



Tino Ritter Bauphysik

Rechenmethode und Normkonformität

Rechenmethode, Randbedingungen und Validierung

Inhaltsverzeichnis

1 Zweck und Geltungsbereich	3
2 Normative Grundlagen	3
3 Physikalisches Modell	3
4 Numerisches Verfahren	4
4.1 Geometrie und Vernetzung	4
4.2 Finite-Elemente-Formulierung	5
4.3 Gleichungslöser	5
4.4 Wärmeströme	5
5 Randbedingungen	5
5.1 f_{Rsi} -Satz nach DIN 4108-2	6
5.2 Ψ -Satz nach DIN 4108 Beiblatt 2 und DIN EN ISO 6946	6
6 Auswertung des Temperaturfaktors f_{Rsi}	6
7 Auswertung von Ψ	7
7.1 Mehrere Wärmebrücken in einem Modell	8
8 Luftschichten nach DIN EN ISO 6946	9
9 Anforderungen der DIN EN ISO 10211 und ihre Umsetzung	10
10 Validierung	10
10.1 DIN EN ISO 10211, Validierungsfall 2	10
10.2 Analytischer Vergleich	11
10.3 Schräge Wand	11
10.4 Netzkonzvergenz	11
10.5 Vergleich mit THERM und flixo	11
10.6 Online-Fassung, Windows-Programm und Offline-Fassung	12
11 Aus Bauplänen erzeugte Details	12
11.1 Bestandsbauteile mit pauschalem U-Wert	13
11.2 Traufe und aus Grundrissen abgeleitete Anschlüsse	13
12 Voreinstellungen des Systemreiters und ihre normative Begründung	14
13 Grenzen und Hinweise	15
14 Ergebnis	15

1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Dokumentation beschreibt das Rechenverfahren des WB2D Wärmebrückenrechners und zeigt, wie die Anforderungen der einschlägigen Normen an die Berechnung des Temperaturfaktors f_{Rsi} und des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ umgesetzt sind. Sie richtet sich an Anwender, die Ergebnisse von WB2D in Nachweisen verwenden, und an Prüfer, die die Rechenmethode nachvollziehen wollen.

WB2D berechnet stationäre, zweidimensionale Wärmeleitung in Bauteilquerschnitten. Dreidimensionale Wärmebrücken, instationäre Vorgänge, Feuchtetransport und Strahlungsaustausch in größeren Hohlräumen sind nicht Gegenstand des Programms. Innerhalb dieses Rahmens folgt WB2D denselben Normen und Modellannahmen wie etablierte Programme; die Vergleichsrechnungen in Kapitel 10 zeigen gegenüber THERM und flixo Abweichungen von höchstens 0,001 im Temperaturfaktor und 0,0003 W/(m·K) im thermischen Leitwert.

2 Normative Grundlagen

Norm	Inhalt	Verwendung in WB2D
DIN EN ISO 10211:2018-04	Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen	Rechenmodell, Modellgrenzen, Netzprüfung, Validierungsfälle, Definition von L^{2D} und Ψ
DIN 4108-2:2013-02	Mindestanforderungen an den Wärmeschutz	Randbedingungen des f_{Rsi} -Satzes, Definition von f_{Rsi} , Anforderung $f_{Rsi} \geq 0,70$
DIN 4108 Beiblatt 2:2019	Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele	Randbedingungen des Ψ -Satzes, Erdreich- und Kellertemperaturen, Außenmaßbezug, Ersatzsysteme für Fenster, Türen, Dachflächenfenster, Lichtkuppeln und Rollladenkästen
DIN EN ISO 6946:2018-03	Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient	Übergangswiderstände, U-Werte der flankierenden Bauteile, ruhende und belüftete Luftschichten (Tabelle 8, Anhang D)
DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456	Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte	Wärmeleitfähigkeiten der Materialbibliothek

3 Physikalisches Modell

Im Bauteilquerschnitt gilt die stationäre Wärmeleitungsgleichung ohne innere Wärmequellen. Mit der Temperatur $\theta(x, y)$ und der stückweise konstanten Wärmeleitfähigkeit λ lautet sie

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) = 0$$

An den Grenzen zwischen Materialien sind Temperatur und Normalkomponente der Wärmestromdichte stetig; zwischen Materialien in innigem Kontakt wird gemäß DIN EN ISO 10211 kein Übergangswiderstand angesetzt. Am Modellrand gelten drei Arten von Randbedingungen:

- **Konvektiver Rand (dritte Art)** mit Umgebungstemperatur θ_j und Oberflächenwiderstand $R_s = 1/h$: $q = h \cdot (\theta_j - \theta)$. Das ist der Regelfall an Innen- und Außenoberflächen.
- **Temperaturrand (erste Art)** mit vorgegebener Oberflächentemperatur, in WB2D durch $R_s = 0$ gekennzeichnet. Er wird für die Erdreichtemperatur nach DIN 4108 Beiblatt 2 verwendet.
- **Adiabater Rand** mit $q = 0$ an Schnittebenen (Randbedingung „Bauteilschnitt – Systemgrenze“, als Bruchlinie dargestellt) und Symmetrieachsen. Jeder Randabschnitt ohne Zuweisung ist ebenfalls adiat.

Stark belüftete Luftschichten und die dahinterliegende Schale bleiben nach DIN EN ISO 6946 unberücksichtigt. In WB2D wird eine als stark belüftet gekennzeichnete Luftschicht aus dem Rechengebiet genommen; die äußere Schale entfernt der Anwender aus der Geometrie, und an der inneren Begrenzung der Luftschicht wird die Randbedingung für stark belüftete Bauteile zugewiesen. Ruhende und schwach belüftete Luftschichten werden als Festkörper mit äquivalenter Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{eq} = d / R$ abgebildet (Kapitel 8).

4 Numerisches Verfahren

4.1 Geometrie und Vernetzung

Die Geometrie besteht aus Rechtecken und beliebigen Polygonen. Überlappen sich Bauteile, gilt das oben liegende, ohne Umsortieren also das zuletzt gezeichnete Bauteil. WB2D bildet aus allen Kanten einen planaren Kantengraphen, in dem Schnittpunkte als Knoten eingefügt und überdeckte Kantenstücke entfernt werden. Jeder Teilfläche wird das maßgebende Material zugeordnet, jedem äußeren Kantenstück die zugewiesene Randbedingung.

Das Netz besteht aus linearen Dreieckselementen. Die gewünschte Elementgröße s ergibt sich an jedem Punkt aus dem Abstand d_E zur nächsten Ecke und d_K zur nächsten Kante:

$$s = \min(s_{\max}; s_{\min} + g \cdot d_E; 2 \cdot s_{\min} + 1,2 \cdot g \cdot d_K)$$

Stufe	$s_{\min}$ [mm]	$s_{\max}$ [mm]	Gradierung g
grob	2	40	0,50
normal	1	20	0,35
fein	0,5	10	0,30

Aus einem gradierten Quadtree-Punktfeld wird eine Delaunay-Triangulierung erzeugt. Kanten der Geometrie, die in der Triangulierung nicht enthalten sind, werden durch wiederholtes Einfügen von Mittelpunkten erzwungen (höchstens 40 Durchläufe, in den Vorlagen genügen ein bis vier), bis jede Material- und Randkante aus Elementkanten besteht. Das Netz ist damit konform: Kein Element überdeckt eine Materialgrenze, und Randbedingungen wirken exakt auf den vorgegebenen Kanten. Schräge Kanten werden ohne Treppenstufen abgebildet.

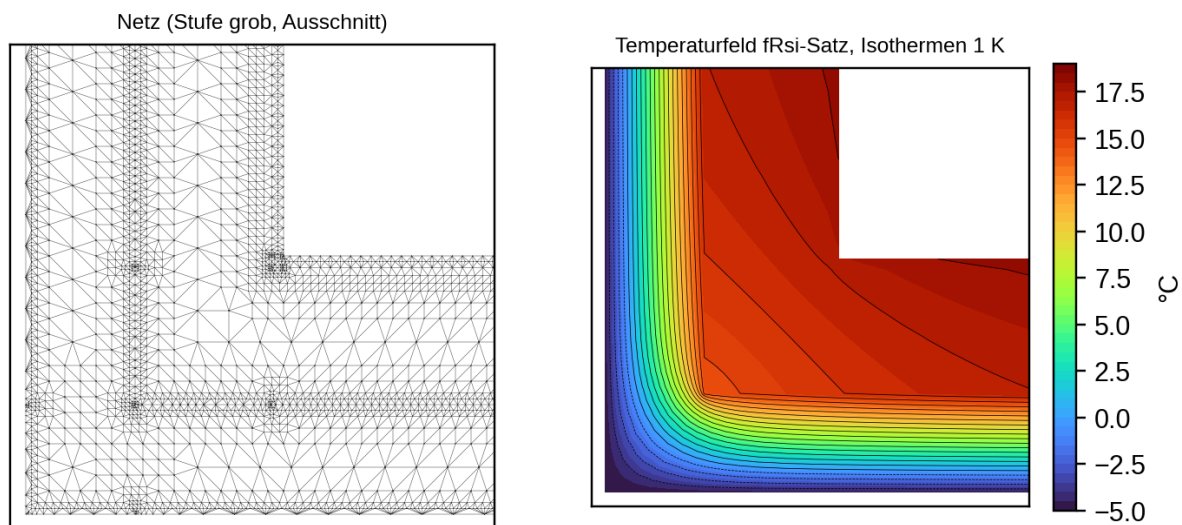


Bild 1 – Netz der Stufe grob und Temperaturfeld des f_{Rsi} -Satzes für die Vorlage „Außenecke mit WDVS“ (Ausschnitt um die Ecke). Das Netz verdichtet sich an Ecken und Materialgrenzen.

4.2 Finite-Elemente-Formulierung

Die Wärmeleitungsgleichung wird mit dem Galerkin-Verfahren und linearen Ansatzfunktionen (P1-Elemente) diskretisiert. Für ein Dreieck mit der Fläche A und den Gradienten ∇N_a der Ansatzfunktionen lautet die Elementsteifigkeitsmatrix

$$K_{ab} = \lambda \cdot A \cdot \nabla N_a \cdot \nabla N_b$$

Ein konvektiver Randabschnitt der Länge ℓ mit dem Wärmeübergangskoeffizienten $h = 1/R_s$ liefert den konsistenten Randbeitrag zur Matrix und zur rechten Seite

$$K_{11}^R = K_{22}^R = h \cdot \ell / 3, K_{12}^R = K_{21}^R = h \cdot \ell / 6$$

$$f_1^R = f_2^R = h \cdot \ell \cdot \theta_j / 2$$

Temperaturränder werden durch Elimination der betroffenen Knoten eingearbeitet. Das entstehende Gleichungssystem ist symmetrisch und positiv definit.

4.3 Gleichungslöser

Das System wird mit dem Verfahren der konjugierten Gradienten gelöst, vorkonditioniert mit einer unvollständigen Cholesky-Zerlegung IC(0). Die Iteration endet, wenn das relative Residuum 10^{-9} unterschreitet. Damit ist der Fehler der Gleichungslösung um Größenordnungen kleiner als der Diskretisierungsfehler. Der Löser prüft außerdem, ob Teilgebiete ohne Verbindung zu einer Randbedingung existieren, und meldet sie.

4.4 Wärmeströme

Der Wärmestrom über einen konvektiven Randabschnitt wird aus der gelösten Temperatur als $\Phi = h \cdot \ell \cdot (\theta_j - \theta_m)$ berechnet, mit θ_m als Mittelwert der beiden Knotentemperaturen. An Temperaturrändern ergibt sich der Wärmestrom aus den Knotenreaktionen des Gleichungssystems. Die Wärmeströme werden je Randbedingung summiert. Die Summe über alle Randbedingungen eines Satzes ist die Energiebilanz des Modells; sie liegt in den Validierungsfällen unter 10^{-7} W/m. Bezogen auf die halbe Summe der Beträge aller Wärmeströme sind das weniger als 10^{-8} , also weit weniger als das Bilanzkriterium von 10^{-4} nach DIN EN ISO 10211. Die Wärmeströme je Randbedingung werden im Ergebnis und im Protokoll ausgegeben, sodass die Bilanz nachvollzogen werden kann.

5 Randbedingungen

WB2D führt zwei getrennte Randbedingungssätze und löst beide im selben Netz. Die folgenden Werte sind in der Bibliothek hinterlegt und wurden mit der Randbedingungsbibliothek „DIN 4108 Beiblatt 2“ in flixo abgeglichen; alle Werte stimmen überein. In der flixo-Bibliothek sind einzelne Werte als Konvention festgelegt und nicht unmittelbar aus DIN EN ISO 6946 abgeleitet. So setzt sie für die stark belüftete Gaubenwand $R_{se} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ an, obwohl sich nach der Regel $R_{se} = R_{si}$ bei horizontalem Wärmestrom $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ergäbe. Im f_{Rsi} -Satz gilt für den unbeheizten Dachraum $R_{se} = 0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und für stark belüftete Außenflächen vereinfacht und auf der sicheren Seite $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Wer von diesen Konventionen abweichen will, passt die Werte in der Randbedingungsbibliothek an.

5.1 f_{Rsi} -Satz nach DIN 4108-2

Randbedingung	θ [°C]	R_s [m²·K/W]	Anwendung
innen – Wand, Decke, Boden	20	0,25	beheizte Räume
innen – Fensterbereich	20	0,13	Oberflächen am Fenster
unbeheizt – Wand, Decke, Boden	10	0,17	unbeheizte Räume
unbeheizt – Fensterbereich	10	0,13	Fenster im unbeheizten Raum
außen	–5	0,04	Außenluft
außen – unbeheizter Dachraum	–5	0,10	Oberste Geschossdecke zum Dachraum
außen – stark belüftet	–5	0,04	hinterlüftete Bekleidung
Erdreich – Bodentemperatur	10	0 (θ fest)	Erdreich nach Beiblatt 2
Erdreich vertikal	–	adiabat	Modellschnitt im Erdreich

5.2 Ψ -Satz nach DIN 4108 Beiblatt 2 und DIN EN ISO 6946

Randbedingung	θ [°C]	R_s [m²·K/W]	Anwendung
innen – Wärmestrom horizontal	20	0,13	Wände
innen – Wärmestrom aufwärts	20	0,10	Deckenunterseiten
innen – Wärmestrom abwärts	20	0,17	Fußböden
unbeheizt – Wärmestrom horizontal	2,5	0,13	unbeheizter Keller
unbeheizt – Wärmestrom abwärts	2,5	0,17	Kellerdeckenunterseite
außen	–5	0,04	Außenluft
außen – hinterlüftet / stark belüftet	–5	0,13	Vorhangsfassade, hinterlüftet
außen – Dach	–5	0,04	Dach ohne Hinterlüftung
außen – Dach stark belüftet	–5	0,10	Steildach, belüftet
außen – Gaubenwand stark belüftet	–5	0,10	Gaubenwand, belüftet
außen – unbeheizter Dachraum	0	0,10	Oberste Geschossdecke zum Dachraum
erdberührt < 1 m Tiefe	–5	0,04	Erdreich bis 1 m unter Gelände
Erdreich > 1 m / Bodentemperatur	5	0 (θ fest)	Erdreich nach Beiblatt 2

6 Auswertung des Temperaturfaktors f_{Rsi}

Der Temperaturfaktor ist nach DIN 4108-2 definiert als

$$f_{Rsi} = (\theta_{si,min} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

Die minimale Oberflächentemperatur $\theta_{si,min}$ ist die niedrigste Knotentemperatur auf den Randabschnitten einer Innen-Randbedingung; sie wird für jede zugewiesene Randbedingung der Kategorien „beheizt innen“ und „unbeheizt“ getrennt ermittelt. Da die Temperatur im P1-Element linear verläuft, liegt das Minimum stets in einem Knoten; eine Interpolation ist nicht erforderlich. WB2D gibt Wert und Lage von $\theta_{si,min}$ aus und markiert die Stelle in der Zeichnung.

Die Außentemperatur wird nach DIN 4108-2 fest mit $\theta_e = -5$ °C angesetzt, auch wenn das Detail nicht an Außenluft, sondern an Keller, Erdreich oder Dachraum grenzt. Die Temperaturen von Keller, Erdreich oder Dachraum gehen über die Randbedingungen in das Temperaturfeld ein, ändern aber den Bezug der Kennzahl nicht. Die Innentemperatur θ_i ist die Lufttemperatur der jeweiligen Innen-Randbedingung, im f_{Rsi} -Satz also 20 °C für beheizte Räume. Die Anforderung $f_{Rsi} \geq 0,70$ leitet sich aus dem Kriterium von

80 % relativer Luftfeuchte an der Oberfläche ab: Bei $\theta_i = 20\text{ °C}$, 50 % relativer Raumlufteuchte und $\theta_e = -5\text{ °C}$ ergibt sich eine kritische Oberflächentemperatur von $12,6\text{ °C}$, also $f_{Rsi} = (12,6 + 5)/25 = 0,704$, gerundet 0,70. Rechnerisch entspricht $f_{Rsi} = 0,70$ einer Oberflächentemperatur von $12,5\text{ °C}$. Maßgebend für den Nachweis ist die Randbedingung der Kategorie „beheizt innen“ mit dem kleinsten f_{Rsi} . Für Oberflächen in unbeheizten Räumen (Kategorie „unbeheizt“, $\theta = 10\text{ °C}$) wird ein Temperaturfaktor nur informativ ausgewiesen; er ist keine Nachweisgröße nach DIN 4108-2. Ist keine beheizte Innenfläche zugewiesen, zeigt WB2D stattdessen diesen Wert an und kennzeichnet ihn in Ergebnis und Protokoll als nur informativ; ein Nachweis ist damit nicht geführt.

Liegt $\theta_{si,min}$ auf den Innenflächen eines Ersatzmodells für Fenster oder Türen, beschreibt der Wert eine fiktive Rahmenoberfläche und nicht das reale Fenster. Für den Mindestwärmeschutz sind die opaken Anschlussflächen wie Laibung, Sturz und Brüstung zu bewerten; WB2D gibt die Lage von $\theta_{si,min}$ an, sodass sich das prüfen lässt. Bei Bedarf erhalten die Rahmenflächen im f_{Rsi} -Satz, nicht im Ψ -Satz, und erst nach dem Ableiten der Sätze eine eigene Innen-Randbedingung der Kategorie „unbeheizt“ mit gleichen Werten, damit sie nicht in die maßgebende Auswertung eingehen.

7 Auswertung von Ψ

Aus dem Ψ -Satz ergibt sich der Wärmestrom Φ über alle beheizten Innenoberflächen. Nach DIN EN ISO 10211 ist der thermische Leitwert

$$L^{2D} = \Phi / (\theta_i - \theta_e)$$

und der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient

$$\Psi = L^{2D} - \sum U_j \cdot l_j \cdot (\theta_i - \theta_j) / (\theta_i - \theta_e)$$

Die Summe läuft über die flankierenden Bauteile mit U-Wert U_j und Länge l_j . Die Längen werden im Außenmaßbezug nach DIN 4108 Beiblatt 2 und DIN V 18599-2 vom Ψ -Bezugspunkt bis zum Modellschnitt gemessen; WB2D ermittelt sie aus den gewählten Endpunkten. Der Faktor $(\theta_i - \theta_j)/(\theta_i - \theta_e)$ berücksichtigt Bauteile, die nicht an Außenluft grenzen; für Außenbauteile ist er 1. Diese Gewichtung ist die Konvention von DIN 4108 Beiblatt 2 für Details mit mehr als zwei Umgebungstemperaturen; DIN EN ISO 10211 sieht dafür allgemein Leitwerte zwischen je zwei Umgebungen vor. Als θ_e gilt die niedrigste Temperatur der zugewiesenen Randbedingungen der Kategorie „außen“ im Ψ -Satz; ist keine solche zugewiesen, gilt $\theta_e = -5\text{ °C}$. Als θ_i gilt die höchste Temperatur der zugewiesenen Randbedingungen der Kategorie „beheizt innen“, als Φ die Summe der Wärmeströme über diese Randbedingungen. Grenzt ein Detail ausschließlich an den unbeheizten Dachraum (Ψ -Randbedingung mit 0 °C , Kategorie „außen“), bezieht sich Ψ damit auf $\theta_e = 0\text{ °C}$; das ist bei der Übernahme in eine Energiebilanz zu beachten.

Die U-Werte der flankierenden Bauteile ermittelt der U-Schnitt nach DIN EN ISO 6946 aus der Schichtenfolge im Modell und den Übergangswiderständen des Ψ -Satzes, sodass Modell und Abzugsterm auf denselben Annahmen beruhen.

7.1 Mehrere Wärmebrücken in einem Modell

DIN EN ISO 10211 verlangt, dass die Schnittebenen eines Modells mindestens $d_{\min} = \max(1 \text{ m}; 3 \times \text{Dicke des flankierenden Bauteils})$ vom zentralen Element der Wärmebrücke entfernt liegen. Liegen zwei oder drei Wärmebrücken näher beieinander, zum Beispiel zwei Deckeneinbindungen mit weniger als 1 m lichtem Abstand oder Fenstersturz und Rollladenkasten, lässt sich zwischen ihnen keine Schnittebene legen. Sie werden dann gemeinsam in einem Modell berechnet, und der Ψ -Wert gilt für die Kombination. WB2D unterstützt dafür bis zu drei Bezugspunkte P1 bis P3 im selben Modell. Jedes flankierende Bauteil wird genau einmal erfasst: Randbauteile werden von ihrem Bezugspunkt bis zum Modellschnitt gemessen, das Bauteil zwischen zwei Wärmebrücken als Zwischenbauteil von Bezugspunkt zu Bezugspunkt. Mit einem Berechnungsbefehl entsteht eine FE-Lösung, aus der sich der normativ maßgebende Gesamtwert ergibt:

$$\Psi_{\text{ges}} = L^{2D} - \sum U_j \cdot l_j \cdot (\theta_i - \theta_j) / (\theta_i - \theta_e)$$

Weil die Wärmebrückenlinien eines 2D-Schnitts im Gebäude gleich lang sind, darf Ψ_{ges} entweder einer der Linien zugeordnet oder gleichmäßig auf alle n Linien verteilt werden. Beides ergibt denselben Wärmeverlust. Für die Verteilung gibt WB2D den Mittelwert aus:

$$\Psi_m = \Psi_{\text{ges}} / n$$

Zusätzlich werden Einzelwerte Ψ_i berechnet. Dazu ordnet WB2D die Wärmeströme der beheizten Innenoberfläche, die der Löser je Randkante mit ihrem Ort liefert, dem jeweils nächstgelegenen Bezugspunkt zu. Die Grenze ist damit die Mittelsenkrechte zwischen zwei Bezugspunkten; sie wird im Bild strichpunktiert gezeichnet. Die Abzugsterme $U_j \cdot l_j$ der Randbauteile gehören zu ihrem Bezugspunkt, die der Zwischenbauteile je zur Hälfte zu beiden. Es gilt

$$\Psi_i = \Phi_i / (\theta_i - \theta_e) - \sum U_j \cdot l_{j,i} \cdot (\theta_i - \theta_j) / (\theta_i - \theta_e) \quad \text{mit} \quad \sum \Psi_i = \Psi_{\text{ges}}$$

Die Einzelwerte sind eine Aufteilung des Gesamtwerts nach einer festen Regel und kein eigenes Normverfahren. Sie zeigen, welche der Wärmebrücken den größeren Anteil hat, ersetzen aber keine getrennte Berechnung mit ungestörten flankierenden Bauteilen. Den lichten Abstand der Wärmebrücken bestimmt WB2D aus den Konturrecken beider Bereiche in Richtung der Verbindungslinie der Bezugspunkte; bei weniger als 1 m weist das Ergebnis auf die gegenseitige Beeinflussung hin.

Zur Kontrolle wurden zwei Fälle gerechnet. Im ersten hat eine Außenwand (Kalksandstein 175 mm, EPS 140 mm) zwei gleiche Geschossdecken hinter durchlaufendem WDVS. Eine einzelne Deckeneinbindung ergibt $\Psi = 0,0020 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; bei 3 m lichtem Abstand liefert das gemeinsame Modell $\Psi_{\text{ges}} = 0,0041 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und in der Netzstufe fein $\Psi_1 = 0,0020$ und $\Psi_2 = 0,0021 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Weil Ψ hier nahe null liegt, fällt die Netzabhängigkeit der Aufteilung in der Stufe normal mit etwa $\pm 0,001 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ relativ stark ins Gewicht. Aussagekräftiger ist der zweite Fall mit einer durchbetonierten, 1,5 m auskragenden Balkonplatte von 200 mm Dicke durch dieselbe Wand, Bezugspunkt jeweils in Plattenmitte auf der Dämmeroberfläche.

Modell	Netz	Ψ_{ges}	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_m
eine Platte	normal / fein	0,8743 / 0,8738	-	-	-	-
zwei Platten, 3 m lichter Abstand	normal	1,7487	0,8734	0,8753	-	0,8743
zwei Platten, 3 m lichter Abstand	fein	1,7475	0,8743	0,8732	-	0,8738
zwei Platten, 0,6 m	normal	1,7354	0,8664	0,8690	-	0,8677

Modell	Netz	Ψ_{ges}	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_m
zwei Platten, 0,6 m	fein	1,7343	0,8647	0,8696	–	0,8671
zwei Platten, 0,3 m	fein	1,6892	0,8429	0,8463	–	0,8446
drei Platten, je 0,6 m	fein	2,5946	0,8652	0,8593	0,8701	0,8649

Ψ in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bei großem Abstand ergibt das gemeinsame Modell exakt die doppelte Einzelplatte, und die Aufteilung trifft den Einzelwert auf 0,1 %. Je näher die Platten zusammenrücken, desto kleiner wird Ψ_{ges} gegenüber der Summe der Einzelwerte (–0,8 % bei 0,6 m, –3,3 % bei 0,3 m), weil sich die Wärmeströme im Zwischenbauteil überlagern. Genau diese gegenseitige Beeinflussung erfasst nur die gemeinsame Berechnung. Die Summe der Einzelwerte ist in allen Fällen gleich Ψ_{ges} , und Ψ_{ges} ändert sich nicht, wenn die Bezugspunkte entlang der Wand verschoben werden (geprüft mit 0, 100 und 200 mm Versatz: jeweils 1,7354 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Die Aufteilung dagegen verschiebt sich dabei zwischen 0,81/0,93 und 0,92/0,81 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, weil zwischen beeinflussten Wärmebrücken keine ungestörte Zone liegt, in der die Teilung neutral wäre. Die Bezugspunkte sollten deshalb an gleichartigen Stellen liegen, dann ergeben gleiche Anschlüsse auch gleiche Einzelwerte.

8 Luftschichten nach DIN EN ISO 6946

Luftschichten werden durch ihren Wärmedurchlasswiderstand R beschrieben und im Modell als Festkörper mit $\lambda_{\text{eq}} = d / R$ gerechnet. Dicke d und Breite b werden aus dem Bauteil gelesen, die Wärmestromrichtung gibt der Anwender vor. Nach DIN EN ISO 6946 gilt eine Luftschicht als ruhend bei Öffnungen bis 500 mm^2 , als schwach belüftet bei mehr als 500 bis 1500 mm^2 und als stark belüftet bei mehr als 1500 mm^2 , jeweils je Meter Länge bei senkrechten und je Quadratmeter Fläche bei waagerechten Schichten. Für ruhende Schichten mit parallelen Begrenzungsflächen, $b \geq 10 \cdot d$, $d \leq 300$ mm und Emissionsgraden $\varepsilon \geq 0,8$ auf beiden Seiten gilt Tabelle 8 der Norm mit linearer Interpolation zwischen den Tabellenwerten; bei $d > 300$ mm gibt WB2D eine Warnung aus, weil solche Lufträume nach der Norm als unbeheizte Räume zu behandeln sind. Sind die Voraussetzungen für Tabelle 8 nicht erfüllt ($b < 10 \cdot d$ oder $\varepsilon < 0,8$), rechnet WB2D nach Anhang D mit

$$R = 1 / (h_a + h_r), \quad h_r = E \cdot h_{r0}, \quad E = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1), \quad h_{r0} = 5,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

Der konvektive Anteil beträgt $h_a = \max(1,25; 0,025/d)$ für horizontalen, $\max(1,95; 0,025/d)$ für aufwärts gerichteten und $\max(0,12 \cdot d^{-0,44}; 0,025/d)$ für abwärts gerichteten Wärmestrom, jeweils mit d in m. Mit $\varepsilon = 0,9$ reproduzieren diese Formeln die Werte von Tabelle 8. Für kleine Lufträume mit $b < 10 \cdot d$ wird der Strahlungsanteil nach Anhang D abgemindert:

$$R = 1 / (h_a + h_r), \quad h_r = h_{r0} / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 2 + 2 / (1 + \sqrt{(1 + d^2/b^2)} - d/b))$$

Schwach belüftete Luftschichten werden vereinfacht mit dem halben Widerstand der ruhenden Schicht angesetzt. Diese Regel stammt aus der Fassung von 1996; die aktuelle Fassung der Norm interpoliert stattdessen über die Öffnungsfläche A_v zwischen den Gesamtwerten des Bauteils mit ruhender und mit stark belüfteter Schicht, $R_T = (1500 - A_v)/1000 \cdot R_{T,u} + (A_v - 500)/1000 \cdot R_{T,v}$. Für Nachweise mit schwach belüfteten Schichten ist diese Abweichung zu beachten. Stark belüftete Schichten werden nicht modelliert (Kapitel 3).

9 Anforderungen der DIN EN ISO 10211 und ihre Umsetzung

Anforderung	Umsetzung in WB2D
Stationäre Wärmeleitung, λ je Material konstant	Galerkin-FEM mit P1-Elementen, λ je Teilfläche
Modellgrenzen: flankierende Bauteile mindestens 1 m beziehungsweise $3 \times$ Dicke, maßgebend der größere Wert; Schnittflächen adiabatisch	Hinweis in Oberfläche und Anleitung; Schnittflächen als Bauteilschnitt (adiabatisch, Bruchlinie) gekennzeichnet, unbelegte Ränder ebenfalls adiabatisch
Randbedingungen mit Umgebungstemperatur und Oberflächenwiderstand	Robin-Randbedingung mit konsistenter Randmatrix; Temperaturrand für Erdbereich
Netzprüfung: Wärmestrom bei halbiertem Netzweite weicht um weniger als 1 % ab	Zweite Rechnung mit $s_{\min}/2$ und $s_{\max}/2$; verglichen wird die Summe aller eintretenden Wärmeströme des Ψ -Satzes. In der Voreinstellung „Netz automatisch“ wird die Stufe so lange erhöht (normal $\rightarrow$ fein $\rightarrow$ sehr fein), bis die Prüfung eingehalten ist
Analytischer Validierungsfall (Abweichung $\leq 0,1$ K)	Analytischer Vergleich an einem Rechteck mit Temperaturrändern: max. $0,007$ K (Stufe grob), $0,002$ K (Stufe normal) (Abschnitt 10.2)
Validierungsfall 2 (Temperaturen $\pm 0,1$ K, Wärmestrom $\pm 0,1$ W/m)	Alle neun Punkte und Wärmestrom innerhalb der Toleranz (Abschnitt 10.1)
Ausgabe von Temperaturen, Wärmeströmen und Eingaben	Gespeicherter Bericht mit Geometrie (Rechtecke und Polygon-Eckpunkte), Materialien, Randbedingungen, Temperaturbildern beider Sätze, Wärmeströmen je Randbedingung und Netzprüfung

10 Validierung

10.1 DIN EN ISO 10211, Validierungsfall 2

Der Validierungsfall 2 der Norm ist ein zweidimensionaler Querschnitt aus vier Materialien mit einer Innen- und einer Außenrandbedingung. Die Norm gibt die Temperaturen an neun Punkten sowie den Wärmestrom vor und verlangt Abweichungen von höchstens $0,1$ K beziehungsweise $0,1$ W/m. Das Modell ist in WB2D als Vorlage hinterlegt.

Punkt (θ in $^{\circ}\text{C}$)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Φ [W/m]
Norm	7,1	0,8	7,9	6,3	0,8	16,4	16,3	16,8	18,3	9,5
WB2D grob	7,12	0,76	7,91	6,34	0,83	16,39	16,32	16,75	18,33	9,52
WB2D normal	7,08	0,76	7,91	6,29	0,83	16,40	16,33	16,76	18,33	9,50
WB2D fein	7,07	0,76	7,90	6,29	0,83	16,41	16,33	16,77	18,33	9,50

Alle Werte liegen in allen drei Netzstufen innerhalb der Toleranz; die größte Abweichung beträgt $0,05$ K bei den Temperaturen (Punkt H, Stufe grob) und $0,02$ W/m beim Wärmestrom. Die Energiebilanz ist in allen Stufen geschlossen.

10.2 Analytischer Vergleich

In Anlehnung an den Validierungsfall 1 der Norm wurde ein Rechteck von $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ mit $\lambda = 1\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ gerechnet, eine Kante auf $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, zwei Kanten auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine adiabate Symmetriekante. Für diesen Fall existiert eine Reihenlösung der Laplace-Gleichung. Der Vergleich an 28 Kontrollpunkten im Raster von $0,25\text{ m}$ ergibt eine größte Abweichung von $0,007\text{ K}$ in der Netzstufe grob und $0,002\text{ K}$ in der Stufe normal. Das liegt deutlich unter der Grenze von $0,1\text{ K}$, die DIN EN ISO 10211 für den analytischen Validierungsfall festlegt. Ob Lage und Anzahl der Kontrollpunkte exakt der Norm entsprechen, ist nicht Teil dieser Dokumentation; der Vergleich zeigt die Genauigkeit des Verfahrens an einer exakten Lösung.

10.3 Schräge Wand

Eine homogene Wand mit 300 mm Dicke und $\lambda = 0,5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, um 30° gedreht und als Polygon eingegeben, prüft die Verarbeitung schräger Kanten. Wärmestrom und Oberflächentemperatur stimmen mit der eindimensionalen Lösung überein (Randbedingungen $R_{\text{si}} = 0,13\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ und $R_{\text{se}} = 0,04\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, $\Delta\theta = 25\text{ K}$, Wandlänge 2 m : $\Phi = 64,935\text{ W/m}$, $\theta_{\text{si}} = 15,779\text{ }^{\circ}\text{C}$).

10.4 Netzkongruenz

Netzstufe	Knoten	f_{Rsi}	$\theta_{\text{si,min}}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$L^{2\text{D}}\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	$\Psi\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$
grob	7380	0,8930	17,326	0,77610	-0,0602
normal	23 150	0,8930	17,324	0,77602	-0,0603
fein	113 795	0,8930	17,324	0,77598	-0,0603

Für die Vorlage „Außenecke mit WDVS“ bleibt f_{Rsi} zwischen den Netzstufen auf vier Nachkommastellen gleich, $\theta_{\text{si,min}}$ ändert sich um $0,002\text{ K}$, $L^{2\text{D}}$ und Ψ um höchstens $1,2 \cdot 10^{-4}\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Die Netzprüfung nach DIN EN ISO 10211 ergibt in der Stufe normal eine Abweichung des Wärmestroms von $0,005\text{ \%}$ und damit weit weniger als die zulässigen $1\text{ \%}$.

10.5 Vergleich mit THERM und flixo

Zwei Details wurden in THERM 7.8 und flixo energy 8.2 mit identischer Geometrie, identischen Materialien und identischen Randbedingungen nachgerechnet. Die Geometrie wurde mit identischen Koordinaten als THMX-Datei erzeugt und in beide Programme eingelesen, die Randbedingungen wurden in beiden Programmen nach DIN 4108-2 und DIN 4108 Beiblatt 2 gesetzt.

Detail	Kennwert	WB2D	THERM	flixo
Außenecke mit WDVS	f_{Rsi}	0,893	0,892	0,893
	$L^{2\text{D}}\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	0,7760	0,7761	0,7763
	$\Psi\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	-0,060	-0,060	-0,060
Außenecke 135° (Erker)	f_{Rsi}	0,921	0,920	0,921
	$L^{2\text{D}}\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	0,7279	0,7281	0,7280
	$\Psi\text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$	-0,020	-0,020	-0,020

Die Abweichungen liegen bei höchstens $0,001$ im Temperaturfaktor und $0,0003\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ im thermischen Leitwert. Ψ stimmt in allen drei Programmen auf drei Nachkommastellen überein.

10.6 Online-Fassung, Windows-Programm und Offline-Fassung

Die drei Fassungen des Programms werden aus denselben Quelldateien erzeugt; Rechenkern, Randbedingungen, Auswertung und Berichtserzeugung sind in allen Fassungen identisch. Die Fassungen unterscheiden sich nur darin, woher die Hilfsbibliotheken kommen: Die Online-Fassung lädt pdf.js 3.11.174, docx 9.8.1 und Delaunator 5.0.1 beim ersten Gebrauch aus dem Netz, das Windows-Programm und die Offline-Fassung enthalten dieselben Versionen eingebettet. Das Windows-Programm beruht auf Electron 43 mit der Chromium-Laufzeit 150 und führt die Berechnung wie der Browser in einem Hintergrundprozess aus. Zur Kontrolle wurde der vollständige Durchlauf eines Bestandsprojekts mit sieben PDF-Plänen – Erkennung, 41 Anschlüsse, automatische Netzverfeinerung, Nachweistabelle und Word-Bericht – in allen Fassungen wiederholt; die Summe $\sum \Psi \cdot l$ stimmt auf alle ausgewiesenen Stellen überein, und dabei wurde keine Netzverbindung aufgebaut. Der eingebaute Selbsttest des Windows-Programms rechnet die Vorlage „Außenecke“ und liefert $f_{Rsi} = 0,893$ und $\Psi = -0,060 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, dieselben Werte wie Online-Fassung und Referenzrechnung.

11 Aus Bauplänen erzeugte Details

Das Modul Baupläne erzeugt Details aus Konstruktionsangaben mit denselben Randbedingungssätzen, die auch für von Hand gezeichnete Modelle gelten. Die flankierenden Bauteile sind 1,5 m lang und damit länger als der Mindestabstand nach DIN EN ISO 10211 für Bauteildicken bis 50 cm; die Schnittkanten sind adiabatisch. Bei der Bodenplatte wird das Erdreich vereinfacht als Block von 1,5 m Tiefe und 1,5 m Breite außerhalb der Wand mit fester Temperatur an der Unterkante und adiabatischen Seitenrändern angesetzt, wie es dem Randbedingungssatz nach DIN 4108 Beiblatt 2 entspricht; eine Berechnung nach DIN EN ISO 13370 mit größeren Erdreichabmessungen liefert andere Werte. Die U-Werte der flankierenden Bauteile werden aus den eingegebenen Schichten nach DIN EN ISO 6946 berechnet, für Kellerdecke und Bodenplatte mit $R_{si} = R_{se} = 0,17$ beziehungsweise $R_{se} = 0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Die Erkennung der Wärmebrücken und das Ablesen der Maße sind Heuristiken; die Verantwortung für Geometrie, Materialien und Randbedingungen des Nachweises bleibt beim Anwender, der jeden Vorschlag vor dem Anlegen prüft.

Bei Wänden ohne massive Tragschale (Holzrahmenbau) gilt die erste Holz- oder Plattenschicht als Tragschale: Die äußere Dämmung läuft vor der Deckenstirn durch, Rahmen und Innenschichten stehen auf der Rohdecke. Am Sockel über dem Keller beginnt die Rohdecke an der Tragschale der Kellerwand oder, wenn die Wand darüber weiter außen trägt, an deren Tragschale, sodass unter der Wand keine Hohlstelle entsteht; die Perimeterdämmung der Kellerwand deckt die Deckenstirn bis OK Rohdecke ab. Materialien, die aus der Legende des Plans übernommen wurden, sind mit den Bemessungswerten der Materialliste belegt (zum Beispiel Stahlbeton $\lambda = 2,3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, Nadelholz 0,13, Mineralwolle WLS 035, XPS WLS 035); enthält der Plan andere Wärmeleitfähigkeitsstufen, sind sie vor der Berechnung anzupassen.

11.1 Bestandsbauteile mit pauschalem U-Wert

Für Bestandsgebäude ohne Schichtangaben setzt der Bestandsmodus die pauschalen Wärmedurchgangskoeffizienten der Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand vom 8. Oktober 2020 (BANz AT 04.12.2020 B2) nach Baualtersklasse an. Diese Werte sind für die Energiebilanz des Bestands vorgesehen; DIN EN ISO 10211 verlangt für die Wärmebrückenberechnung dagegen die tatsächliche Schichtfolge. WB2D bildet den Pauschalwert deshalb als homogene Schicht in der gemessenen Bauteildicke mit $\lambda_{eq} = d / (1/U - R_{si} - R_{se})$ ab, sodass der eindimensionale Wärmestrom durch das Bauteil und damit der Abzugsterm $\sum U_j \cdot I_j$ dem Bilanzansatz entsprechen. Die zweidimensionale Verteilung weicht von der einer geschichteten Wand ab, weil die Lage von Tragschale und Putz unbekannt bleibt: Ein Bestandsbauteil mit hohem U-Wert erhält eine niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeit über die ganze Dicke, leitet also quer zur Fläche weniger als eine massive Schale und liefert an Ecken und Fensteranschlüssen tendenziell etwas günstigere Oberflächentemperaturen. Der Bericht weist die Bestandsbauteile mit Klasse, U-Wert und Quelle aus; wo die Schichtfolge bekannt wird, ist sie einzutragen.

Mit Außenmaßbezug entstehen an Sockel und Traufe bei gering gedämmten Bestandsbauteilen ausgeprägt negative Ψ -Werte, weil die eindimensionale Bilanz die geometrisch überlappenden Bauteilflächen doppelt zählt; die Summe $\sum \Psi \cdot I$ kann dann negativ werden. Das ist kein Rechenfehler, sondern Folge der Konvention, gilt aber nur zusammen mit denselben Außenmaßen in der Bilanz. Für den Nachweis der Mindestanforderung an f_{Rsi} ist der Bestandsmodus geeignet, wenn die tatsächliche Wand nicht schlechter leitet als die äquivalente Schicht; im Zweifel ist die Schichtfolge aufzunehmen.

11.2 Traufe und aus Grundrissen abgeleitete Anschlüsse

Der Generator für die Traufe bildet das Sparrendach als Band längs der Neigung auf der Außenwand ab: Die Wandschichten enden an der Dachunterseite, die Dachschichten liegen als Parallelogramme von der Stirn des Dachüberstands bis 1,5 m hinter der Wandinnenseite; Dachoberfläche und Untersicht des Überstands sind Außenflächen, die Dachschräge innerhalb der Wandinnenseite Innenfläche mit R_{si} für aufwärts gerichteten Wärmestrom. Der Ψ -Bezugspunkt liegt im Schnitt der Außenwandoberfläche mit der verlängerten Dachoberfläche, die Längen im Außenmaß längs der Wand und längs der Neigung. Die Vernetzung schräger Kanten erfordert, dass Polygonecken, die auf einer fremden Kante liegen, als Knoten dieser Kante erkannt werden; die Toleranz beträgt 1 μ m, damit auf 0,1 mm gerundete Koordinaten keine überlappenden Zwangskanten erzeugen.

Fehlen Schnitte, leitet WB2D Geschossdecken, Sockel, Dach, Sturz und Brüstung aus Grundrissen, Ansichten und Plantexten ab (Bedienungsanleitung). Geometrisch sind das dieselben Generatoren mit angenommener Rohdecke und den aus den Ansichten gelesenen Höhen; die Randbedingungen sind unverändert. Die Abweichung gegenüber einem Schnitt liegt in den Annahmen, nicht im Verfahren: Rohdeckendicke, Fußbodenaufbau, Rahmenlage und Dachaufbau sind Vorgaben, die vor der Abgabe zu bestätigen sind. Solche Anschlüsse bleiben deshalb in der Verlässlichkeit gelb, werden in Tabelle und Bericht gekennzeichnet und die zugrunde gelegten Höhen mit ihrer Quelle ausgewiesen.

12 Voreinstellungen des Systemreiters und ihre normative Begründung

Die Automatisierung von den Plänen bis zum Bericht ändert nichts an den Rechenvorschriften; sie legt lediglich fest, welche der zulässigen Einstellungen ohne Zutun gelten. WB2D wählt dabei jeweils die Einstellung, die innerhalb des Normrahmens das genaueste Ergebnis liefert, und lässt jede im Systemreiter umstellen. Für das Rechnetz verlangt DIN EN ISO 10211, dass sich die Summe der eintretenden Wärmeströme bei Verdopplung der Unterteilung um weniger als 1 % ändert; die Voreinstellung „automatisch“ prüft das für jede Rechnung und verfeinert das Netz stufenweise, bis es eingehalten ist, und übernimmt das Ergebnis des feinsten geprüften Netzes. Damit ist die Prüfung nicht nur dokumentiert, sondern Grundlage der Netzwahl. Für den Mindestwärmeschutz gilt $f_{Rsi} \geq 0,70$ nach DIN 4108-2 mit den dort festgelegten Randbedingungen; der Grenzwert ist einstellbar, um etwa strengere vertragliche Anforderungen zu prüfen, die Randbedingungen bleiben die der Norm.

Der Ψ -Wert wird mit Außenmaßbezug ermittelt, wie es DIN V 18599-2 und DIN 4108-6 für die Bilanz vorschreiben und wie es die Referenzwerte der DIN 4108 Beiblatt 2 verwenden; Innenmaßbezug ist als Alternative wählbar, führt aber zu anderen Ψ -Werten und ist nur zusammen mit innenmaßbezogenen Flächen zulässig. Anschlüsse an unbeheizte Räume und an das Erdreich werden mit den Temperaturen des Beiblatts 2 temperaturbewertet berechnet; ein so ermittelter Ψ -Wert enthält die Abminderung gegenüber der Außenluft bereits, weshalb der Temperatur-Korrekturfaktor F_x mit 1 voreingestellt ist. Wer stattdessen mit den F_x -Werten der DIN V 18599-2 arbeitet, stellt die Randbedingungen des Ψ -Satzes auf Außenlufttemperatur und trägt F_x ein. Das Erdreich wird mit dem vereinfachten Randbedingungssatz des Beiblatts 2 modelliert, weil die Referenzwerte und die Gleichwertigkeit auf dieser Konvention beruhen; der erweiterte Erdreichblock ist als Alternative vorhanden, seine Ergebnisse sind jedoch nicht mit den Referenzwerten vergleichbar.

Wärmeleitfähigkeiten aus Plantexten werden als Bemessungswerte nach DIN 4108-4 angesetzt: Eine Wärmeleitfähigkeitsstufe (WLS 032) ist bereits der Bemessungswert, ein Nennwert λ_D wird mit dem Faktor und dem Mindestzuschlag der Dämmstoffgruppe umgerechnet (nicht hygroskopisch 1,03 und 0,001, hygroskopisch 1,05 und 0,002, Ortschaum 1,10 und 0,003, ohne Messwerte 1,20 und 0,007 W/(m·K)) und auf 0,001 aufgerundet. Das ist die für den Nachweis vorgeschriebene Größe; der unveränderte Nennwert bleibt wählbar, etwa für Vergleichsrechnungen. Für die Materialien der Programmliste gelten die dort hinterlegten Bemessungswerte.

Der Wärmebrückenzuschlag wird in der Voreinstellung detailliert als $\Delta U_{WB} = \sum \Psi_i \cdot F_{x,i} \cdot l_i / A$ ermittelt, wie es GEG § 24 in Verbindung mit DIN V 18599-2 für die projektbezogene Berechnung nach DIN EN ISO 10211 mit den Randbedingungen des Beiblatts 2 zulässt; das ist genauer als jeder Pauschalwert und setzt voraus, dass alle Wärmebrücken der Hülle erfasst und ihre Längen im Außenmaß bestimmt sind. Das Korrekturverfahren des Beiblatts 2 ($\sum \Delta \Psi_i \cdot l_i / A + 0,05$ beziehungsweise $+ 0,03$) steht als Alternative bereit; es setzt für jeden Anschluss den Referenzwert des zugehörigen Planungsbeispiels voraus. Weil das Beiblatt die Referenzwerte je Planungsbeispiel und getrennt nach Ersatzmodell ($\Psi_{ref,Ers}$) und genauer Abmessung ($\Psi_{ref,det}$) angibt, trägt der Anwender die Werte der passenden Beispiele im Systemreiter oder je Anschluss ein; ohne Eintrag unterbleibt der Gleichwertigkeitsvergleich, ein automatischer Ansatz von Werten ohne Zuordnung zum Planungsbeispiel wäre nicht normgerecht.

Die Längen der Wärmebrücken stammen aus den Plänen: Decken-, Sockel- und Dachanschlüsse aus dem Außenwandumfang der Grundrisse, Ecken und Innenwandanschlüsse aus ihren Vorkommen je Grundriss und der Geschosshöhe aus den Schnitten, Stürze und Brüstungen aus den Öffnungsbreiten, Laibungen aus der Zahl der Öffnungen und der Fensterhöhe. Sie sind Außenmaße im Sinne der Bilanz

und in der Nachweistabelle je Anschluss mit ihrer Herleitung ausgewiesen und überschreibbar; Balkone und Anschlüsse ohne Grundrissbezug erhalten ihre Länge von Hand. Der Bericht enthält je Anschluss die Angaben, die DIN EN ISO 10211 für die Dokumentation verlangt: Geometrie mit Materialien und deren Wärmeleitfähigkeiten, Randbedingungen mit Temperaturen und Übergangswiderständen, Wärmeströme je Randbedingung, Netzangaben mit Netzprüfung, Temperaturfeld sowie die Ergebnisse f_{Rsi} , $\theta_{si,min}$, L_{2D} und Ψ mit den flankierenden Bauteilen.

13 Grenzen und Hinweise

- WB2D rechnet zweidimensional. Punktuelle Wärmebrücken (χ -Werte) und Details, deren Wärmestrom sich nicht in einer Schnittebene abbilden lässt, erfordern eine dreidimensionale Berechnung.
- Die Ergebnisse gelten für die eingegebenen Bemessungswerte. Die Materialbibliothek enthält typische Werte; für Nachweise sind die Werte der tatsächlich verwendeten Produkte einzusetzen.
- Für Ψ -Werte an unbeheizten Kellern verwendet der Ψ -Satz nach DIN 4108 Beiblatt 2 eine Kellertemperatur von 2,5 °C. Das entspricht rechnerisch einem Temperatur-Korrekturfaktor von $(20 - 2,5)/25 = 0,7$; der in der Energiebilanz verwendete F_x -Wert kann davon abweichen. Ein so ermittelter Ψ -Wert enthält die Abminderung bereits und darf nicht nochmals mit F_x multipliziert werden, sofern das Bilanzverfahren das nicht ausdrücklich vorsieht.
- Schwach belüftete Luftschichten werden vereinfacht mit dem halben Widerstand gerechnet (Kapitel 8).
- Die Ersatzmodelle für Fenster, Türen, Dachflächenfenster, Lichtkuppeln und Rollladenkästen entsprechen den Komponenten der flixo-Bibliothek zu DIN 4108 Beiblatt 2:2019 in der Standardkonfiguration.

14 Ergebnis

WB2D löst die stationäre Wärmeleitungsgleichung mit einem konformen Finite-Elemente-Verfahren, das Materialgrenzen und Randabschnitte exakt abbildet und dessen Gleichungslösung weit genauer ist als der Diskretisierungsfehler. Die Randbedingungen des f_{Rsi} -Satzes entsprechen DIN 4108-2, die des Ψ -Satzes DIN 4108 Beiblatt 2 und DIN EN ISO 6946; sie stimmen mit der Bibliothek von flixo überein, einschließlich der dort getroffenen Konventionen (Kapitel 5). Die Auswertung von f_{Rsi} und Ψ folgt den Definitionen in DIN 4108-2 und DIN EN ISO 10211 mit festem Bezug $\theta_e = -5$ °C für f_{Rsi} und Außenmaßbezug für Ψ .

Der Validierungsfall 2 der DIN EN ISO 10211 und der analytische Vergleich werden mit großer Reserve eingehalten, die Netzprüfung ist integriert, und Vergleichsrechnungen mit THERM und flixo stimmen in Ψ auf drei Nachkommastellen überein, in f_{Rsi} bis auf höchstens 0,001. Innerhalb der in Kapitel 11 genannten Grenzen erfüllt WB2D damit die Anforderungen der Normen an ein Verfahren zur Berechnung zweidimensionaler Wärmebrücken.