

Kopplung von dynamischer Wärmebrückenberechnung mit hygrothermischer Gebäudesimulation

Florian Antretter M. Eng.
Matthias Pazold M. Eng.
Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Radon
Dr.-Ing. Hartwig Künzel

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer)

Holzkirchen

Postfach 11 52
83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10
83626 Valley

Kopplung von dynamischer Wärmebrückenberechnung mit hygrothermischer Gebäudesimulation

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser zur Vollendung des 65. Lebensjahres gewidmet

Mit steigenden Anforderungen an die thermische Hülle von Gebäuden werden zu deren Design vermehrt dynamische Simulationsverfahren eingesetzt. Im Gegensatz zu Bilanzverfahren werden bei der dynamischen Simulation Wärmebrücken oft nicht berücksichtigt. Gerade eine Kombination von hygrothermischer Gebäudesimulation mit der Simulation von Wärmebrücken würde erlauben, den dynamischen Einfluss von Wärmebrücken auf den Energiebedarf des Gebäudes, aber auch ein mögliches Risiko für Schimmelpilzwachstum zu ermitteln.

Dieser Artikel stellt die Grundlagen der Simulationsverfahren für die dynamische hygrothermische Gebäudesimulation und die Wärmebrückenberechnung sowie die Kopplung beider Module vor. Nach der Validierung des Wärmebrückenmoduls, das die normgerechte Umsetzung der Wärmebrückenberechnung sicherstellt, wird für einen exemplarischen Anwendungsfall das gemeinsame Simulationswerkzeug angewendet. Wenn bei nebeneinander liegenden Wohnungen nachträglich eine der Wohnungen innen gedämmt wird, treten in der Praxis häufig Schimmelpilzprobleme in der nicht gedämmten Wohnung auf, in der vorher keine Schäden zu finden waren. Es wird gezeigt, wie sich die Temperaturverläufe in der Außenwand durch die teilweise Innendämmmaßnahme verändern. Der Einfluss von Raumlufttemperatur, Feuchteproduktion im Raum, Luftwechsel und Dämmstärke auf die relative Feuchte an der kältesten Stelle wird untersucht. Die Teilsanierung verursacht höhere und zum Teil kritische Feuchten an der Anschlussstelle zwischen Wohnungstrennwand und Außenwand.

Zusammenfassend wird eine hygrothermische Gebäudesimulation mit gekoppelter dreidimensionaler dynamischer Wärmebrückenberechnung vorgestellt. Das Wärmebrückenmodell wird erfolgreich validiert und die kombinierte Software für einen Praxisfall angewandt.

Coupling of dynamic thermal bridge and hygrothermal building simulation. *With increasing requirements on the thermal envelope of buildings dynamic building simulation is used more and more often for the design. Contrary to balance methods thermal bridges are often not accounted for in dynamic simulation. Especially the combination of a hygrothermal building simulation with the simulation of thermal bridges would allow assessing the dynamic influence of thermal bridges on the building energy demand, but also allow analyzing a possible risk for mould growth. This article presents the simulation methods for hygrothermal whole building simulation and thermal bridge simulation as well as their coupling. After validation of the thermal bridge module, which ensures a standard-conform implementation, an exemplary application case for the new simulation software is shown. Mould growth is sometimes found in the non-insulated and before damage free apartment, in cases where one of two side-by-side*

apartments is retrofitted with interior insulation. It is shown, how the temperature distribution in the exterior wall is changed due to the partial interior insulation measure. The influence of room temperature, moisture production, room ventilation and insulation thickness on the relative humidity on the coldest spot in the corner is analyzed. The partial retrofit causes higher and sometimes critical moisture conditions on the connection between exterior wall and party wall.

In summary a hygrothermal whole building simulation software with coupled three dimensional dynamic thermal bridge simulation is presented. The thermal bridge module is successfully validated and the combined software applied to a practical case.

1 Einleitung

Die Europäische Energy Performance of Buildings Directive EPBD [1] wurde 2003 eingeführt und hat das hauptsächliche Ziel, den Energiebedarf durch Gebäude zu reduzieren. Nicht erst seitdem steigen die Anforderungen an die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle. Mit steigendem Dämmstandard nimmt der Anteil des Einflusses von Wärmebrücken auf den gesamten Gebäudeenergiebedarf zu.

Um Wärmebrücken in der Berechnung zu berücksichtigen, wird in Monatsbilanzverfahren hauptsächlich auf lineare Wärmebrückenverlustkoeffizienten zurückgegriffen. Dies lässt sich auch als einfacher Ansatz in der dynamischen Gebäudesimulation durchführen. Das dynamische Verhalten der Wärmebrücken wird hiermit nicht mit abgebildet.

Martin [2] beschreibt zwei mögliche Wege, um Wärmebrücken in dynamischen Gebäudesimulationen zu berücksichtigen: erstens die direkte Lösung der zwei- und dreidimensionalen Wärmeleitung und zweitens ein äquivalenter Bauteilaufbau, der sich gleich dem dynamischen thermischen Verhalten der Wärmebrücke der Konstruktion verhält. Für die direkte Implementierung sehen die Autoren weiteren Bedarf bei der Lösungsgeschwindigkeit und der Einfachheit der Problemspezifikation in der Software. Bei der Verwendung äquivalenter Bauteilaufbauten ist die Genauigkeit der Ergebnisse etwas schlechter [3], [4].

Kosny [5] schließt schon 2002 durch Vergleich der Äquivalenzmethode mit detaillierten Berechnungen und Hot-Box-Messungen, dass für viele Aufbauten und Materialkonfigurationen, die dreidimensionale Wärmebrücken enthalten, ernsthafte Fehler bei der Energiebedarfsermittlung durch Gebäudesimulation entstehen, wenn dabei Bauteile nur eindimensional berechnet werden.

Ascione [6] vergleicht die Ergebnisse mit herkömmlichen Ansätzen in der Gebäudesimulation mit denen umfangreicherer 2D- und 3D-Modelle. Die Autoren beschreiben, dass bei Verwendung verschiedener Modellierungsansätze, von äquivalenten homogenen Bauteilen bis zur Modellierung der „echten“ Bauteilaufbauten in einer CFD-Software, bei der Berechnung des Energiebedarfs eines typischen Bürogebäudes für verschiedene italienische Städte die Ergebnisse um bis zu 20 % abweichen. Sie kommen zu dem Schluss, dass Programme zur dynamischen Gebäudesimulation ein Modul zur Berücksichtigung von Wärmebrücken gemäß DIN EN ISO 10211 [7] zur Verfügung stellen sollten.

Neben der Beurteilung des Einflusses von Wärmebrücken auf den Gebäudeenergiebedarf ermöglicht eine detaillierte Wärmebrückenberechnung die Bestimmung der Oberflächentemperaturen. In Verbindung mit Raumtemperatur und -feuchte lässt sich daraus ein mögliches Risiko für Schimmelpilzwachstum ableiten. Um realistische hygrische Raumluftverhältnisse zu simulieren, ist eine dynamische hygrothermische Gebäudesimulation notwendig. Vor diesem Hintergrund wurde in die bestehende Software WUFI® Plus ein Modul zur dynamischen Berechnung von zwei- und dreidimensionalen Wärmebrücken implementiert.

Nachfolgend werden die Grundlagen der Simulationsverfahren für die dynamische hygrothermische Gebäudesimulation und die Wärmebrückenberechnung sowie die Kopplung beider Module beschrieben. Anschließend werden Validierungsberechnungen durchgeführt, die eine normgerechte Umsetzung der Wärmebrückenberechnung sicherstellen. In einem Anwendungsbeispiel wird exemplarisch gezeigt, wie sich die neu entwickelte Software einsetzen lässt.

2 Hygrothermische Gebäudesimulation und dynamische Wärmebrückensimulation

2.1 Die hygrothermische Gebäudesimulation WUFI® Plus

WUFI® Plus ist eine Software zur hygrothermischen dynamischen Simulation eines gesamten Gebäudes basierend auf der hygrothermischen Bauteilsimulation von Künzel [8]. Der eindimensionale gegenseitig beeinflussende Wärme- und Feuchtetransport durch opake Bauteile wird berechnet. Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung werden als Transportmechanismen berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit und der latente Wärmetransport infolge Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel sind abhängig von den Feuchteverhältnissen im Bauteil. Der Feuchtetransport innerhalb eines Bauteils ergibt sich aus den Randbedingungen an den Oberflächen. Die resultierenden Differenzialgleichungen werden mit Hilfe der Finiten-Volumen-Methode diskretisiert. Das gekoppelte Wärme- und Feuchtetransportmodell WUFI® Pro wurde durch eine Vielzahl von Labor- und Feldversuchen validiert [8] und entspricht den Vorgaben der DIN EN 15026 [9].

Der Wärme- und Feuchtetransport über die Gebäudehülle beeinflusst das Klima im Gebäude. Deshalb werden die Bauteile zu einem gesamten Gebäudemodell, bestehend aus einer oder mehrerer Zonen mit einem jeweils zugeordnetem Klima, in WUFI® Plus gekoppelt [10], [11]. Die Zonen bilden somit einen oder mehrere Räume ab und werden

durch die Bauteile begrenzt. Das Innenklima dient wiederum als Randbedingung für eine Seite eines Bauteils. Pro Zeitschritt wird das Klima in einer Zone infolge der Zonen-Wärme- und Feuchtebilanz simuliert. Ein in der Gebäudesimulation üblicher Zeitschritt ist eine Stunde lang. Innere Wärme- und Feuchtequellen, unter anderem von anwesenden Personen, werden dabei ebenfalls berücksichtigt. So lange diese Bilanzen nicht ausgeglichen sind, wird die Temperatur und Feuchte pro Zeitschritt iterativ angepasst.

Das Außenklima kann ebenfalls als Zone betrachtet werden. Es wird auf Wetterdaten zugegriffen mit den erforderlichen Klimawerten für jeden Zeitschritt. Neben der Außentemperatur und der Luftfeuchtigkeit sollten die Wetterdaten auch Informationen über die direkte und diffuse Solarstrahlung sowie über Windgeschwindigkeit und -richtung und Regenmenge enthalten. Daraus wird der Schlagregen auf entsprechende Bauteile angesetzt. Die kurzwellige solare Einstrahlung sowie der langwellige Strahlungsaustausch an den Außenoberflächen der opaken Bauteile werden berücksichtigt. Transparente Bauteile (Fenster) lassen einen gewissen Teil der Strahlung durch, welche Innenraum und innere Oberflächen aufheizt.

Der Luftwechsel sorgt ebenfalls für einen Wärme- und Feuchtetransport. Der natürliche und mechanisch angetriebene Luftwechsel kann berücksichtigt werden.

Die Anlagentechnik sorgt dafür, in den Räumen Sollwerte einzuhalten, also die Innentemperatur oder auch die Feuchte innerhalb von Grenzwerten zu halten. Dem Gebäude können ideale Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs-, sowie Befeuchtungs- und Entfeuchtungsgeräte mit einer entsprechenden maximalen Leistungsfähigkeit hinzugefügt werden. Würde das Innenklima die eingegebenen Sollgrenzen über- bzw. unterschreiten, wird der notwendige Bedarf berechnet, um die Sollwerte einzuhalten. Mit einer idealen Heizung wird somit z. B. die Heizleistung pro Zeitschritt berechnet, welche notwendig ist, um eine Solltemperatur von 20 °C nicht zu unterschreiten.

Ergebnisse von WUFI® Plus wurden mit denen anderer Gebäudesimulationssoftware, Messungen und Standards (u. a. [12]) verglichen. Die Validierung der energetischen und hygrischen Simulation ist beschrieben in [13].

2.2 Die dynamische Simulation von dreidimensionalen Wärmebrücken

Es gibt Bereiche der thermischen Gebäudehülle, welche mit der eindimensionalen Betrachtung nicht weiter untersucht werden können, sondern bei denen der zwei- oder dreidimensionale Zustand betrachtet werden muss. Um solche Bereiche ebenfalls mit WUFI® Plus analysieren zu können, werden sogenannte 3D-Objekte dem Gebäudemodell hinzugefügt. Mit diesen ist es möglich, 2D- oder 3D-Wärmebrücken sowie weitere Spezialfälle, z. B. den transienten Wärmetransport zwischen Raum und Erdreich zu simulieren. Geometrische und strukturelle Wärmebrücken sind bei so gut wie jedem Gebäude vorhanden. Die Transmissionswärmeverluste in stationären Berechnungsverfahren werden mit linearen oder punktförmigen Verlustkoeffizienten berücksichtigt. In [14], dem Standard zur Berechnung der Norm-Heizlast, sind nur lineare Wärmebrücken enthalten. Die große Vielfalt unterschiedlich ausgebildeter Wärmebrücken und deren komplexer Berech-

nung, im Vergleich zur eindimensionalen Berechnung, ist der Grund für die oftmalige Vernachlässigung von Wärmebrücken in der energetischen Gebäudesimulation. Daher wurde ein Wärmebrückenmodul mit einfacher Eingabe und dennoch angemessener Berechnungs-Genauigkeit für WUFI® Plus entwickelt.

Für die Berechnung der 3D-Objekte wird die Finite-Volumen-Methode von Eymard [15] angewendet. Basierend auf dem thermodynamischen Gesetz der Energieerhaltung und der physikalischen Interpretation des Wärmestroms und der Wärmespeicherung ist das Modell geeignet für die Simulation der Wärmebrücken. Mit dieser Methode werden der dreidimensionale Raum in kleine Kontrollvolumen aufgeteilt und mittels der Lösung von Integralen durch numerische Methoden der Wärmestrom bestimmt.

Die Eingabe der Geometrie einer Wärmebrücke erfolgt durch Festlegung sämtlicher Grenzebenen zwischen unterschiedlichen Materialien in einem kartesischen Koordinatensystem. Materialdaten für die einzelnen Schichten können aus der WUFI® Datenbank ausgewählt oder vom Anwender ergänzt werden. Die Zuordnung eines Materials einer Schicht erfolgt in der Schnittdarstellung, indem zuerst das Material und folgend die Schicht ausgewählt werden. Danach wird die definierte Schicht im 3D-Modell visualisiert (Bild 1, rechte Seite). Ergänzend können die Bedingungen an den Oberflächen für die Wärmebrücke definiert werden. Dafür stehen alle Randbedingungen des Gebäudemodells, also die definierten Innen-Zonen, das Außenklima, und optional eingegebene Klimata zur Verfügung. Ferner können einer Wärmebrücke ebenfalls die äußeren Randbe-

dingungen eines bestimmten Bauteils mit entsprechender Orientierung und Neigung zugeordnet werden. Das hat zur Folge, dass die Solarstrahlung auf die Wärmebrücke bzw. auf die äußere Schicht angesetzt wird. Neben simulierten Zonen, für die das Innenklima iterativ berechnet wird, gibt es angrenzende Zonen mit vorab festgelegtem Klima. Diese können ebenfalls auf Oberflächen angesetzt werden. Standardmäßig sind adiabate Randbedingungen eingestellt, dort findet kein Wärmeaustausch statt. Die Diskretisierung in kleine Kontroll-Volumen ist automatisiert. Der Nutzer kann zwischen einem groben, mittleren oder feinen Gitternetz wählen, es werden dann entsprechend mehr oder weniger Kontroll-Volumen erzeugt. Abhängig von der Geometrie der Wärmebrücke kann weiterführend die Unterteilung der Volumen ausgewählt werden. Zur Auswahl steht die expandierende, gleiche oder kontrahierende Unterteilung. An kritischen Stellen kann somit das Gitternetz verfeinert werden. In Bild 1 ist das generierte Gitternetz einer Deckenplatte mit auskragendem Balkon, links unten, dargestellt.

Die räumliche Aufteilung und folgend die Anzahl der Kontroll-Volumen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit und gleichzeitig auf die Rechenzeit. Ein feineres Netz sollte an Stellen gewählt werden, an denen hohe Temperaturgradienten oder schnell variierende Randbedingungen erwartet werden. Ein grobes Netz genügt in Richtung adiabater Randbedingungen zur Reduzierung der Rechenzeit.

Eine große Anzahl von Kontroll-Volumen und mehrere solcher 3D-Objekte in einem Gebäudemodell führen zu Speicher- und Rechenzeit-Problemen. Ein impliziter

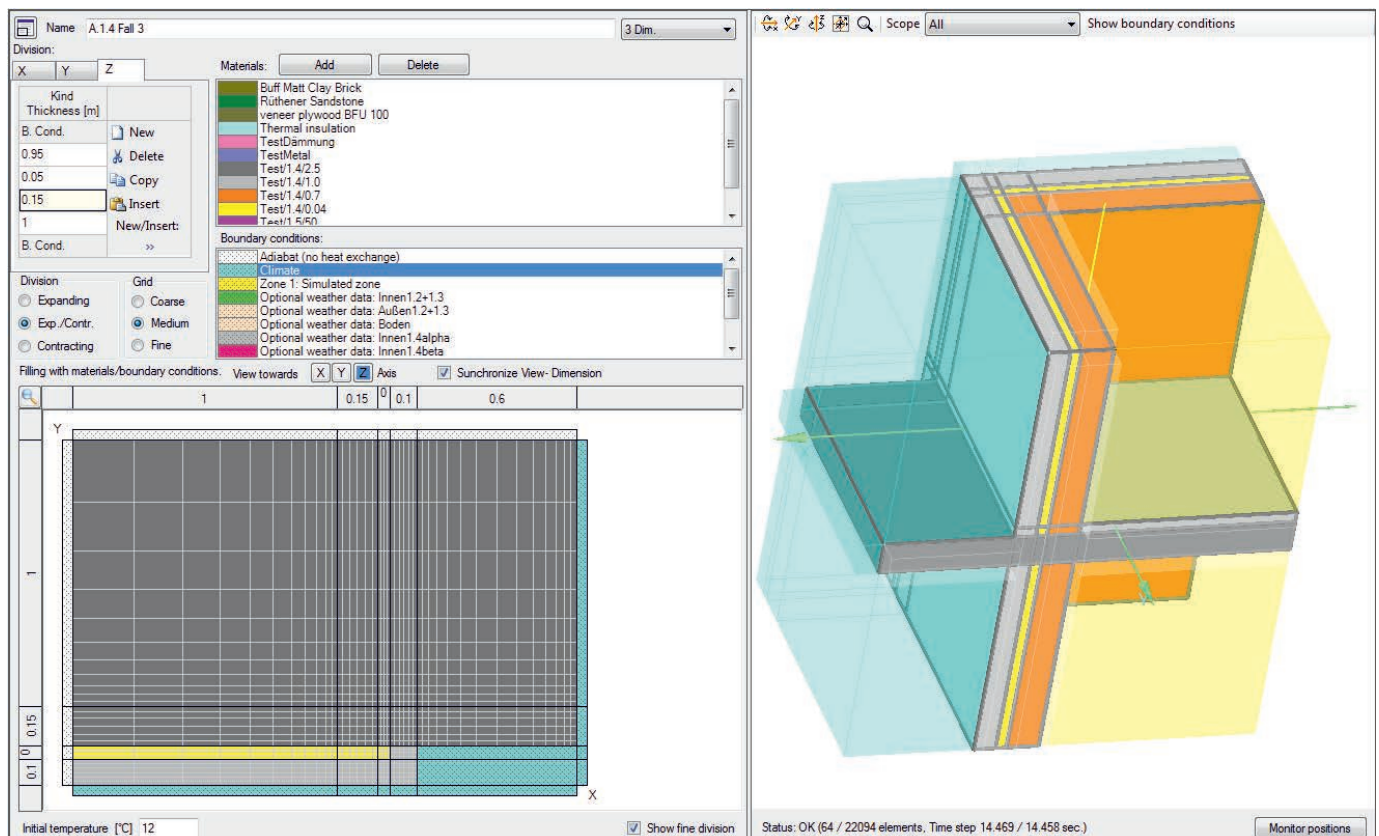


Bild 1. Bildschirmfoto der Eingabe eines 3D-Objektes in WUFI® Plus mit automatisch erzeugtem Gitternetz der Deckenplatte

Fig. 1. Screenshot of the edition of a 3D object in WUFI® Plus software; mesh generated for concrete ceiling and balcony

Lösungsalgorithmus erfordert die Erstellung einer $N \times N$ großen linearen Gleichungsmatrix, wobei N für die Anzahl der Kontroll-Volumen steht. Diese Anzahl kann rapide ansteigen. Ist die Wärmebrücke mit 50 Elementen in jeder Richtung diskretisiert, ergeben sich 2.500 Elemente für eine 2D-Berechnung und 125.000 Elemente für ein 3D-Objekt. Mit der Verwendung des Standard-Datentyps *double* für Gleitkommazahlen (8 Bytes pro Kontrollvolumen) ergibt sich ein Arbeitsspeicherbedarf für die Matrix einer 2D-Berechnung von 47,7 MB. 3D-Objekte mit 50 definierten Elementen in jede Richtung benötigen für die Matrix 116,5 GB und damit deutlich mehr Arbeitsspeicherplatz, als bei gewöhnlichen PC vorhanden ist. Das explizite Euler-Verfahren wird zur Lösung des Temperaturfeldes angewendet. Das Verfahren erfordert eine Verkürzung des Zeitschritts, um numerisch stabil zu bleiben. Werden bei einer Wärmebrücke Materialien mit hoher thermischer Leitfähigkeit eingesetzt, wie z. B. Metall, kann dies zu Problemen führen. In solchen Fällen ist, zumindest für die zweidimensionale Berechnung, das implizite Verfahren die bessere Lösung.

2.3 Kopplung von dynamischer Wärmebrücken- und Gebäudesimulation

Ist das Gebäudemodell erstellt und sind die 3D-Objekte definiert, kann die Simulation gestartet werden. Die Kopplung der 3D-Objekte mit dem Gebäudemodell erfolgt über die zuvor beschriebene Zuordnung der Randbedingungen. Mit jedem Zeitschritt werden diese Randbedingungen an das 3D-Objekt übergeben. Für den Start des ersten Zeit-

schritts werden Initialisierungswerte oder Sollwerteinstellungen angenommen. Folgend wird der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport über die Bauteile und der Wärmetransport über die 3D-Objekte berechnet. Deren Ergebnisse fließen in die Wärme- und Feuchtebilanzen der Zonen mit ein, welche folgend geprüft werden. Solange diese nicht ausgeglichen sind, werden die Innentemperaturen und -feuchten angepasst und die Berechnung des Zeitschritts mit den neuen angepassten Randbedingungen wiederholt.

Die maximal anwendbare Zeitschrittweite für ein 3D-Objekt ist gewöhnlich viel kürzer als die Standard-Zeitschrittweite (eine Stunde) für das Gebäude. Daher werden die Wärmebrücken mehrfach mit kleineren Zwischen-Zeitschritten berechnet. Ist die Iteration eines Zeitschritts abgeschlossen, wird das Temperaturfeld des 3D-Objektes für den folgenden Zeitschritt zur Initialisierung gespeichert. Der Wärmeaustausch über die 3D-Objekte wird bei den Wärmebilanzen simulierter Zonen berücksichtigt und hat einen direkten Einfluss auf das Innenraumklima, den Heizwärmebedarf, Kühlenergiebedarf und weitere Simulationsgrößen. Das Temperaturfeld eines 3D-Objektes kann während der Simulation für jede Schnittebene fortlaufend dargestellt werden (Bild 2).

3 Validierung der Wärmebrückenberechnung

3.1 Validierung nach DIN EN ISO 10211

Das neu entwickelte Modell für die Berechnung der 3D-Objekte wurde mit Hilfe der Norm DIN EN ISO 10211 [7] validiert, welche Informationen und detaillierte Berech-

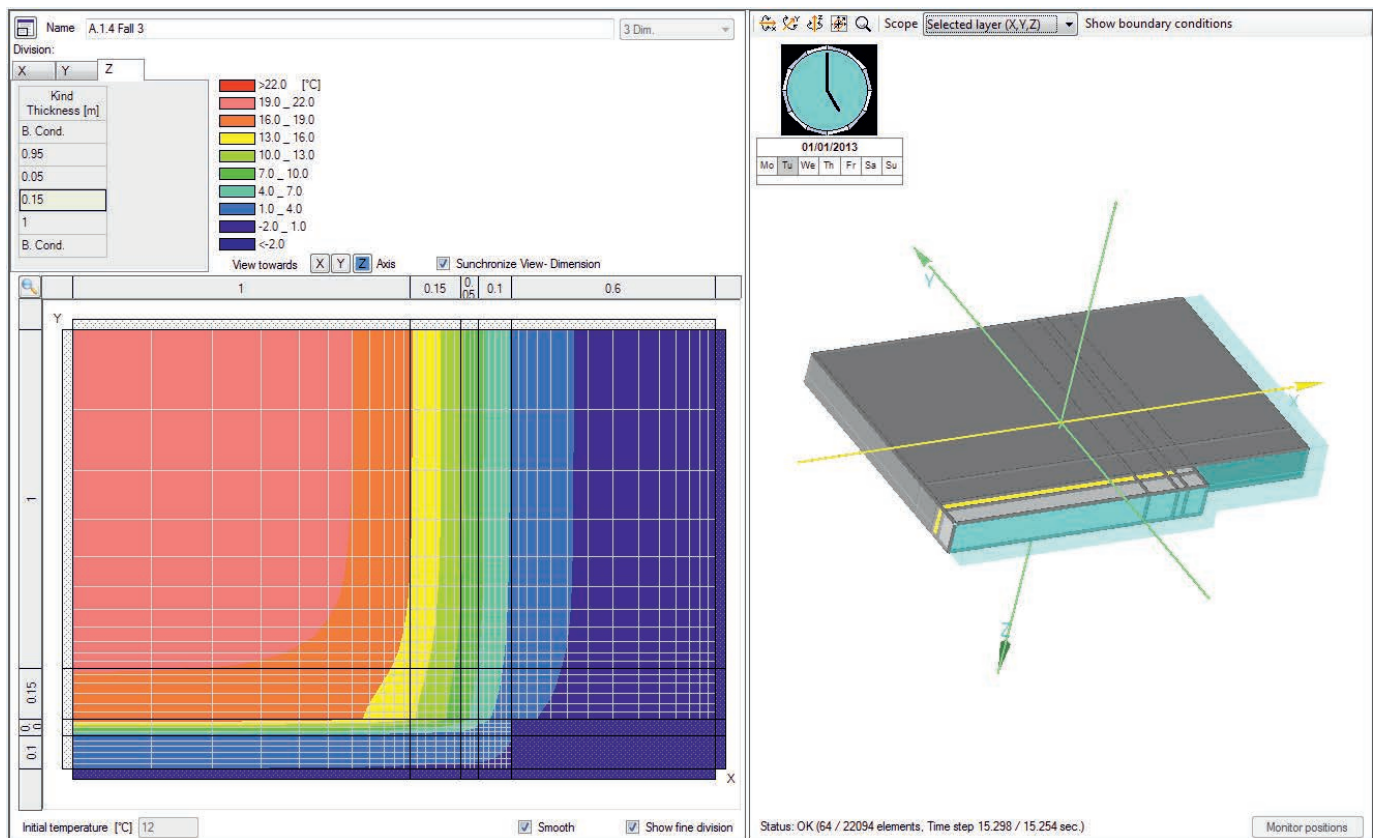


Bild 2. Bildschirmfoto von WUFI® Plus der Visualisierung des Temperaturfeldes in einer Schnittebene eines 3D-Objektes während der laufenden Simulation

Fig. 2. Screenshot of the temperature distribution in 3D objects during calculation in WUFI® Plus software

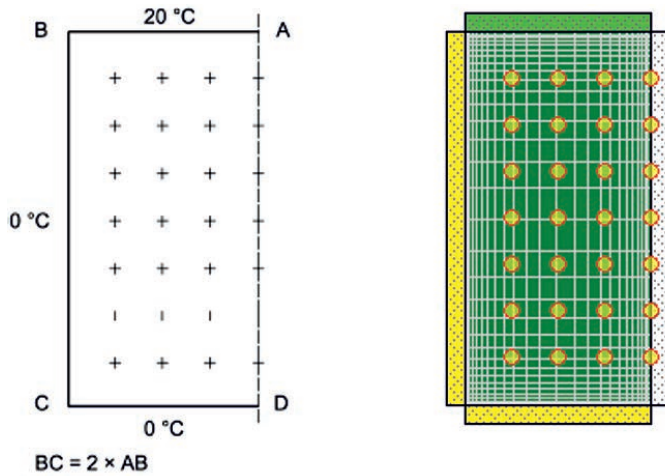


Bild 3. Prüfreferenzfall 1 der DIN EN ISO 10211 [7] und dessen Umsetzung als 3D-Objekt in WUFI® Plus
Fig. 3. Validation Case 1 of DIN EN ISO 10211 [7] and its implementation as 3D object in WUFI® Plus

nungen der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen von Wärmebrücken enthält. Spezifiziert sind zweidimensionale und dreidimensionale Modelle von Wärmebrücken zur Berechnung des Wärmeübergangs und der niedrigsten Oberflächentemperatur für die Risikoanalyse (Kondensation, Schimmelpilzwachstum).

Im Anhang A der Norm sind Prüfreferenzfälle zur Validierung von Simulationsmodellen gegeben, darunter zwei zweidimensionale und zwei dreidimensionale Fälle. Ein Simulationsmodell arbeitet nach Norm, wenn die Simulationsergebnisse innerhalb bestimmter Genauigkeitsgrenzen liegen.

Die Validierungsfälle sind stationäre Berechnungen und mit WUFI® Plus durchführbar. Dazu wurde die jeweilige Geometrie mit den festgelegten Randbedingungen eingegeben. Die Simulation wird durchgeführt, bis der stationäre Zustand erreicht ist, d. h. bis sich das Temperaturfeld auf Grund der konstanten Randbedingungen nicht mehr ändert.

In Bild 3 ist der erste Prüfreferenzfall und dessen Modellierung in WUFI® Plus dargestellt. Es ist ein zweidimensionaler Schnitt durch eine halbe quadratische Säule mit bekannten Oberflächentemperaturen. Die Temperaturen an den eingezeichneten Stellen bzw. Gitternetzknotten können analytisch ermittelt werden. Sie sind in der Norm gegeben und in Tabelle 1 den mit WUFI® Plus berechneten

Tabelle 2. Abweichungen in [°C], Referenzfall 1
Table 2. Differences in [°C], case 1

Differenz	Differenz	Differenz	Differenz
0,03	0,03	0,03	0,02
0,03	0,04	0,01	0,01
0,01	0,00	0,00	0,05
0,03	0,06	0,03	0,00
0,04	0,01	0,02	0,01
0,04	0,04	0,03	0,01
0,04	0,03	0,02	0,01

Werten gegenübergestellt. Wie Tabelle 2 zeigt, liegen alle Temperaturwerte innerhalb der geforderten Genauigkeit von 0,1 K.

Der nächste zweidimensionale Referenzfall der Norm und dessen Umsetzung sind in Bild 4 gezeigt. Es stellt eine Aluminium verkleidete Dämmung in Verbindung mit Beton und Holz dar. Die Ergebnisse, präsentiert in Tabelle 3, liegen alle in der geforderten Genauigkeit von 0,1 K für die Temperaturen. Der Gesamtwärmestrom ist in der Norm gegeben mit 9,500 W/m. WUFI® Plus berechnet hierfür 9,461 W/m. Mit einem Unterschied von 0,039 W/m liegt auch hier die Software innerhalb der geforderten maximalen Abweichung von 0,1 W/m.

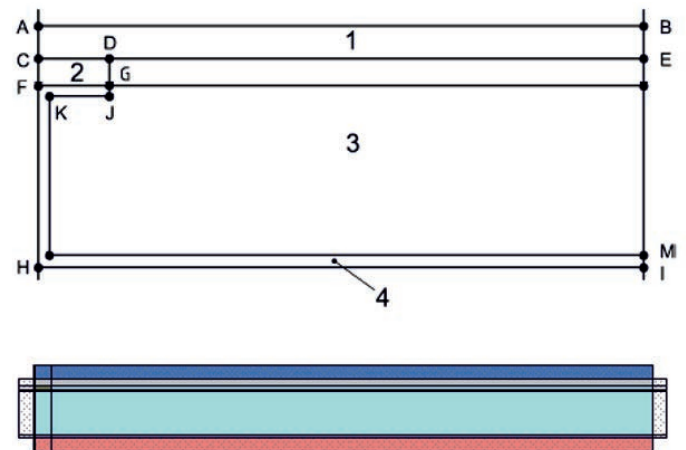


Bild 4. Prüfreferenzfall 2 der DIN EN ISO 10211 [7] und dessen Modellierung als 3D-Objekt in WUFI® Plus
Fig. 4. Validation Case 2 of DIN EN ISO 10211 [7] and its implementation as 3D object in WUFI® Plus

Tabelle 1. Temperaturen in [°C], Referenzfall 1
Table 1. Temperature results in [°C], case 1

WUFI® ISO 10211	WUFI® ISO 10211	WUFI® ISO 10211	WUFI® ISO 10211	Erfüllt
9,67 9,70	13,37 13,4	14,73 14,7	15,08 15,1	
5,27 5,30	8,64 8,60	10,31 10,3	10,81 10,8	
3,19 3,20	5,60 5,60	7,00 7,00	7,45 7,50	
2,03 2,00	3,66 3,60	4,67 4,70	5,00 5,00	
1,26 1,30	2,31 2,30	2,98 3,00	3,21 3,20	
0,74 0,80	1,36 1,40	1,77 1,80	1,91 1,90	
0,34 0,30	0,63 0,60	0,82 0,80	0,89 0,90	

Tabelle 3. Temperaturergebnisse in [°C], Prüfreferenzfall 2
Table 3. Temperature results in [°C], case 2

WUFI® Ergebnis	ISO 10211	Differenz	Erfüllt
7,05	7,10	0,05	j
0,76	0,80	0,04	j
7,88	7,80	0,02	j
6,26	6,30	0,04	j
0,83	0,80	0,03	j
16,42	16,40	0,02	j
16,35	16,30	0,05	j
16,78	16,80	0,02	j
18,34	18,30	0,04	j

Es folgt ein Referenzfall zur dreidimensionalen Wärmebrücken-Validierung. Es handelt sich um ein Gebäude mit auskragendem Balkon (Bild 5). Die Temperaturen an den beiden kritischen Ecken liegen mit WUFI® Plus berechnet innerhalb der geforderten maximalen Abweichung von 0,1 K (Tabelle 4).

In der DIN EN ISO 10211 [7] werden ebenfalls Wärmeströme zwischen dem oberen und unterem Raum und zwischen den Räumen und dem Außenklima aufgeführt. Für deren Ermittlung werden die thermischen Leitwerte ([7] Tabelle A.5) und die jeweilige Temperaturdifferenz herangezogen. Die Temperatur-Randbedingung im Raum Alpha, unterhalb der Geschossdecke (Bild 5), beträgt 20 °C, im Raum Beta, dem darüber liegendem Raum, 15 °C und für das Außenklima Gamma 0 °C. Folglich ist ein Wärmestrom von jedem Raum zum Außenklima und vom Raum Alpha zum Raum Beta zu erwarten. Mit Gleichung A.5 der Norm [7] wird der Wärmestrom vom Raum Alpha zum Raum Beta berechnet und nicht, wie in den folgenden Gleichungen A.8 und A.9 der Norm [7] angenommen, der Wärmestrom vom Raum Beta zum Raum Alpha. Das Vor-

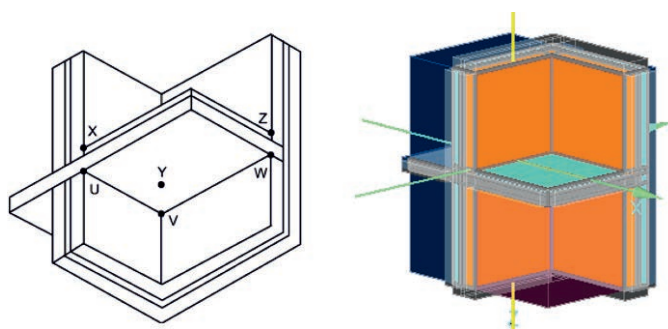


Bild 5. Prüfreferenzfall 3 der DIN EN ISO 10211 [7] und dessen Modellierung als 3D-Objekt in WUFI® Plus
Fig. 5. Validation case 3 of DIN EN ISO 10211 [7] and its implementation as 3D object in WUFI® Plus

Tabelle 4. Temperaturergebnisse in [°C], Prüfreferenzfall 3
Table 4. Temperature results in [°C], case 2

WUFI® Ergebnis	ISO 10211	Differenz	Erfüllt
11,39	11,32	0,07	j
11,02	11,11	0,09	j

Tabelle 5. Wärmeströme in [W], Prüfreferenzfall 3
Table 5. Heatflow in [W], case 3

	Außenklima	Raum Alpha	Raum Beta
WUFI® Plus	59,80713	45,97178	13,83534
ISO 10211	59,98000	46,09000	13,89000
1 % von ISO	0,59980	0,46090	0,13890
Differenz	0,17287	0,11822	0,05466

zeichen ist entsprechend anzupassen. Des Weiteren beträgt der resultierende Wärmestrom von innen nach außen (Gleichung A.7 der Norm [7]) 24,36 W + 35,62 W = 59,98 W und nicht wie in der Norm gegeben 58,98 W. Es handelt sich hier wohl um einen Rechenfehler. Die mit WUFI® Plus simulierten Wärmeströme sind in Tabelle 5 aufgelistet und den korrigierten Werten der Norm gegenübergestellt. Sie liegen unterhalb der geforderten maximalen Abweichung von 1,0 %.

Es folgt der letzte Referenzfall 4, eine dreidimensionale Wärmebrücke, bei der ein Eisenstab eine Dämmschicht durchdringt (siehe Bild 6). Zwischen zu validierendem Verfahren und Wert der Norm darf die Differenz der niedrigsten Temperatur an der Innenoberfläche 0,005 K nicht überschreiten. Für den Wärmestrom wird eine maximale Abweichung von 1 % angegeben. Resultierende Werte sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgelistet, WUFI® Plus erfüllt auch diese Kriterien.

Es wurde gezeigt, dass das an WUFI® Plus gekoppelte dynamische Wärmebrückenmodul für die Prüfreferenzfälle stets innerhalb der geforderten Genauigkeit der DIN EN ISO 10211 [7] liegt und somit als normgerechtes Verfahren einzustufen ist.

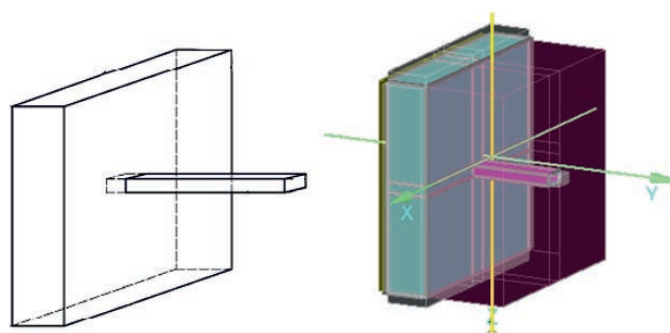


Bild 6. Prüfreferenzfall 4 der DIN EN ISO 10211 [7] und dessen Modellierung als 3D-Objekt in WUFI® Plus
Fig. 6. Validation case 4 of DIN EN ISO 10211 [7] and its implementation as 3D object in WUFI® Plus

Tabelle 6. Temperaturergebnisse in [°C], Prüfreferenzfall 4
Table 6. Temperature results in [°C], case 4

WUFI® Ergebnis	ISO 10211	Differenz	Erfüllt
0,807169	0,805	0,002169	j

Tabelle 7. Wärmeströme in [W], Prüfreferenzfall 4
Table 7. Heatflow in [W], case 4

WUFI® Ergebnis	ISO 10211	Differenz	1 % der ISO
0,5375	0,5400	0,0025	0,0054

3.2 Cross-Validierung mit ZUB Argos® und dem Wärmebrückenatlas

Für den direkten Vergleich zwischen dem neu entwickelten dynamischen Wärmebrückenmodul in WUFI® Plus und bestehender etablierter Software wurde das Programm ZUB Argos® 2012 [16] und der Wärmebrückenatlas [17], [18] in der digitalen Version 1.2.5.3 [19] herangezogen. Exemplarisch wurden zwei Wärmebrücken aus dem Wärmebrückenatlas simuliert, die Ergebnisse sind im Folgenden aufgezeichnet.

Das erste stationär simulierte Beispiel ist eine zweidimensionale Mauerecke. Das 36,5 cm dicke Mauerwerk mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,21 \text{ W/(m·K)}$ ist außen mit Kalkzementputz ($\lambda = 0,87 \text{ W/(m·K)}$) und innen mit Gipsputz ($\lambda = 0,35 \text{ W/(m·K)}$) verputzt, wie in Bild 7 dargestellt. Als Randbedingung wird außen -5°C und $0,04 \text{ W/(m·K)}$ als Wärmeübergangswiderstand angesetzt. Die Innentemperatur beträgt 20°C ; hier wird ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand von $0,25 \text{ W/(m·K)}$ angenommen, der zur Berechnung der Innenoberflächentemperaturen und Schimmelpilzabschätzung nach DIN EN ISO 10211 [7] und entsprechend DIN EN ISO 13788 [21] verwendet werden soll.

Im graphischen Vergleich ist die resultierende Temperaturverteilung im Bauteil der stationären Berechnung von ZUB Argos® 2011 (Bild 9) der Verteilung berechnet mit WUFI® Plus (Bild 10) sehr ähnlich. Genau betrachtet wird die Oberflächentemperatur an der Innenecke. In Tabelle 8 sind die resultierenden Werte gegenübergestellt. Die vom Wärmebrückenatlas etwas höher gegebene Temperatur ist auf die gröbere Gitterauflösung und die beschränkteren

Tabelle 8. Cross-Validierungs-Ergebnis Mauerwerksecke in $^\circ\text{C}$
Table 8. Crossvalidation results of masonry corner in $^\circ\text{C}$

	Wärmebrückenatlas	ZUB Argos® 2012	WUFI® Plus
Innenecke	14,3	13,99	13,964

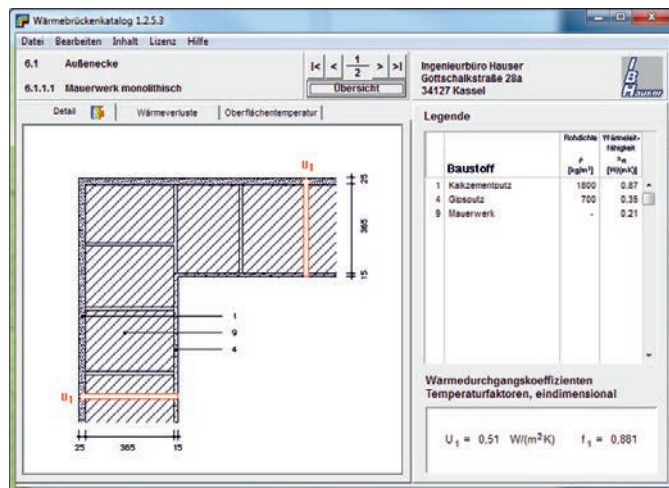


Bild 7. Ecken-Wärmebrücke, Bildschirmfoto der Wärmebrückenatlas-Software [19]
Fig. 7. Corner thermal bridge, screenshot of Wärmebrückenatlas software [19]

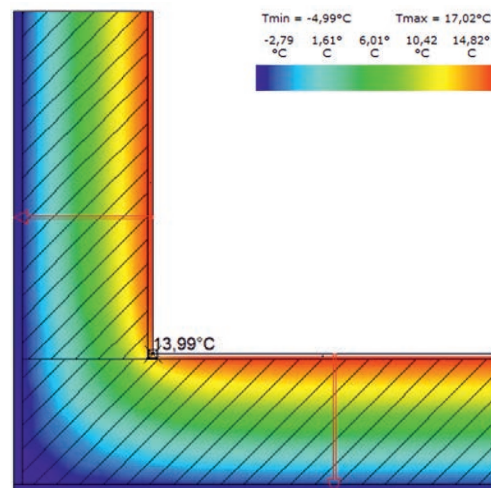


Bild 9. Temperaturverlauf der Ecken-Wärmebrücke, Bildschirmfoto von ZUB Argos® 2012 [16]
Fig. 9. Temperature distribution of corner thermal bridge, screenshot of ZUB Argos® 2012 [16]

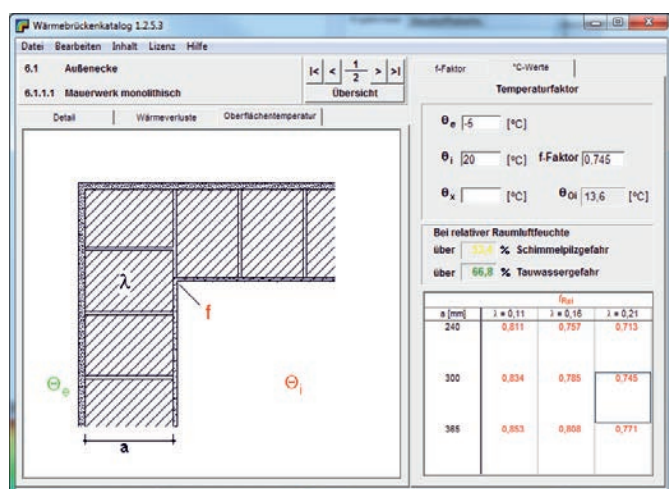


Bild 8. Ecken-Wärmebrücke Ergebnisse, Bildschirmfoto der Wärmebrückenatlas-Software [19]
Fig. 8. Corner thermal bridge results, screenshot of Wärmebrückenatlas software [19]

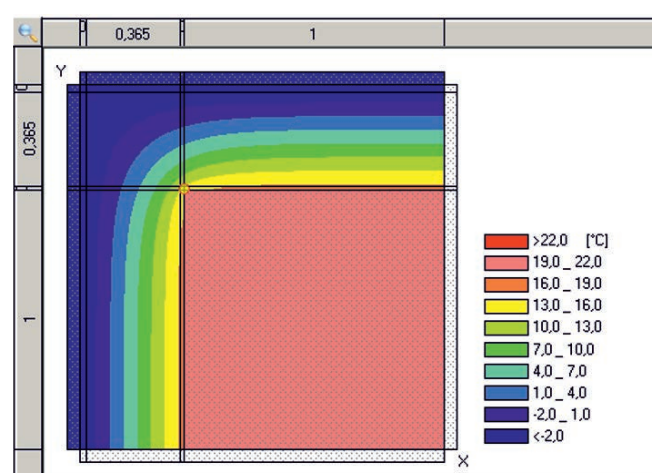


Bild 10. Temperaturverlauf der Ecken-Wärmebrücke, Bildschirmfoto von WUFI® Plus
Fig. 10. Temperature distribution of corner thermal bridge, screenshot of WUFI® Plus

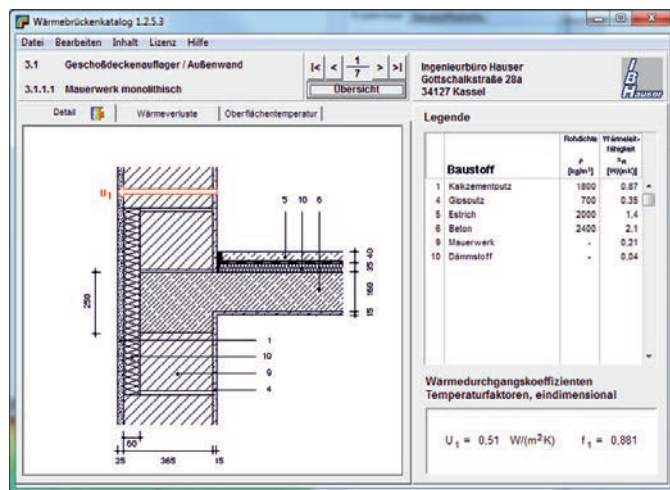


Bild 11. Deckenanschluss an monolithischem Mauerwerk, Bildschirmfoto der Wärmebrücken-katalog-Software [19]
Fig. 11. Wall/ceiling connection, screenshot from Wärmebrücken-katalog software [19]

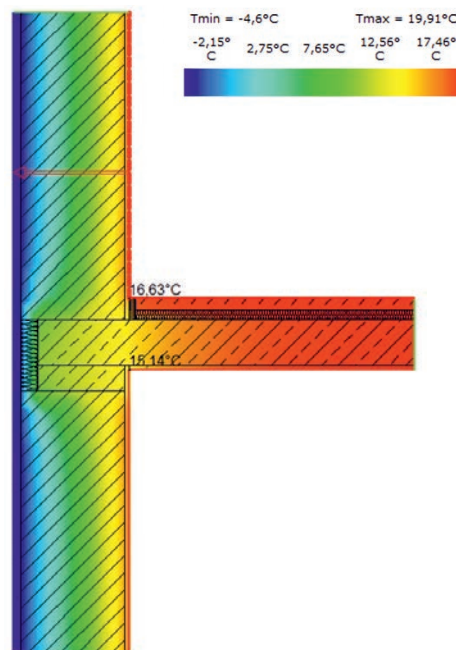


Bild 13. Temperaturverlauf im Deckenanschluss, Bildschirmfoto von ZUB Argos® 2012 [16]
Fig. 13. Temperature distribution in wall/ceiling connection, screenshot of ZUB Argos® 2012 [16]

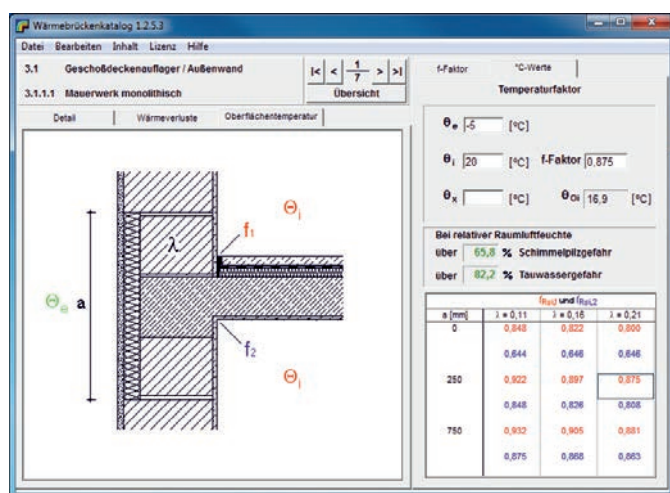


Bild 12. Deckenanschluss an monolithischem Mauerwerk Ergebnisse, Bildschirmfoto der Wärmebrücken-katalog-Software [19]
Fig. 12. Wall/ceiling connection results, screenshot from Wärmebrücken-katalog software [19]

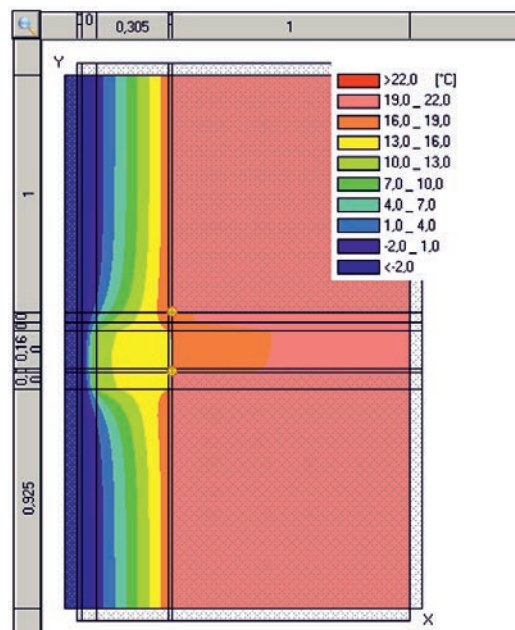


Bild 14. Temperaturverlauf im Deckenanschluss, Bildschirmfoto von WUFI® Plus
Fig. 14. Temperature distribution in wall/ceiling connection, screenshot of WUFI® Plus

Rechnerkapazitäten zum Zeitpunkt der Erstellung des Wärmebrücken-katalogs zurückzuführen.

Als zweites Beispiel wurde ein gedämmter Betondeckenanschluss im Mauerwerk aus dem Wärmebrücken-katalog gewählt (Bild 11) und mit den beiden Programmen ZUB Argos® 2011 und WUFI® Plus zweidimensional modelliert und simuliert. Die äußere Dämmung der Betonplatte wurde dabei nicht über die Höhe der Platte hinaus in das Mauerwerk verlegt.

Die resultierende Temperaturverteilung im Bauteil der stationären Berechnung von ZUB Argos® 2011 (Bild 13) ist ebenfalls der Verteilung, berechnet mit WUFI® Plus (Bild 14), sehr ähnlich. Bei diesem Beispiel wird die Oberflächentemperatur an der oberen Ecke, wo die Decke in die Wand trifft, und an der unteren Ecke verglichen. In Tabelle 9 werden die Ergebnisse präsentiert. Alle drei Programme liefern bei dieser Berechnung Oberflächentemperaturen im Bereich von 0,3 K beziehungsweise 0,1 K Abweichung.

Tabelle 9. Cross-Validierungs-Ergebnisse Deckenanschluss in [°C]
Table 9. Crossvalidation results of wall/ceiling connection in [°C]

	Wärmebrücken-katalog	ZUB Argos® 2012	WUFI® Plus
obere Ecke	16,9	16,63	16,788
untere Ecke	15,2	15,14	15,156

4 Anwendungsbeispiel: Wohnungstrennwand mit und ohne Innendämmung

4.1 Gebäudemodell

Die bisher vorgestellten Simulationen zur Validierung von WUFI® Plus waren stationär und wurden mit konstanten Randbedingungen durchgeführt. Dies ist durchaus mit WUFI® Plus möglich, reizt jedoch die Leistungsfähigkeit der dynamischen Simulation bei Weitem nicht aus. Daher soll im Folgenden ein Anwendungsbeispiel dynamisch simuliert werden.

Es werden zwei Wohnungen, getrennt durch eine direkt an die Außenwand angeschlossene Innenwand, betrachtet. Die Innenwand kann eine Absenkung der Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Mauerwerks bewirken. Für den Referenzfall ist der Wandaufbau beider Wohnungen identisch und nicht gedämmt. Es wird jeweils die kritische Oberflächentemperatur in den Innenecken betrachtet, an denen die Trennwand auf die Außenwand trifft. Für den Referenzfall ist dort die Temperatur in beiden Wohnungen gleich.

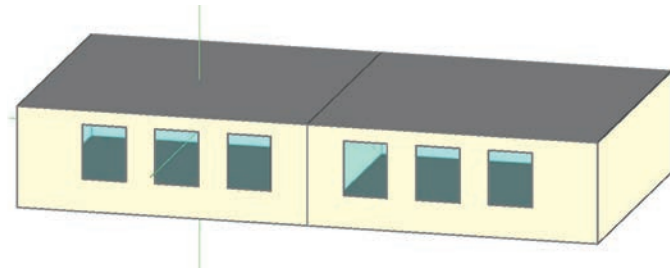


Bild 15. WUFI® Plus Gebäudemodell vom Anwendungsbeispiel

Fig. 15. WUFI® Plus buildingmodel of the example case

Dem Anwendungsfall entsprechend wird in einer Wohnung eine Innendämmung angebracht. In [20] wird gezeigt, dass im gewöhnlichen Altbau bei fehlerfreier Anbringung der Innendämmung im Übergangsbereich zur einbindenden Wand keine Feuchteprobleme auftreten sollten, sofern Nutzerverhalten, Luftwechselraten und sonstige Randbedingungen gleich bleiben.

Weiterführend wird hier untersucht, ob und unter welchen Umständen die Innendämmung einer Wohnung für die daneben liegende, nicht gedämmte Nachbarswohnung zu Feuchteproblemen in der kritischen Ecke führen kann.

Beide Wohnungen sind quadratisch und 8×8 Meter groß. Es wird angenommen, dass sich über und unter den Wohnungen identische, gleich konditionierte Wohnungen befinden. Jede Wohnung hat je drei Fenster auf der Süd- und Nordseite. Das mit WUFI® Plus visualisierte dreidimensionale Gebäudemodell ist in Bild 15 dargestellt.

Bild 16 zeigt das simulierte Detail der einbindenden Wand im Querschnitt. Die Oberflächenübergangswiderstände wurden gemäß [7] mit Verweis auf die ISO 13788 [21] auf $0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ gesetzt. Dieser Übergangswiderstand soll, gegensätzlich zur Bestimmung des längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten, zur Einstufung des Schimmelpilzrisikos verwendet werden.

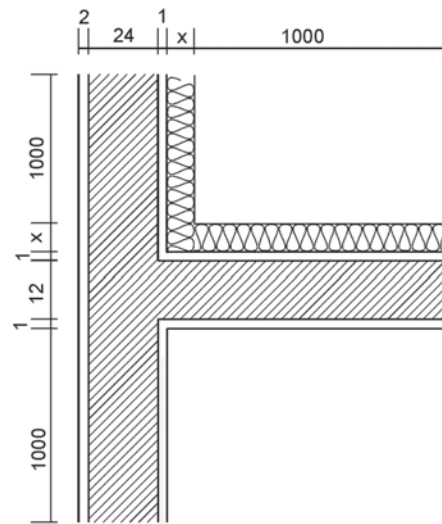


Bild 16. Wärmebrücke – Innenwand mit Dämmung

Fig. 16. Thermal bridge – indoor wall with insulation

4.2 Parametervariationen

Beide Wohnungen werden pro Fall stets den gleichen, jedoch von Fall zu Fall variierenden Randbedingungen ausgesetzt. Es werden vier Eingabeparameter variiert: der natürliche Luftwechsel, die Stärke der Innendämmung, die Feuchteproduktion infolge der Bewohneranzahl und die Soll-Innenraumtemperatur. Speziell für die Innenraumtemperatur wurde eine Variante mit Nachtabenkung simuliert. Dabei soll die Raumlufttemperatur am Tag 21°C betragen und in der Nacht von 23 bis 5 Uhr auf 16°C abgesenkt werden. Weitere eingesetzte Parameterwerte sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10. Parametervariationen der Randbedingungen
Table 10. Changing input parameter for different boundary conditions

	Referenzfall		
Soll-Raumlufttemperatur	19°C	21°C	Nachtabenkung
Bewohner (Feuchteproduktion)	3 Personen (ca. 9 l/Tag)	2 Personen (ca. 6 l/Tag)	4 Personen (ca. 12 l/Tag)
Luftwechsel	0,5 1/h	0,3 1/h	0,7 1/h
Dämmstärke	10 cm	6 cm	14 cm

4.3 Simulationsergebnisse

Für den stationär berechneten Testreferenzfall (ohne Innendämmung) ergibt sich ein Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,695. Mit angebrachter Innendämmung, für den teilsanierten Referenzfall, ergibt sich ein Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,875 im gedämmten Eck und f_{Rsi} von 0,615 im nicht gedämmten Eck der Nachbarwohnung. Das Temperaturfeld dazu ist in Bild 17 abgebildet.

Für den Referenzfall zeigt Bild 18 Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum über das erste Quartal eines Jahres. Ebenfalls dargestellt ist die erhöhte relative Luftfeuchtigkeit direkt an den Oberflächen der Ecken,

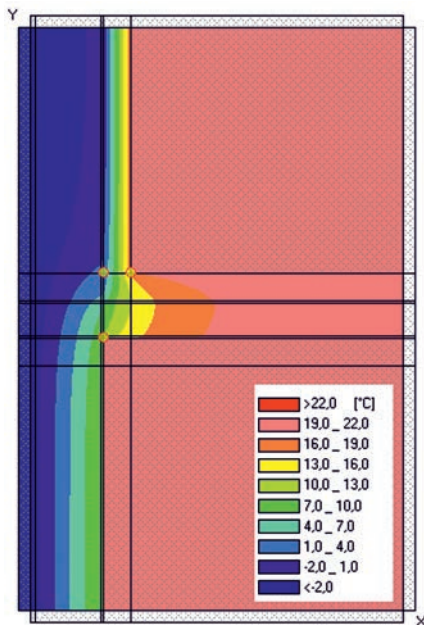


Bild 17. Temperaturverlauf stationärer Anwendungstestfall mit Innendämmung aus WUFI® Plus

Fig. 17. Temperature distribution steady-state case with indoor insulation from WUFI® Plus

infolge der dort niedrigeren Temperaturen entsprechend dem Wasserdampfpartialdruck im Raum. Für den unsanierten Fall ist die Oberflächenfeuchte größtenteils unter 80 %. Jedoch nach Sanierung einer Wohnung steigt beim Referenzfall die Oberflächenfeuchte in dem Eck der unsanierten Wohnung häufig auf über 80 %. Auf den Diagrammen (Bilder 19 bis 22) sind die Tagesmittelwerte der Oberflächenfeuchte im kritischen, nicht gedämmten Eck infolge der Parametervariationen aufgetragen. Ausgehend vom teilsanierten Referenzfall wurde jeweils einer der vier genannten Parameter variiert, um dessen Einfluss auf die relative Feuchte in der unsanierten Ecke zu untersuchen.

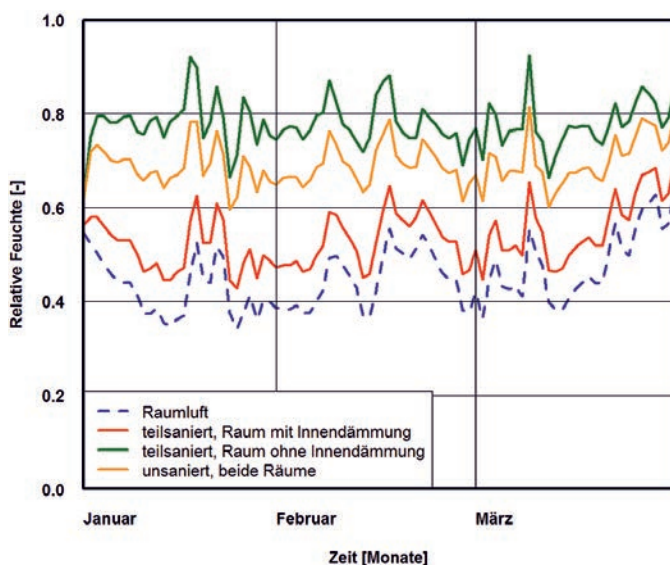


Bild 18. Verlauf relativer Feuchten im Referenzfall und 1. Quartal des Jahres

Fig. 18. Relative humidity for reference case in the first quarter

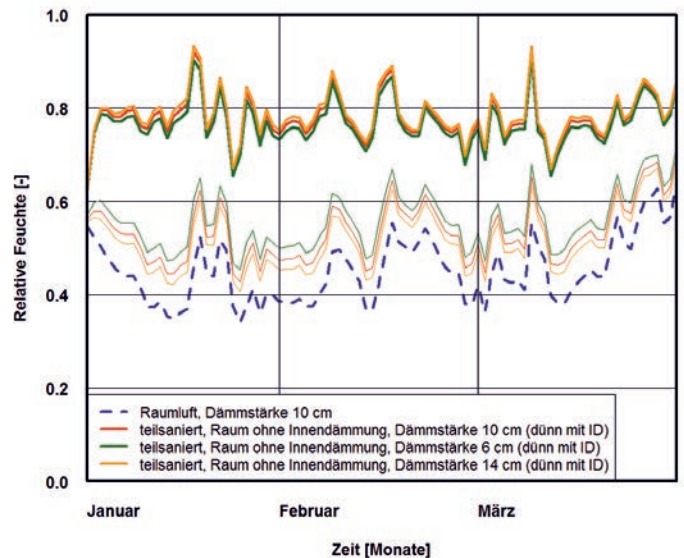


Bild 19. Verlauf relativer Feuchten infolge Dämmstärken-Variation im 1. Quartal des Jahres

Fig. 19. Relative humidity because of insulation thickness variation for the first quarter

Bild 19 zeigt, dass die Stärke der Innendämmung in der sanierten Wohnung kaum Auswirkungen auf die Oberflächenfeuchte im kritischen Eck der unsanierten Wohnung hat. Die relative Feuchte ist für die durchgeführten Variationen unabhängig von der Dicke der Innendämmung annähernd gleich. Zu beachten ist jedoch, dass die Innendämmung über das Eck hinaus, an der Innenwand einen Meter weit angenommen wurde. Die deutlich niedrigere relative Feuchte im Eck der gedämmten Wohnung, auf Grund der dort höheren Temperaturen, war zu erwarten und ist im gleichen Bild mit dünnen Linien eingezeichnet. Die Variationen der Feuchteproduktion (Bild 20) oder des Luftwechsels (Bild 21) liefern deutlich abweichende Oberflächenfeuchten gegenüber dem Referenzfall (rote Linie).

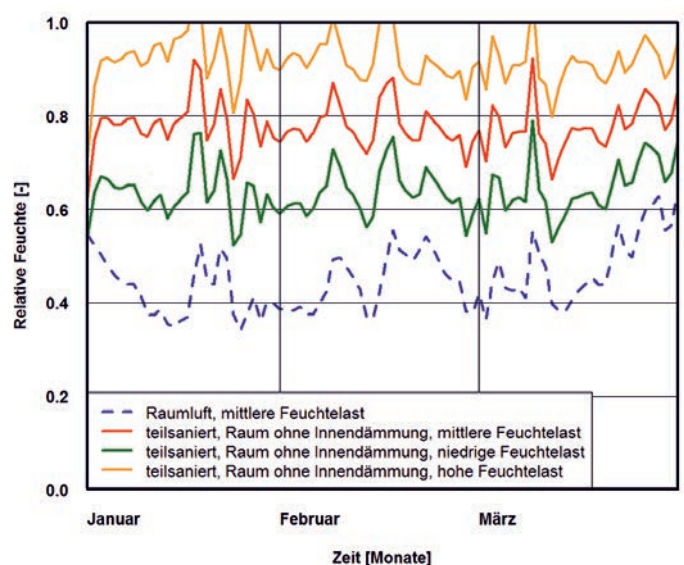


Bild 20. Verlauf relativer Feuchten infolge Feuchtelast-Variation im 1. Quartal des Jahres

Fig. 20. Relative humidity because of moisture production variation for the first quarter

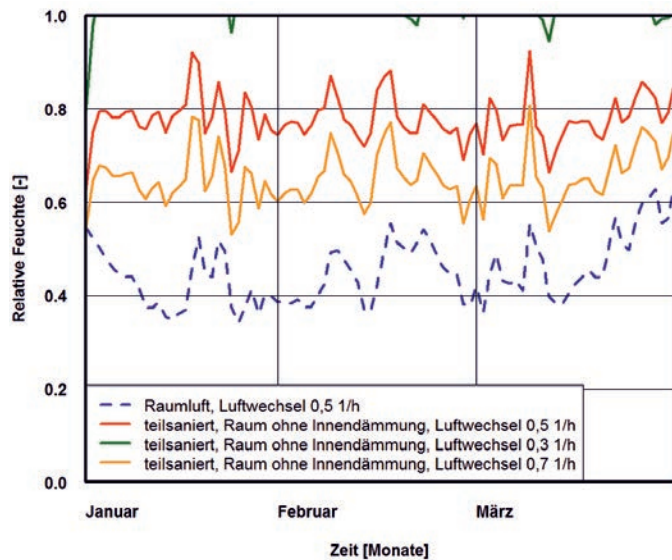


Bild 21. Verlauf relativer Feuchten infolge Luftwechselraten-Variation im 1. Quartal des Jahres

Fig. 21. Relative humidity because of air change rate variation for the first quarter

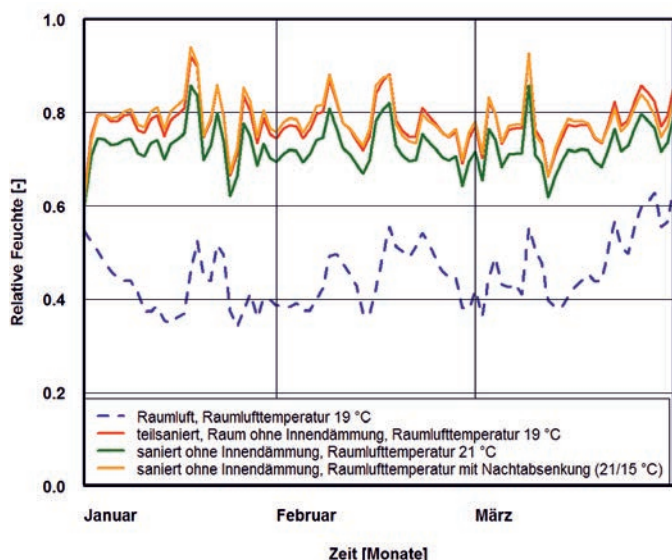


Bild 22. Verlauf relativer Feuchten infolge Raumlufte-temperatur-Variation im 1. Quartal des Jahres

Fig. 22. Relative humidity because of indoor air temperature variation for the first quarter

Mit der Annahme eines 4-Personen-Haushalts und folgend einer Feuchteproduktion von etwa 12 l am Tag, liegt die Oberflächenfeuchte im 1. Quartal deutlich über 80 %; bei einer geringeren Luftwechselrate von 0,3 1/h häufig sogar bei 100 %. In beiden Fällen ist mit Schimmelpilzwachstum an der Wärmebrücke zu rechnen. Gegensätzlich wird mit geringerer Feuchteproduktion (ca. 6 l pro Tag) oder einem höheren Luftwechsel (0,7 1/h) das Schimmelpilzrisiko deutlich verringert.

Wird die Soll-Raumlufte-temperatur um 2 auf 21 °C erhöht, sinkt die Oberflächenfeuchte im kritischen Eck (Bild 22). Aus der simulierten Nachtabsenkung resultiert trotz der tagsüber erhöhten Innentemperatur gegenüber dem Referenzfall kaum eine Änderung der Tagesmittelwerte der Oberflächenfeuchte an der kritischen Ecke.

5 Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von energetischer Gebäudesimulation zur Planung von Gebäuden nimmt zu. Um Null- und Plusenergiegebäude auslegen zu können, ist durch den notwendigen Abgleich von zeitabhängiger Energieproduktion und -verbrauch der Einsatz instationärer Simulationsverfahren auf noch breiterem Gebiet notwendig. Wenn dazu noch ein Bauteilmodell im Gebäudesimulationsmodell verwendet wird, das den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport abbildet, ist neben Aussagen zum Energiebedarf und Komfort auch die Schadensfreiheit der Gebäudehülle beurteilbar. Dieses Bauteilmodell ist jedoch in der Regel eindimensional. Eine Recherche der wissenschaftlichen Literatur zeigt jedoch die Notwendigkeit, für genauere Abschätzungen auch zwei- und dreidimensionale Effekte abbilden zu können.

Die Kopplung eines hygrothermischen Gebäudesimulationsmodells mit einer instationären dreidimensionalen Wärmebrückenberechnung wurde beschrieben. Die Validierung des Wärmebrückenmodells unter stationären Bedingungen nach DIN EN ISO 10211 [7] wurde erfolgreich durchgeführt. Ein Validierungsfall der Norm musste hierzu angepasst werden, da sich nachweisbar in der Norm ein Rechen- und ein Anwendungsfehler befinden. Zusätzlich wurde noch eine Cross-Validierung mit einem anderen am Markt verfügbaren Wärmebrückenberechnungsprogramm sowie mit einem Tabellenwerk für Wärmebrücken erfolgreich durchgeführt.

Ein einfaches Anwendungsbeispiel für eine einseitige Innendämmung bei nebeneinander liegenden Wohnungen zeigt exemplarisch Einsatzmöglichkeiten der neuen Software. Wenn bei nebeneinander liegenden Wohnungen nur eine Wohnung mit Innendämmung versehen wird, so kann dies in der nicht gedämmten, vorher schadensfreien, Wohnung dazu führen, dass Schimmelpilzprobleme an der Trennwand auftreten. Die Simulationen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit dafür vom Luftwechsel und der Feuchteproduktion in der nicht sanierten Wohnung, etwas weniger von der Raumlufte-temperatur und kaum von der Dämmstoffstärke der Innendämmung in der sanierten Wohnung abhängt.

Diese Anwendung ist nur exemplarisch für eine Vielzahl möglicher Einsatzgebiete einer dynamischen hygrothermischen Simulation mit gekoppelter Wärmebrückenberechnung.

Für die energetische Beurteilung ist zu prüfen, in welchen Fällen eine dynamische Berücksichtigung des Wärmebrückeneffekts notwendig ist, wann ein linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient ausreichend für die Abbildung des zusätzlichen Wärmeverlusts ist und wie groß der Unterschied in den Bedarfsberechnungen ist, wenn der Wärmebrückeneinfluss gänzlich unberücksichtigt bleibt.

Auch die Berücksichtigung von solarer Einstrahlung auf das dynamische Wärmebrückenverhalten kann interessante zusätzliche Erkenntnisse liefern und sollte näher untersucht werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass ein erfolgreich validiertes Wärmebrückenmodul in die Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus implementiert wurde. Speziell durch die Verbindung mit hygrothermischer Simulation öffnen sich viele neue Anwendungsgebiete.

Literatur

- [1] Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Abl. L 1 vom 4.1.2003, S. 65).
- [2] *Martin, K., Escudero, C., Erkoreka, A., Flores, I., Sala, J. M.*: Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings* 55 (2012), pp. 704–714.
- [3] *Martin, K., Campos-Celador, A., Escudero, C., Gómez, I., Sala, J. M.*: Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. *Energy and Buildings* 50 (2012), pp. 139–149.
- [4] *Martin, K., Erkoreka, A., Flores, I., Odriozola, M., Sala, J. M.*: Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings* 43 (2011), pp. 529–535.
- [5] *Košny, J., Kossecka, E.*: Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. *Energy and Buildings* 34 (2002), S. 445–454.
- [6] *Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., Vanoli, G. P.*: Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Applied Energy* 97 (2012), pp. 405–418.
- [7] DIN EN ISO 10211:2008-04 Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen.
- [8] *Künzel, H. M.*: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [9] DIN EN 15026:2007-07 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [10] *Holm, A., Radon, J., Künzel, H. M., Sedlbauer, K.*: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94.
- [11] *Lengsfeld, K., Holm, A.*: Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI® Plus. *Bauphysik* 29 (2007), H. 3, S. 178–186.
- [12] ASHRAE Standard 140: Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. 2007.
- [13] *Antretter, F., Sauer, F., Schöpfer, T., Holm, A.*: Validation of a hygrothermal whole building simulation software. 12th International Building Performance Simulation Association 2011. 14–17 November, 2011, Sydney/ Australia.
- [14] DIN EN 12831:2003-08 Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast.
- [15] *Eymard, R., Gallouët, T.R., Herbin, R.*: The Finite Volume Method. *Handbook of Numerical Analysis*, Vol. VII (2000), S. 713–1020. North-Holland, Amsterdam.
- [16] ZUB Argos® 2012, Software, ZUB Systems GmbH.
- [17] *Hauser, G., Stiegel, H.*: Wärmebrücken-Atlas für den Mauerwerksbau. 3., durchges. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1996.
- [18] *Hauser, G., Stiegel, H.*: Wärmebrückenkatalog für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006.
- [19] *Hauser, G., Stiegel, H., Haupt, W.*: Wärmebrückenkatalog Version 1.2.5.3, Software ZUB Systems GmbH.
- [20] *Krus, M., Sedlbauer, K.*: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Tagungsunterlage: 1. Internationaler Innendämmkongress 2011. 20-21. Mai 2011, TU Dresden, Institut für Bauklimatik, S. 53–64.
- [21] DIN EN ISO 13788:2013-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren.

Autoren dieses Beitrages:

Florian Antretter, M.Eng., Gruppenleiter Hygrothermische Gebäudeanalyse, Abt. Hygrothermik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
 Matthias Pazold, M.Eng., Hygrothermische Gebäudeanalyse, Abt. Hygrothermik Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP),
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley
 Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Radon, Agr. University of Cracow, Poland
 Dr.-Ing. Hartwig Künzel, Abteilungsleiter Hygrothermik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP),
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

