °C erreicht.

Häufige Probleme mit Schimmelpilzbildung treten in der Altbausanierung auf. Zumeist verursachen alte Fenster hohe Wärmeverluste. Dies hat zur Folge, dass dort besonders niedrige Oberflächentemperaturen erreicht werden. Tauwasserausfall an den Fensterscheiben ist daher ein häufiges Phänomen. Werden bei Sanierungsmassnahmen die Fenster erneuert, steigen die Oberflächentemperaturen und durch die erhöhte Dichtigkeit neuer Fensterlaibungen steigt auch die relative Luftfeuchtigkeit. Die Folge ist, dass Schimmelpilzbildung bereits bei Oberflächentemperaturen über 12,0 °C auftreten kann. Das Schimmelpilzrisiko kann nur durch regelmässiges Lüften oder durch den Einbau von Sanierungsfenstern mit Lüftungsschlitzen vermieden werden.

Mindestoberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ und Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi}

Die **minimale Oberflächentemperatur** $\theta_{si,min}$ ist die im Bereich einer Wärmebrücke auftretende niedrigste raumseitige Oberflächentemperatur θ_{si} . Der Wert der minimalen Oberflächentemperatur ist entscheidend dafür, ob an einer Wärmebrücke Tauwasser ausfällt oder sich Schimmel bildet. Die minimale Oberflächentemperatur ist unter Berücksichtigung der relativen Raumfeuchtigkeit ein Kennwert für die feuchtetechnischen Auswirkungen einer Wärmebrücke.

Die Kennwerte $\theta_{si,min}$ und Ψ -Wert hängen von dem konstruktiven Aufbau der Wärmebrücke (Geometrien und Wärmeleitfähigkeiten der die Wärmebrücke bildenden Materialien) und von den Umgebungsbedingungen (Temperatur innen/aussen) ab. Die minimale Oberflächentemperatur innen, ist also zusätzlich noch abhängig von der angesetzten Aussenlufttemperatur: je niedriger die Aussenlufttemperatur, desto niedriger ist die minimale Oberflächentemperatur (siehe Abbildung 12).

Alternativ zur minimalen Oberflächentemperatur wird als feuchtetechnischer Kennwert auch der Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi} verwendet. Der Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi} ist die auf die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen ($\theta_i - \theta_e$) bezogene Temperaturdifferenz zwischen minimaler Oberflächentemperatur und Aussenlufttemperatur ($\theta_{si} - \theta_e$):

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Zur Reduzierung des Risikos von Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung bei Wärmebrücken ist für den f_{Rsi} -Wert ein Grenzwert von 0,75 einzuhalten:

$$f_{Rsi,min} \geq 0,75$$

Der f_{Rsi} -Wert ist ein relativer Wert und hat somit den Vorteil, dass dieser ab einer ausreichenden Temperaturdifferenz zwischen innen/aussen oder unter Bezug auf das Referenzklima nur noch von der Konstruktion der Wärmebrücke, und nicht wie $\theta_{si, min}$ von den angesetzten Aussenluft- und Innenlufttemperaturen abhängt. Er kann sowohl für den stationären, als auch für den instationären Zustand angewendet werden. Wie in Abbildung 12 zu sehen, ist der f_{Rsi} -Wert von den vorherrschenden Temperaturen abhängig. Er berücksichtigt nicht die Luftfeuchtigkeit und kann somit nur für „normales Nutzerverhalten“ angesetzt werden.

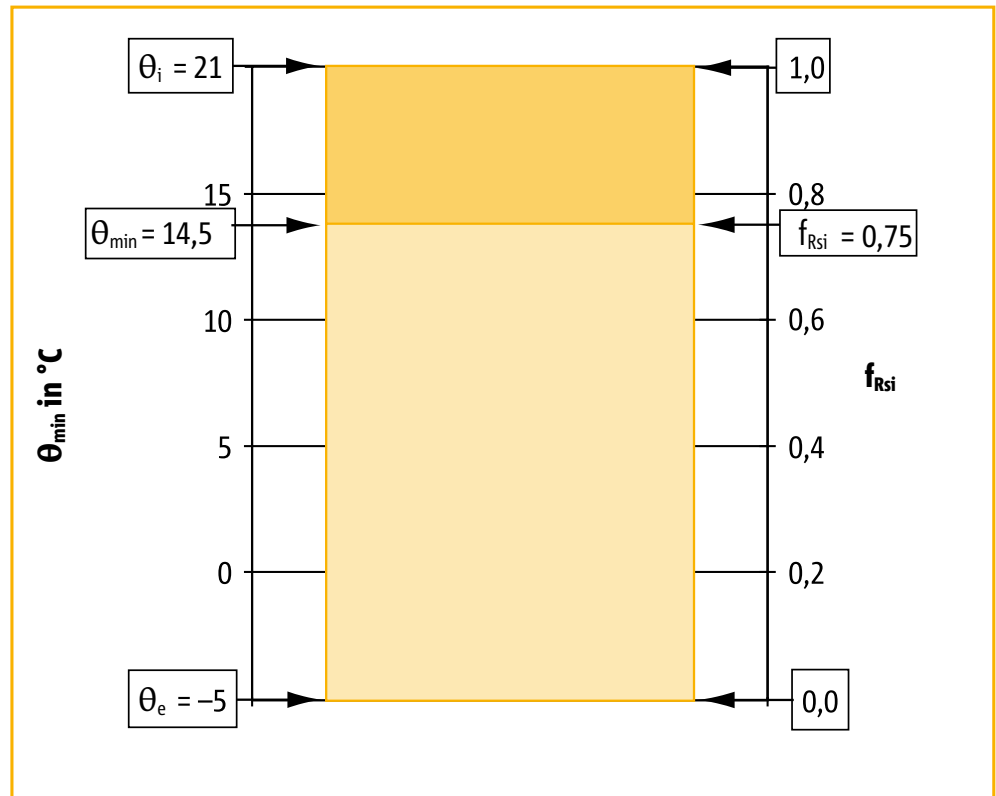


Abbildung 12: Zur Definition des f_{Rsi} -Wertes

Normen und Regelwerke

Allgemeine Anforderungen

Der Nachweis des Wärmeschutzes eines Gebäudes kann mittels Einzelanforderungen, über die Systemanforderungen oder mit Hilfe von Wärmebrückenkatalogen durchgeführt werden.

Der Nachweis der Einzelanforderungen ist einfacher, da die Berechnung des Heizwärmebedarfs nicht notwendig ist. Die Einzelanforderungen sind so festgelegt, dass damit in den meisten Fällen auch die Systemanforderungen erfüllt werden.

Bei allen Neubauten und Umbauten ist für alle flächigen Bauteile ein energetischer Nachweis der thermischen Gebäudehülle zu erbringen. Hierbei wird unterschieden zwischen dem Einzelbauteilnachweis oder Systemnachweis. Der Nachweis der Wärmebrücken ist beim Einzelbauteilnachweis nicht zwingend vorgeschrieben (siehe Konferenz kant. Energiefachstellen; Vollzugshilfe EN-2), mit dem Nachweis reduzieren sich jedoch die energetischen Anforderungen, wie das Beispiel unten zeigt.

Anforderungen durch Einzelbauteilnachweis	Ohne Wärmebrücken-Nachweis	Mit Wärmebrücken-Nachweis
U-Wert	0,17 W/(m ² · K)	0,20 W/(m ² · K)
Dämmdicke	190 mm	150 mm

Abbildung 13: Anforderungen beim Einzelbauteilnachweis unter der Annahme:

$$\lambda_{\text{Dämmung}} = 0,036 \text{ W/(mK)}$$

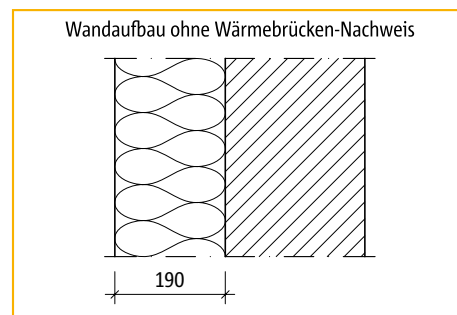


Abbildung 14A: Beispielhafter Wandaufbau für Einzelbauteilnachweis ohne Wärmebrücken-Nachweis

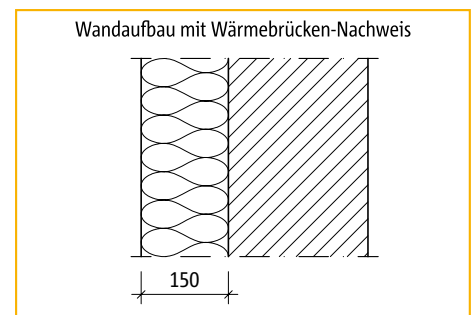


Abbildung 14B: Beispielhafter Wandaufbau für Einzelbauteilnachweis mit Wärmebrücken-Nachweis

Im Beispiel ist zu sehen, dass die Anforderung an den U-Wert beim Einzelbauteilnachweis variiert, je nachdem, ob ein Wärmebrücken-Nachweis durchgeführt wird. Dies zeigt, dass, wenn die Wärmebrücken berücksichtigt werden, eine deutlich geringere Dämmdicke erforderlich ist.

Bei Umbauten und Umnutzungen verlangt die Norm SIA 380/1, Ziffer 2.2.3.6, lediglich, dass Wärmebrücken, deren flankierende Bauelemente von einem Umbau betroffen sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, saniert werden sollen. Beim Einzelbauteilnachweis gelten keine Grenzwerte für die Wärmebrücken. Hingegen sind sie bei einem Systemnachweis in den Heizwärmebedarf einzurechnen.

SIA 380/1:2009 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden

Die SIA 380/1:2009 „Thermische Energie im Hochbau“ beinhaltet den Mindestwärmeschutz während die SIA 180:1999 „Wärme- und Feuchteschutz“ die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit und die Bauschadenfreiheit beschreibt. Dabei regelt sie unter anderem die Anforderungen an den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz an die Lüftung und an den Feuchteschutz. Ein wesentliches Kriterium ist das Vermeiden von kritischer Oberflächenfeuchte und Schimmelpilzbildung, sowie die Begrenzung der Feuchte in der Konstruktion.

Zur Beurteilung kritischer Oberflächenfeuchte steht ein rechnerisches Berechnungsverfahren, sowie ein vereinfachter Nachweis zur Verfügung, sie sind in Kapitel 6.2 SIA 180:1999 näher erläutert. Das massgebende Beurteilungskriterium ist für beide Berechnungsverfahren der Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi} .

Die Norm SIA 380/1 hat zum Ziel, den Wärmeverlust von Gebäuden mittels Energiebilanzrechnung zu begrenzen. Sie beinhaltet sowohl bauphysikalische Anforderungen an die thermische Gebäudehülle als auch heizungs- und anlagentechnische Anforderungen. Sie bildet weiterhin die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung des Energiehaushaltes.

Die SIA 380/1:2009 löste ehemals die Version 2007 ab. Der Grund war das Verschärfen der Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz und die Vereinheitlichung der Anwendung im Vollzug, da die Mustervorschrift der Kantone im Energiebereich (MuKE) von der EnDK (Konferenz der Energiedirektoren) 2008 unabhängig von der SIA revidiert wurde. Es handelt sich dabei um ein standardisiertes Berechnungsverfahren.

Der Jahresheizwärmebedarf stellt zusammen mit dem Wärmebedarf für Warmwasser die relevante Kenngrösse für den Wärmeschutz dar.

SN EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau

Die SN EN ISO 10211 beschreibt die Anforderungen und Grundlagen zur numerischen Berechnung von Wärmebrücken. Sie bietet die theoretischen Grundlagen für eine zweidimensionale und dreidimensionale **detaillierte Wärmebrückenberechnung** mittels Finite-Element-Methode (Lösungsverfahren für Differenzialgleichungen).

Dabei regelt sie im Allgemeinen die Berechnung der folgenden bauphysikalischen Kenngrössen:

- längenbezogener und punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient zweidimensionaler und dreidimensionaler thermischer Leitwert mit entsprechendem Wärmedurchgang
- Oberflächentemperaturfaktor

Wärmebrücken-Nachweis nach SIA

Die Mindestanforderungen an die Wärmeverluste von Wärmebrücken sind in der Norm SIA 380/1:2009 geregelt. Die Vorschriften entsprechen den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) von 2008. Die Berechnung und Beurteilung von Wärmebrücken erfolgt nach SIA 180:1999 „Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau“.

Wärmebrücken müssen in der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten immer berücksichtigt werden. Die Wärmedurchgangskoeffizienten von nicht vermeidbaren Wärmebrücken sind zu minimieren. Alternativ zur Berechnung können auch Wärmebrückenkataloge verwendet werden, wenn der Katalog anhand eines bewährten Rechenverfahrens erstellt wird.

Anders als bei Neubauten verlangt bei Umbauten und Umnutzungen die Norm SIA 380/1, Ziffer 2.2.3.6, lediglich, dass Wärmebrücken, deren flankierende Bauelemente von einem Umbau betroffen sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, saniert werden sollen. Beim Einzelbauteilnachweis gelten nur dann Grenzwerte für Wärmebrücken wenn der Nachweis unter Berücksichtigung von Wärmebrücken erfolgt. Hingegen sind sie bei einem Systemnachweis in den Heizwärmebedarf einzurechnen. In allen Fällen ist der Mindestfeuchteschutz zu beachten.

Insgesamt stehen drei Methoden der Nachweisführung von Wärmebrücken zur Verfügung:

Wärmebrückennachweis-Einzelbauteil

Bei allen Neubauten, Umbauten ist für alle flächigen Bauteile ein energetischer Nachweis der thermischen Gebäudehülle zu erbringen. Hierbei wird unterschieden zwischen dem Einzelbauteilnachweis oder Systemnachweis. Der Nachweis der Wärmebrücken ist beim Einzelbauteilnachweis nicht zwingend vorgeschrieben (siehe Konferenz kant. Energiefachstellen; Vollzugshilfe EN-2). Die Anforderungen sind in der Tabelle unten zusammengefasst.

Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient Ψ	Grenzwert Ψ in W/(mK)	Zielwert Ψ in W/(mK)
Typ 1 Auskragung in Form von Platten oder Riegeln (z.B. Balkone, Vordächer, vertikale Riegeln)	0,30	0,15
Typ 2 Unterbrechung der Wärmedämmschicht durch Wände oder Decken (z.B. Kellerdeckendämmung durch Kellerwände oder Innendämmung durch Innenwände oder Geschossdecken)	0,20	0,10
Typ 3 Unterbrechung der Wärmedämmschicht an horizontalen oder vertikalen Gebäudekanten	0,20	0,10
Typ 5 Fensteranschlag (Leibung, Fensterbank, Fenstersturz)	0,10	0,05
Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient χ	Grenzwert χ in W/(mK)	Zielwert χ in W/(mK)
Typ 6 Punktuelle Durchdringungen der Wärmedämmung (Stützen, Träger, Konsolen; Befestigungen von Ladenkloben und Rückhaltern, Sonnenstoren, Aussenlampen, Spalieren usw.)	0,30	0,15

Abbildung15: Grenz- und Zielwerte für lineare und punktuelle Wärmebrücken

Wärmebrückennachweis-Systemnachweis

Anstelle der Einzelanforderungen können auch die Systemanforderungen nachgewiesen werden. Damit wird Planungsspielraum für wirtschaftliche Lösungen gewonnen. Beim Nachweis der Systemanforderungen müssen Wärmebrücken separat erfasst und berücksichtigt werden.

Checklisten und Wärmebrückenkataloge

Checklisten oder Wärmebrückenkataloge werden von den entsprechenden Energiefachstellen in der Schweiz in der Regel zur Verfügung gestellt. Bei besonderen Anforderungen, wie dies z.B. bei Minergie der Fall ist, muss gegebenenfalls sogar auf den entsprechenden Fachkatalog zurückgegriffen werden. Neben den Energiefachstellen stellen auch viele Hersteller die entsprechende Information den Planenden zur Verfügung.

Minergie-Standard

Der Minergie-Standard wurde 1998 in der Schweiz eingeführt und stellt zur Zeit den wichtigsten Energiestandard für Niedrigenergiehäuser dar. In Abbildung 16 ist die Entwicklung bezüglich Minergie dargestellt.

Hierbei werden sehr hohe Anforderungen an Qualität und Energieeffizienz von Gebäuden gestellt. Die sicherlich wichtigste Anforderung ist sicherlich die an den Heizwärmebedarf, der für den Minergie-Standard nicht mehr als $38 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ betragen darf. Das entspricht etwa $3,8 \text{ l Heizöl pro m}^2$ und Jahr.

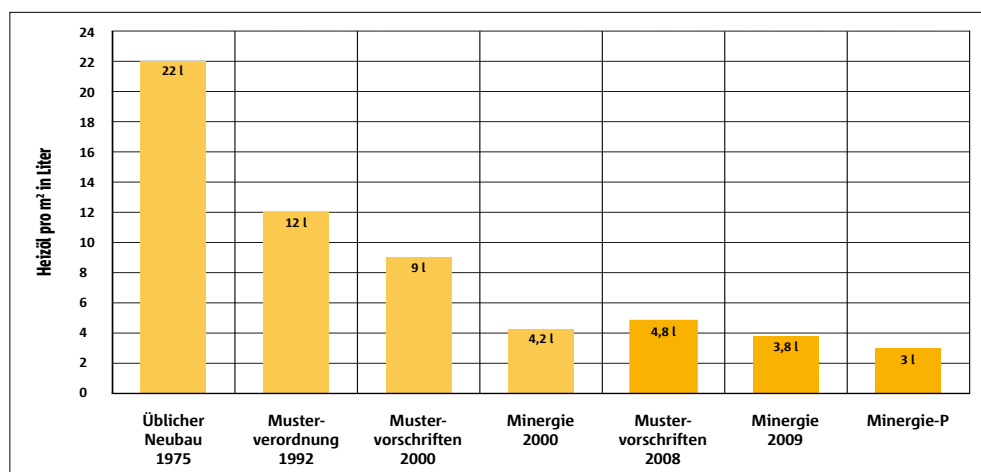


Abbildung 16: Wärmebedarf von Neubauten.

Im Laufe der Zeit wurde der Minergie-Standard erweitert. Während die Minergie-kennzahl-Wärme bei Minergie-P maximal 30 kWh/ m²a betragen darf, handelt es sich bei Minergie-A um einen Plusenergie-Gebäudestandard, siehe Abbildung 17.

Minergie-Standards im Vergleich: Konzeption für Neubauten			
	MINERGIE® Niedrigenergiebauten	MINERGIE-P® Niedrigstenergiebauten	MINERGIE-A® Plusenergiebauten
Minergie-Kennzahl Wärme	38 kWh/m ² a (3,8 Liter Heizöl)	30 kWh/m ² a (3 Liter Heizöl)	0 kWh/m ² a
Primäranforderung (Heizwärmebedarf)	90% der gesetzlichen Anforderungen	60% der gesetzlichen Anforderungen	90% der gesetzlichen Anforderungen
Dichtigkeit der Gebäudehülle	keine Anforderung	Luftwechsel unter 0,6/h bei 50 Pascal Druckdifferenz	
Aussenluftzufuhr	Systematische Lüfterneuerung erhöht Wohnkomfort und reduziert Energiebedarf.		
Hilfsenergie Wärme	nicht berücksichtigt	berücksichtigt	
Haushaltstrom	keine Anforderung	Bestgeräte. Für Bürobauten; Beleuchtung gemäss SIA-Norm	Bestgeräte, Bestbeleuchtung
Graue Energie	keine Anforderung	keine Anforderungen	unter 50 kWh/m ² a
Kombinationsmöglichkeiten	–	mit Minergie-A kombinierbar	mit Minergie-P kombinierbar
Mehrkosten	höchstens 10%	höchstens 15%	keine Anforderungen
Anmerkungen	Minergie ist der Basisstandard. Die Anforderungen an die Gebäudehülle entsprechen jenen der Kantone mit den strengsten Vorgaben.	Minergie-P ist eine Niedrigstenergiebauweise, die eine sehr gute Bauhülle voraussetzt.	Minergie-A ist eine präzise definierte Form des Null- oder Plusenergiehauses. Der Standard ist nur mit Nutzung von Sonnenenergie am Gebäudestandort erreichbar.

Abbildung 17: Minergie-Standard im Vergleich: Konzeption für Neubauten. Quelle: Minergie®

Die Anforderungen können nur umgesetzt werden indem besonders viel Aufmerksamkeit auf die Detailausführung gelegt wird. Dabei muss besonders auf die Luftdichtigkeit und die Ausführung von Wärmebrücken geachtet werden (siehe dazu Wärmebrücken im Passivhaus), indem Wärmeverluste durch Undichtigkeiten vermieden werden und gleichzeitig für Niedrigenergieausführungen geeignete Komponenten wie hochwertige Wand- und Fensterbauteile verwendet werden. Um die Wärmeverluste durch Lüftung zu reduzieren verfügen Passivhäuser über automatische Lüftungsanlagen mit Wärmetauscher. D.h. die Wärme wird der Abluft entzogen und der Frischluft zugeführt.

Durch eine energiesparende Bauweise ist der Energiebedarf eines Niedrigenergiehauses gering. Die internen Energiegewinne in einem Niedrigenergiehaus werden durch grosse Fensterflächen (=solare Energiegewinne), interne Gewinne wie elektrische Geräte, die Bewohner und ggf. eine Zusatzheizung erzielt. Um den sommerlichen Wärmeschutz gewährleisten zu können müssen ausreichend Verschattungsmöglichkeiten für die Fensterflächen eingeplant werden. Damit kann zu jeder Zeit ein behagliches Raumklima gewährleistet werden.

Zusammenfassung:

- Hohe Anforderungen an den U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) aller Bauteile
- Vermeidung von Wärmebrücken durch sorgfältige Ausführung
- Grosse Fensterflächen in Richtung Süden ermöglichen hohe solare Energiegewinne im Winter
- Durch planerische und/oder gestalterische Massnahmen muss eine Überhitzung im Sommer verhindert werden
- Anlagentechnik zur Lüftungswärmerückgewinnung reduzieren Wärmeverluste durch Lüftung
- Die Luftdichtheit der Gebäudehülle verhindert Wärmeverluste durch Fugen und Spalten

Konstruktive Wärmebrücken

Ursache

Konstruktive Wärmebrücken entstehen im Umfeld von konstruktiven Anschlüssen, zum Beispiel bei Balkonauskragungen, bei Dach/Aussenwand-Verbindungen oder bei nachträglichen Innendämm-Massnahmen.

In der Praxis weisen solche Bauteilanschlüsse oft hohe Wärmeverluste und niedrige raumseitige Oberflächentemperaturen auf. **Tauwasserausfall** und **Schimmelpilzbildung** können die Folge konstruktiver Wärmebrücken sein.

Balkone bzw. ungedämmte auskragende Bauteile

Bei ungedämmten auskragenden Bauteilen wie beispielsweise Stahlbeton-Balkonen oder Stahlträgern ergibt das Zusammenwirken der **geometrischen Wärmebrücke** (Kühlrippeneffekt der Auskragung) sowie der **materialbedingten Wärmebrücke** (Durchstossen der Wärmedämmebene mit Stahlbeton oder Stahl) einen hohen Wärmestrom, der damit verbundene Energieverlust ist entsprechend hoch. Damit zählen Auskragungen zu den kritischsten Wärmebrücken der Gebäudehülle. Die Folge ungedämmter Auskragungen sind erhebliche Wärmeverluste und eine signifikante Absenkung der inneren Oberflächentemperatur. Dies führt zu deutlich erhöhten Heizkosten und einem sehr hohen Schimmelpilzrisiko im Anschlussbereich der Auskragung.

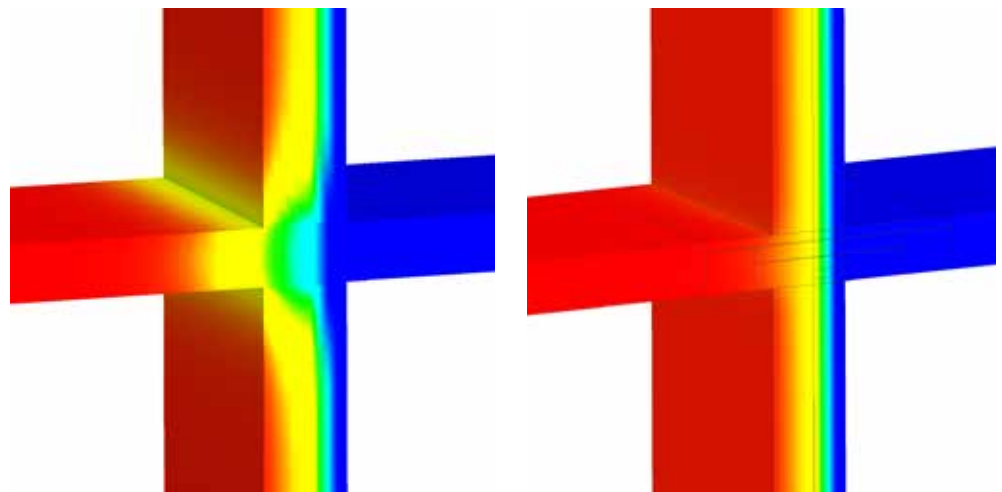


Abbildung 18: Durchlaufende Balkonplatte gegenüber Lösung mit Schöck Isokorb®; Links: durchlaufende Balkonplatte ohne thermische Trennung, Rechts: Mit Schöck Isokorb® thermisch getrennte Balkonplatte.

In Abbildung 18 ist eine Isothermendarstellung eines Stahlbeton-Balkons mit und ohne thermische Trennung dargestellt. Die Isothermendarstellung zeigt den Temperaturverlauf im Bauteil bei entsprechender Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen.

Links ist ein ungedämmter Kraganschluss abgebildet. Die Darstellung rechts zeigt einen thermisch getrennten Kraganschluss. Anhand des Farbverlaufes wird der Temperaturverlauf in der Konstruktion sichtbar. Die warmen Temperaturen sind rot dargestellt und die kalten Temperaturen sind blau dargestellt. Wie an den beiden Beispielen zu sehen ist, ändert sich der Isothermenverlauf beim thermisch getrennten Kraganschluss. Die Oberflächentemperaturen innen sind erheblich

wärmer. Dies ist auf den reduzierten Wärmestrom zurückzuführen. Der thermisch getrennte Kraganschluss führt also zur Erhöhung der Oberflächentemperatur innen und zur Minimierung des Energieverlustes.

Beispiel Attikaanschluss

Bei Attika-Anschlüssen ergeben sich ähnliche wärmetechnische Problemstellungen wie bei Balkonanschlüssen. Zusätzlich muss aber beim Attikaanschluss neben dem materialbedingten Einfluss auch der geometrische Einfluss bezüglich der Wärmebrückenbildung berücksichtigt werden. Es besteht hier neben der Problematik der thermischen Aussenkühlung des Attikaanschlusses (Kühlrippeeffekt) ein weiterer geometrischer Einfluss durch die Aussenecke.

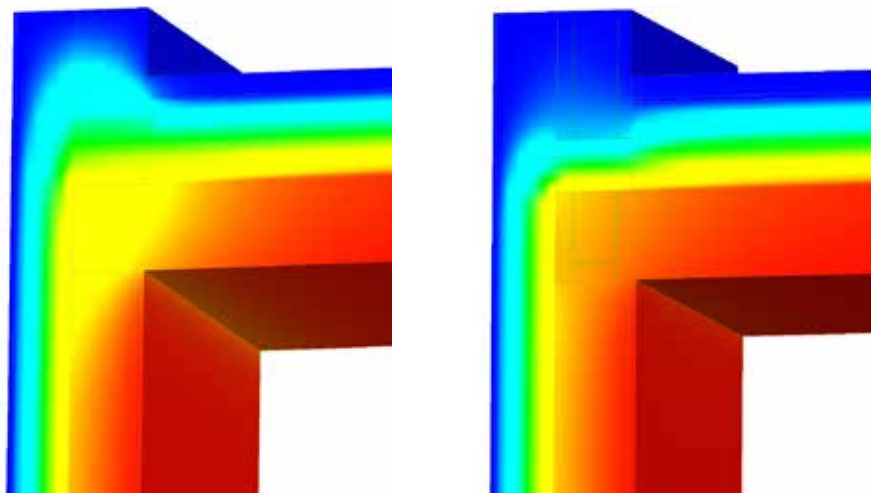


Abbildung 19: Durchlaufender Attikaanschluss gegenüber Lösung mit Schöck Isokorb®; Links: durchlaufender Attikaanschluss ohne thermische Trennung, Rechts: Mit Schöck Isokorb® thermisch getrennter Attikaanschluss.

In der Abbildung 19 sind die Wärmeverluste durch einen Attika-Anschluss ohne (links) und mit (rechts) thermischer Trennung in der Dämmebene zu sehen. Durch den Farbverlauf ist der Temperaturverlauf in der Konstruktion sichtbar gemacht. Der Temperaturverlauf in der Konstruktion verläuft vom warmen Innenbereich (rot) zum kalten (blau) Bereich nach aussen.

Der Attika-Anschluss ohne thermische Trennung (links) weist hohe Wärmeenergieverluste durch den Attikaanschluss auf. Zusätzlich ist die Innenoberflächentemperatur durch die schlechtere, thermische Eigenschaft reduziert. Beim Anschluss mit thermischer Trennung (rechts) ist die minimale Oberflächentemperatur erheblich höher, das Risiko bzgl. Oberflächenkondensat oder Schimmelpilzbildung ist dadurch erheblich minimiert. Zudem wird der Wärmestrom und der damit verbundene Energieverlust auf ein Minimum reduziert.

Beispiel Innendämmung

Wandaufbauten mit Innendämmung unterscheiden sich bauphysikalisch von Konstruktionen mit Aussendämmung in einem wichtigen Punkt: Die tragende Deckenkonstruktion durchstößt die thermische Dämmebene beim Übergang zum Massivwandanschluss. Dadurch wird die Innendämmung unterbrochen.

In Abbildung 20 ist der Isothermenverlauf in der Wandkonstruktion bei Innendämmung zu sehen. Der rot dargestellte Bereich liegt auf der warmen Innenraumseite. Die rechte Abbildung ist im Wandanschlussbereich zu Decke thermisch getrennt, die Temperatur ist relativ homogen, während die linke Abbildung im Anschlussbereich innenraumseitig eine wesentlich niedrigere Oberflächentemperatur aufweist. Wird in der Dämmebene also keine thermische Trennung vorgenommen, findet ein erhöhter Wärmestrom nach Aussen statt.

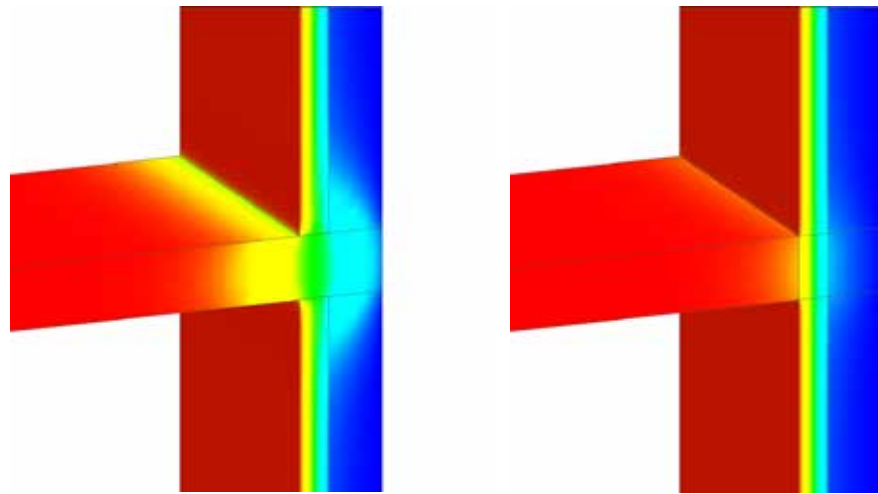


Abbildung 20: Durchlaufende Deckenplatte bei Innendämmung gegenüber Lösung mit Schöck Isokorb®; Links: durchlaufende Deckenplatte ohne thermische Trennung, Rechts: Mit Schöck Isokorb® thermisch getrennte Deckenplatte.

Durch die Verwendung eines tragenden Wärmedämmelements können Wärmeverluste erheblich reduziert und das Wohnklima wesentlich verbessert werden. Das Risiko bezüglich kritischer Oberflächentemperatur im Winter wird minimiert. Das Schimmelpilzrisiko wird damit auf ein Minimum reduziert.

Lexikon

Jahres-Heizwärmebedarf

Der Jahres-Heizwärmebedarf eines Gebäudes beschreibt die Energie, die notwendig ist, um ein Gebäude zu beheizen. Nicht beinhaltet sind dabei die Verluste der Anlagentechnik sowie die Verluste bei Energiegewinnung und Transport (siehe Abbildung 21).

Damit wird deutlich, dass es sich hierbei um eine Grösse handelt, die nur einen sehr kleinen Ereignisrahmen betrachtet.

Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs

$$Q_h = \Sigma [Q_T + Q_V - \eta_g \cdot (Q_i + Q_s)]$$

- Q_h : Heizwärmebedarf
- Q_T : Transmissionswärmeverlust
- Q_V : Lüftungswärmeverlust
- η_g : Ausnutzungsgrad für Wärmegewinne
- Q_s : solare Gewinne
- Q_i : interne Gewinne

mit Ermittlung des Ausnutzungsgrad η_g :

wenn $\gamma > 1$ und $\neq 1$, dann $\eta_g = (1 - \gamma^a) / (1 - \gamma^{a+1})$

wenn $\gamma = 1$, dann $\eta_g = a / (a + 1)$

wenn $Q_{ot} \leq 0$, dann $\eta_g = 0$

- γ Wärmegewinn/-verlust-Verhältnis
- a Parameter für Ausnutzungsgrad
- Q_{ot} Gesamtwärmeverlust in MJ/m²

Bei der Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs werden die Wärmeverluste durch alle Bauteile (Transmissionswärmeverluste) und durch Lüftung berücksichtigt. Dem werden die Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung und interne Gewinne wie durch elektrische Geräte gegenübergestellt.

Jahres-Primärenergiebedarf

Der Jahres-Primärenergiebedarf beschreibt den Energiebedarf von der Herstellung bzw. Gewinnung der Energiequelle sowie den Transport und den Verbrauch. Damit werden regenerative Energiequellen sowie effiziente Anlagentechnik und ein hoher Wärmedämmstandard positiv berücksichtigt.

Folglich betrachtet der Primärenergiebedarf den tatsächlichen Energieverbrauch und bietet somit eine sehr umfassende Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit.

Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs

(vereinfachter Ansatz für Wohngebäude)

$$Q_p = (Q_h + Q_w) \cdot e_p$$

- Q_h : Jahres-Heizwärmebedarf
- Q_w : Zuschlag für Warmwasser
- e_p : Anlagenaufwandszahl

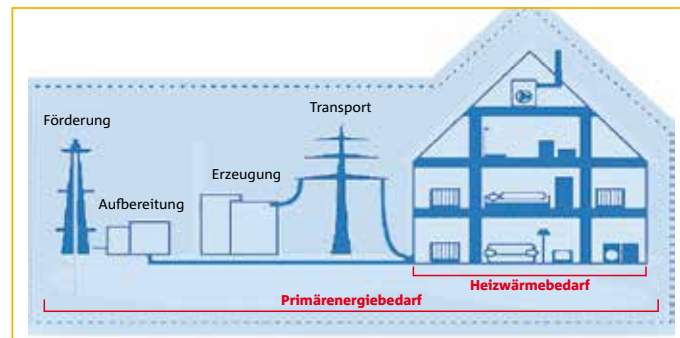


Abbildung 21: Darstellung zur Abgrenzung Primärenergiebedarf zu Heizwärmebedarf. Der Heizwärmebedarf definiert den Energieverbrauch im Gebäude, der ab der Heizungsanlage zur Beheizung der Räume aufgewendet wird. Während der Primärenergiebedarf zusätzlich die Energiebeschaffung und die Qualität der Heizungsanlage beinhaltet.

Spezifischer Transmissionswärmeverlust Q_T

Der spezifische Transmissionswärmeverlust beschreibt die Wärmeverluste, die durch die Gebäudehülle abgegeben werden. Zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste werden die energetischen Verluste durch die einzelnen flächigen Bauteile des Gebäudes sowie die Energieverluste durch Wärmebrücken summiert. Die Transmissionswärmeverluste durch flächige Bauteile werden durch den U-Wert des Bauteils pro Fassadenfläche des Bauteils berechnet. Die ausführliche Beschreibung findet sich in der SIA 380/1:2009.

Berechnung des Transmissionswärmeverlustes

$$Q_T = (\theta_i - \theta_e) t_c \cdot H_T \cdot 86400 / A_E \cdot 10^6$$

- Q_T : Transmissionswärmeverlust in MJ/m²
- θ_i : Innentemperatur in °C
- θ_e : Aussentemperatur in °C
- t_c : Länge der Berechnungsperiode in d
- H_T : Wärmeverlust aller Bauteile in W/K
- A_E : Energiebezugsfläche in m²

Berücksichtigung von Wärmebrücken

Punktförmige und linienförmige Wärmebrücken müssen für den Gesamtenergiehaushalt entsprechend Berücksichtigung finden. Der Wärmeverlust einer Konstruktion kann durch den zusätzlich durch Wärmebrücken gestörten Wärmestrom wie folgt beschrieben werden:

$$H_T = \sum A_i \cdot U_i + \sum l_k \cdot \psi_k + \sum \chi_j$$

- H_T : Wärmeverlust infolge Transmission und Wärmebrücken
- A_i : Fläche des Bauteils in m²
- U_i : U-Wert des Bauteils in W/(m²K)
- l_k : Länge der Wärmebrücke in m
- ψ_k : längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke in W/(mK)
- χ_j : punkbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke in W/(mK)
- θ_i : Innentemperatur in °C
- θ_e : Aussentemperatur in °C

Begriffsdefinitionen zu den Formeln:

- H_e ist die Summe der Energieverlust infolge Transmission und Wärmebrückeneinfluss
- $\sum U_i \cdot A_i$ beschreibt den Wärmeverlust über alle flächigen Bauteile (Wände, Decken, Fenster etc.) mit U_i als Wärmedurchgangskoeffizient der trennenden Bauteile i mit der aussenmassbezogenen Fläche A_i
- $\sum \psi_k \cdot l_k$ stellt den zusätzlichen Wärmeverlust über alle linienförmigen Wärmebrücken (z. B. Balkone, Mauerfuss am Gebäudesockel) dar, mit ψ_j als aussenmassbezogener, längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der linienförmigen Wärmebrücke j mit der Länge l_j
- $\sum \chi_j$ stellt den zusätzlichen Wärmeverlust über alle punktförmigen Wärmebrücken (z. B. Durchdringung der Aussenwand durch Stahlträger) dar, mit χ_k als punktförmiger Wärmedurchgangskoeffizient der punktförmigen Wärmebrücke k

Sommerlicher Wärmeschutz

Wenn durch Sonneneinstrahlung der Wohnraum aufgeheizt wird spricht man von solaren Wärmegewinnen. Dies kann durch das Aufheizen von Bauteilen oder durch direkte Transmission (Durchgang) der Wärmestrahlung durch Fenster verursacht werden.

Als sommerlicher Wärmeschutz werden die Massnahmen bezeichnet, die den Wärmeeintrag durch Sonnenstrahlung reduzieren. Dies wird vorzugsweise durch Verschattungsmassnahmen umgesetzt. Dies kann durch auskragende Bauteile wie Balkone aber auch durch Rollläden, Markisen u ä. ausgeführt werden. Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz sind in der Norm SIA 180:1999 „Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau“, Kapitel 5 festgelegt.

Dabei werden Anforderungen an Abmessungen und Ausrichtungswinkel der Fassaden und Fenster, an Verglasungs- und Fassadenart, Massnahmen zur Verschattung und weitere Einflussgrössen wie beispielsweise dem Lüftungsverhalten der Nutzer gestellt. Zusätzlich wird die Wärmespeicherfähigkeit der entsprechenden Konstruktionen berücksichtigt.

Wärmestrom Φ

Der Wärmestrom (Watt) beschreibt den Wärmetransport von Wärmeenergie (Joule) abhängig von der Zeit (s). Der Wärmetransport wird durch die temperaturabhängige Eigenbewegung von Atomen und Molekülen verursacht. Dabei ist die Fliessrichtung des Wärmestroms per Definition von einem Bereich höher hin zu einem Bereich niedriger Temperatur gerichtet.

Die Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt eine Stoffeigenschaft und ist temperaturabhängig. Dabei wird mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit beschrieben, wieviel Wärmemenge durch ein Material dringt. Dabei bedeutet ein kleiner λ -Wert eine niedrige Wärmeleitfähigkeit bzw. einen hohen Wärmewiderstand und damit eine gute Wärmedämmung. So hat Stahl beispielsweise eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (15 bis 50 W/(mK)), während Dämmung eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist (ca. 0,035 W/(mK)).

Dabei wird die Wärmemenge in Js gemessen, die in 1 s durch 1 m² einer 1 m dicken homogenen Stoffschicht fliesst, wenn der Temperaturunterschied 1 K beträgt. Es wird von 10 °C zu 9 °C gemessen.

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq}

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} eines aus mehreren Baumaterialien bestehenden Bauelementes ist die Wärmeleitfähigkeit eines homogenen, quaderförmigen Ersatzbaustoffes gleicher Abmessung, welcher anstelle des komplexen Bauelementes im eingebauten Zustand die gleiche wärmeschutztechnische Wirkung erzielt.

Gemäss dem Europäischen Bewertungsdokument (European Assessment Document - EAD) für tragende Wärmedämmelemente, das 2017 eingeführt wurde, wird λ_{eq} wie folgt ermittelt.

Bei der Berechnungsmethode nach EAD wird eine detaillierte dreidimensionale Wärmebrückenberechnung mit dem tragenden Wärmedämmelement durchgeführt. Dabei wird der komplexe Aufbau eines tragenden Wärmedämmelements im Detail modelliert und der Wärmeverlust über die Wärmebrücke bestimmt. Aus dem auftretenden Wärmeverlust wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} und der äquivalente Wärmedurchlasswiderstand R_{eq} ermittelt.

Die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten λ_{eq} für den Schöck Isokorb® sind den Technischen Informationen zu entnehmen.

Die Detaillierte Wärmebrückenberechnung

Soll ein detaillierter Wärmebrückennachweis, zur Ermittlung von ψ - oder f_{Rsi} -Werten, geführt werden, kann für die Modellierung des Anschlussdetails der λ_{eq} -Wert verwendet werden. Dafür wird ein homogenes Rechteck, mit den Abmessungen des Dämmkörpers des Schöck Isokorb®, an dessen Position im Modell gesetzt und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} zugewiesen, siehe Abbildung. So können einfach bauphysikalische Kennwerte einer Konstruktion errechnet werden.

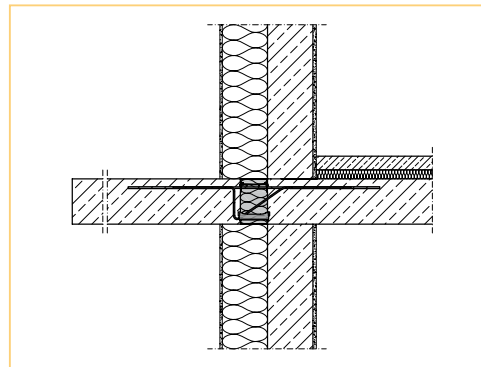


Abb. 22: Darstellung einer Schnittzeichnung mit detailliertem Schöck Isokorb® Modell

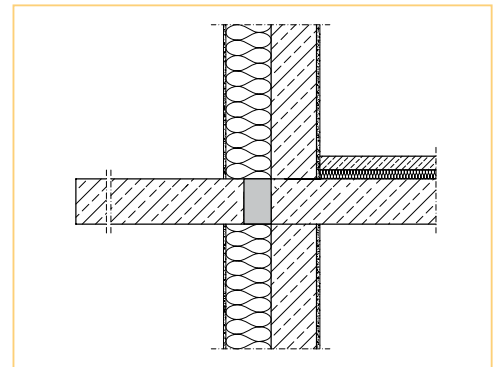


Abb. 23: Darstellung einer Schnittzeichnung mit vereinfachtem Ersatzdämmkörper

Die Berechnungsmethodik zur Ermittlung von λ_{eq} wurde auf Grundlage des Europäischen Bewertungsdokuments (European Assessment Document - EAD) für tragende Wärmedämmelemente und darauf aufbauend für den Schöck Isokorb® in der europäischen technischen Bewertung (European Technical Assessment - ETA) validiert.

Mit marktüblicher Wärmebrücken-Software kann mithilfe der thermischen Randbedingungen nach SN EN ISO 6946 eine Berechnung erfolgen. Damit können neben den Wärmeverlusten der Wärmebrücke (ψ -Wert) auch die Oberflächentemperaturen θ_{si} und damit auch der Temperaturfaktor f_{Rsi} berechnet werden.

Die einzelnen λ_{eq} -Werte finden Sie in Bauphysikalische Kennwerte online unter: www.schoeck-bauteile.ch/download/bauphysik

Der Wärmedurchlasswiderstand; R-Wert

Der Wärmedurchlasswiderstand ist der Widerstand, den ein Material dem Wärmestrom bei 1 °K für einen m² entgegensetzt.

Berechnet wird R als Dicke des Materials geteilt durch seine Wärmeleitfähigkeit:

λ : Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

d: Materialdicke in m

Diese Berechnung eines R-Werts kann auch für ein mehrschichtiges Bauteil durchgeführt werden:

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}$$

Die Abbildung unten zeigt einen Schnitt durch eine mehrschichtige Konstruktion.

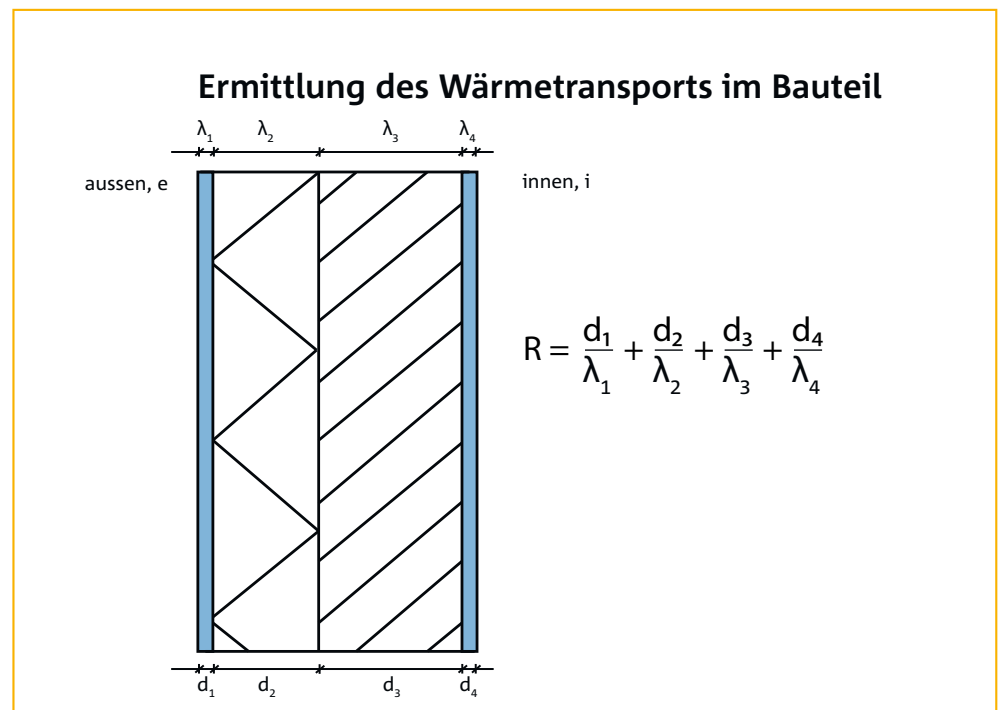


Abbildung 24: Darstellung eines Wandaufbaus, daran wird der R-Wert durch die Dicke der Schichten und die dazugehörigen λ -Werte definiert. Rechts ist zu erkennen wie der R-Wert aus allen Schichten errechnet werden kann.

Der Wärmedurchgangskoeffizient; U-Wert

Der Wärmedurchgangskoeffizient beschreibt den Wärmedurchgang durch ein Bauteil. Er beruht auf dem R-Wert eines Bauteils und beinhaltet zusätzlich den Wärmeübergangswiderstand der an das Bauteil angrenzenden Luftschichten. Damit stellt der U-Wert den tatsächlichen Wärmedurchgang von Innen- zu Aussenraumluft dar.

Berechnet wird der U-Wert als Kehrwert der Summe der Wärmeübergangswiderstände innen und aussen R_{si} resp. R_{se} und der Summe aller Wärmedurchlasswiderstände für die Konstruktion R:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$

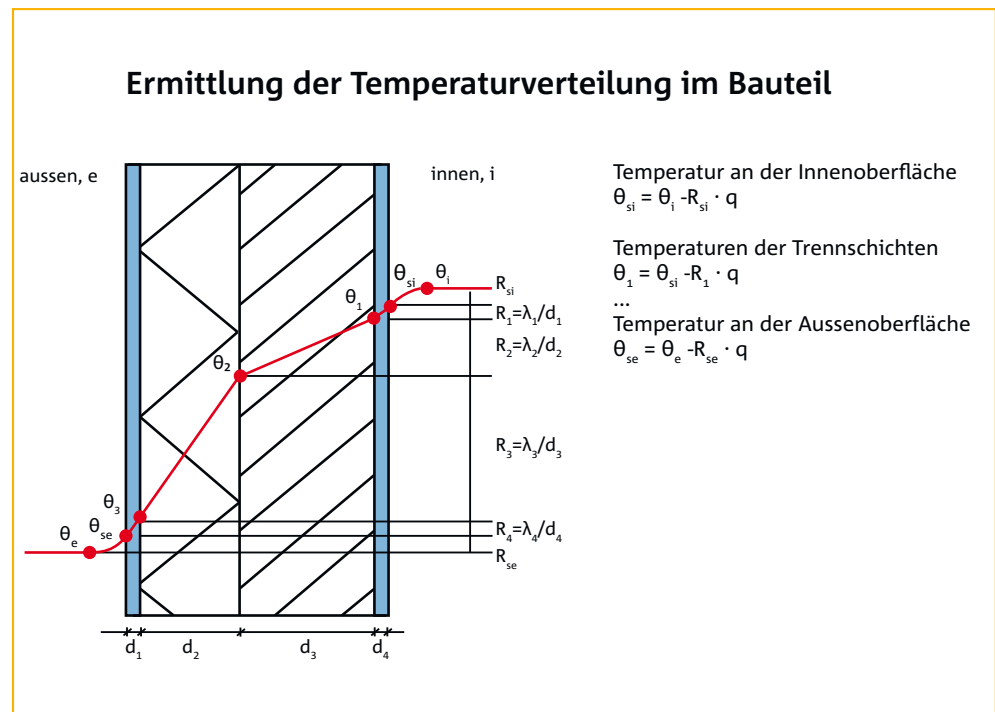


Abbildung 25: Darstellung des Temperaturverlaufes durch eine Wand, dabei wird die Steigung der Temperaturkurve durch die Dicke der Schichten und den dazugehörigen R-Wert definiert. An den Rändern des Bauteils wirkt jeweils zusätzlich noch der Wärmeübergangswiderstand R_{si} - und R_{se} -Wert. Hierdurch wird die Anströmigkeit der Luft an den äusseren Bauteilbegrenzungen berücksichtigt. Rechts ist zu erkennen wie die Temperaturverteilung zwischen den einzelnen Schichten errechnet werden kann.

Thermischer Leitwert

Der thermische Leitwert ist der Quotient aus dem längenbezogenen Wärmestrom und der Temperaturdifferenz zwischen, im klassischen Fall, zwei Räumen, die durch die betrachtete Konstruktion verbunden sind. Dadurch stellt der Leitwert die Wärmeverluste durch diese Konstruktion dar.

Formel gemäss SN EN ISO 10211:

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{\Delta T} \text{ [W/(mK)]}$$

Für eine Konstruktion mit Wärmebrücken setzt sich der dreidimensionale thermische Leitwert L_{3D} aus den flächigen Transmissionswarmeverlusten durch die ungestörten Bauteile und aus den Transmissionswarmeverlusten durch die Summe aller Wärmebrücken zusammen.

Wie in der folgenden Formel (nach SN EN ISO 10211) dargestellt.

Formel gemäss SN EN ISO 10211:

$$L_{3D,i,j} = \sum_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \cdot A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \Psi_{m(i,j)} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_{n(i,j)}$$

Dabei ist:

- $U_{k(i,j)}$ der Wärmedurchgangskoeffizient von Teil k des Raums oder Gebäudes;
- A_k die Fläche, für die der Wert $U_{k(i,j)}$ gilt;
- $\Psi_{m(i,j)}$ der lineare Wärmedurchgangskoeffizient von Teil m des Raums oder Gebäudes;
- l_m die Länge, über die der Wert $\Psi_{m(i,j)}$ gilt;
- $\chi_{n(i,j)}$ der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient von Teil n des Raums oder Gebäudes;
- N_k die Anzahl der Wärmedurchgangskoeffizienten;
- N_m die Anzahl der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten;
- N_n die Anzahl der punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten ψ und χ

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist ein spezifischer Kennwert eines Bauteils. Er beschreibt die zusätzlich auftretende Wärmeverluste, die durch Wärmebrücke entstehen. Hierbei wird zwischen linienförmige Wärmebrücke (z.B. ein Balkonanschluss) und punktuellen Wärmebrücke (z.B. Anker in der Fassade) unterschieden.

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ („ ψ -Wert“) kennzeichnet den pro lfm. zusätzlich auftretenden Wärmeverlust einer linienförmigen Wärmebrücke. Der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient χ („ χ -Wert“) kennzeichnet entsprechend den zusätzlichen Wärmeverlust über eine punktförmige Wärmebrücke.

Der ψ -Wert ist von der Konstruktionsqualität, den Konstruktionsstärken und den **U-Werten** der anschliessenden Bauteile abhängig. Dies ist so, da die Wärmebrücke und die angrenzende Konstruktion sich gegenseitig in ihrer Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Damit ändert sich der ψ -Wert, wenn sich die angrenzenden Konstruktion ändert, auch wenn die Wärmebrücke gleich bleibt.

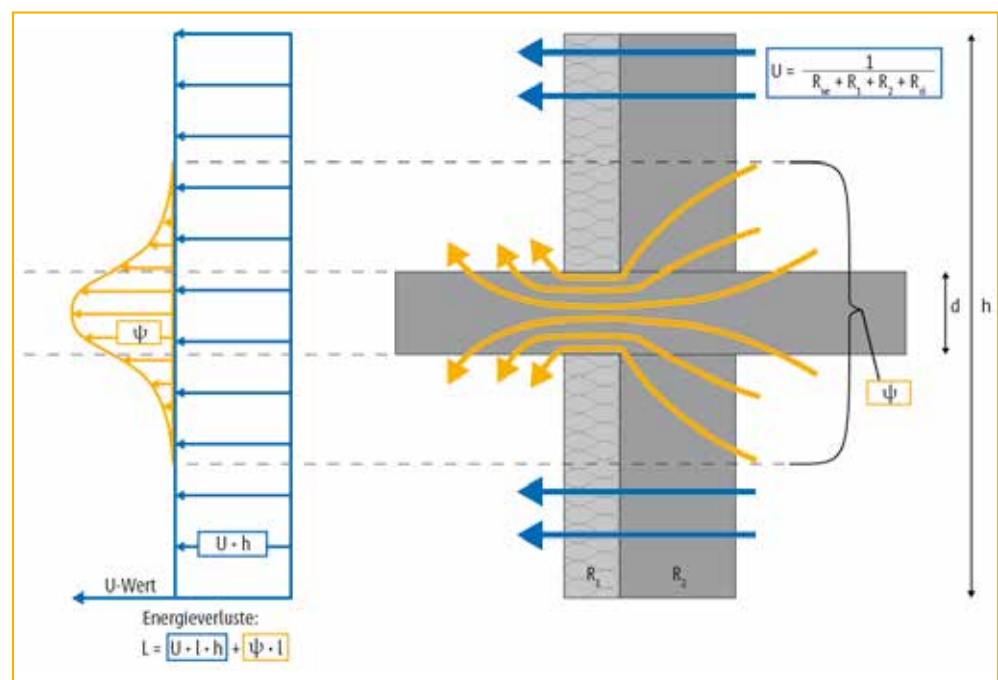


Abbildung 26: Darstellung der Energieverluste durch eine Wand mit durchlaufender Balkonplatte, anhand einer Schnittzeichnung. Rechts ist die Konstruktion mit den auftretenden Wärmeströmen in Pfeilform abgebildet. Links sind die in diesem Schnitt auftretenden Energieverluste dargestellt. Diese sind auch als Formel aufgeführt, mit l wird hierbei die Länge der Konstruktion senkrecht zur Zeichenebene beschrieben.

In Abbildung 26 ist zu sehen wie der ψ -Wert für eine ungestört durch die Wand durchlaufende Balkonplatte aussieht. Dieser zusätzliche Wärmeverlust durch die Balkonplatte beeinflusst auch die angrenzende Wand. Praktisch bedeutet das, dass durch den Abfluss der Wärme über die Balkonplatte auch die Wand oberhalb und unterhalb der Wärmebrücke auskühlt. An den Pfeilen rechts in der Abbildung ist zu sehen welchen Weg die Wärmeströme dabei nehmen. Während bei ungestörten Wänden nur horizontale Wärmeströme auftreten (in blau dargestellt) sind die Wärmeströme in Wärmebrücken dreidimensional (in gelb dargestellt). Hieraus wird ersichtlich warum die Ermittlung von ψ -Werten wesentlich komplexer ist als die von U-Werten.

Zur Berechnung von dreidimensionalen Warmeströmen ist der Einsatz einer Berechnungssoftware daher zwingend erforderlich. Die normative Grundlage bildet die SN EN ISO 10211. Darin werden die Randbedingungen für die Ermittlung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ geregelt.

Um den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ zu ermitteln werden vom thermischen Leitwert L_{2D} die Wärmeverluste abgezogen, die bereits über U-Werte und das Flächenaufmass berücksichtigt wurden (siehe Formel). Auszug aus SN EN ISO 10211:

9.2 Berechnung der längen- und punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten

Die Ψ -Werte werden bestimmt nach:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j$$

Dabei ist:

- L_{2D} der thermische Leitwert aus einer 2-D-Berechnung des die beiden betrachteten Räume trennenden Bauteils;
- U_j der Wärmedurchgangskoeffizient des die beiden betrachteten Räume trennenden 1-D-Bauteils j ;
- l_j die Länge, für die der Wert U_j gilt.

Die χ -Werte werden bestimmt nach:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \Psi_j \cdot l_j$$

Dabei ist:

- L_{3D} der thermische Leitwert aus einer 3-D-Berechnung;
- U_i der Wärmedurchgangskoeffizient des die beiden betrachteten Räume trennenden 1-D-Bauteils;
- A_i die Fläche, über die der U_i -Wert gilt;
- ψ_i der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient;
- l_j die Länge, über die der ψ_i -Wert gilt;
- N_j die Anzahl der 2-D-Bauteile;
- N_i die Anzahl der 1-D-Bauteile.

längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (Definition aus SN EN ISO 10211):

Quotient aus Wärmestrom im stationären Zustand und dem Produkt aus Länge und Temperaturdifferenz zwischen den Umgebungstemperaturen auf jeder Seite der Wärmebrücke.

punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (Definition aus SN EN ISO 10211):

Quotient aus Wärmestrom im stationären Zustand und der Temperaturdifferenz zwischen den Umgebungstemperaturen auf jeder Seite der Wärmebrücke.

Taupunkttemperatur θ_T

Die Taupunkttemperatur θ_T eines Raumes ist diejenige Temperatur, bei der die in der Raumluft vorhandene Feuchtigkeit nicht mehr von der Raumluft gehalten werden kann und dann in Form von Wassertröpfchen abgegeben wird. Sie wird auch als Mass für die absolute Feuchte verwendet. Wenn der Taupunkt erreicht ist, weist die Luft 100 % relative Feuchtigkeit (rF) auf, der Wasserdampf ist dann in der Luft gesättigt.

Raumseitige Oberflächentemperatur θ_{si}

Die raumseitige Oberflächentemperatur θ_{si} gibt unter anderem Auskunft über den Wärmedurchlasswiderstand eines Bauteils. Ist die raumseitige Oberflächentemperatur trotz hoher Innenraumtemperaturen im Winter niedrig, lässt sich daraus schliessen, dass durch das Bauteil viel Wärmeenergie nach aussen fliesst, der Wärmestrom ist entsprechend hoch und der Wärmedurchlasswiderstand entsprechend niedrig.

Im Bereich von Wärmebrücken treten die niedrigsten Oberflächentemperaturen auf, daher spricht man in diesem Zusammenhang auch von der minimalen Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$. Die minimale Oberflächentemperatur ist entscheidend dafür, ob an einer Wärmebrücke Tauwasser ausfällt oder sich Schimmel bildet. Neben der Innen- und Aussentemperatur ist die minimale Oberflächentemperatur ein Kennwert für die feuchtetechnische Beurteilung einer Wärmebrücke. $\theta_{si,min}$ hängt somit unmittelbar von dem konstruktiven Aufbau einer Wärmebrücke ab (Geometrien und Wärmeleitfähigkeiten der die Wärmebrücke bildenden Materialien).

Kritische Oberflächentemperatur θ_{krit}

Die kritische Oberflächentemperatur θ_{krit} beschreibt den Grenzzustand ab dem die Hygienischen Mindestanforderungen nicht mehr erreicht werden. Sie ist unter Berücksichtigung der relativen Raumfeuchtigkeit ein Kennwert für die feuchtetechnischen Auswirkungen einer Wärmebrücke. Dabei werden die minimalen, Oberflächentemperaturen an der Innenraumseite in Bezug auf ein mögliches Schimmelpilzrisiko beurteilt.

Die kritische Oberflächentemperatur hängt von dem konstruktiven Aufbau der Wärmebrücke (Geometrien und Wärmeleitfähigkeiten der die Wärmebrücke bildenden Materialien) und von den Umgebungsbedingungen (Temperatur innen/ aussen) ab.

Schöck Bauteile AG
Neumattstrasse 30
5000 Aarau
Telefon: 062 834 00 10
Telefax: 062 834 00 11
info@schoeck-bauteile.ch
www.schoeck-bauteile.ch

