

Neue objektorientierte hygrothermische Modellbibliothek zur Ermittlung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen

Die Entwicklung energetisch optimierter Lüftungsstrategien für feuchtebedingte Probleme bzw. die Planung und die Sanierung energiesparender Gebäude benötigt eine genaue Kenntnis über das hygrothermische Bauteil- und Gebäudeverhalten. Diese Fragestellungen können vor der eigentlichen messtechnischen Ausführung mit Hilfe von Simulationstools beantwortet werden. Die Komplexität solcher Fragestellungen führt zu komplexen Modellen, die schnell unüberschaubar werden können, wenn nicht geeignete Beschreibungsmittel verwendet werden. Modellierungssprachstandards wie Modelica ermöglichen aufgrund ihrer generischen Konzepte, wie z. B. Klassenprinzip, Vererbungsprinzip, Aggregationsprinzip und Polymorphie, solche komplexen Systeme in einfache Teilsysteme zu zerlegen, diese zu verifizieren und dann wieder zusammenzuführen. In der Forschung existieren bisher keine generischen Simulationstools zur Bauteil- und Gebäudesimulation, die eine hygrothermische Analyse mit starken Wechselwirkungen zwischen Bauteilverhalten, Gebäudehülle, Gebäudenutzung sowie Raumklima ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung einer flexiblen objektorientierten hygrothermischen Modellbibliothek, basierend auf der Modellierungssprache Modelica, für die Simulation und die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Raumklima, Bauteilverhalten, Gebäudehülle sowie Gebäudenutzung. Diese Modellbibliothek soll für die Entwicklung eines energetisch optimierten, bedarfsgeregelten Lüftungssystems zur Minimierung des Risikos der Schimmelpilzbildung unter Einhaltung eines hygrothermischen und hygienischen Komforts eingesetzt werden. Die Komponenten- bzw. Modellbibliothek soll in exemplarischen Konfigurationen simulativ sowie experimentell validiert werden.

New object-oriented hygrothermal model library for calculating hygrothermal and hygienic comfort in rooms. *Developing energy-optimized ventilation strategies for moisture-related problems and the design and renovation of energy saving buildings requires an accurate knowledge of how hygrothermal components and buildings behave. These issues can be resolved with the aid of simulation tools before actually putting measurement technology into practice. The complexity of these issues produces complex models which can soon become unmanageable if suitable methods of description are not used. Due to their generic concepts such as class principle, inheritance principle, aggregation principle and polymorphism, modelling language standards such as Modelica enable complex systems such as these to be broken down into simple subsystems which can be verified and then reassembled. Research so far has lacked generic simulation tools for simulating components and buildings to enable a hygrothermal analysis with strong interactions between the behaviour of components, building envelope, building use and room conditions.*

Therefore the aim of this work was to develop a flexible, object-oriented, hygrothermal model library based on the Modelica modelling language for simulating and analysing the interactions between room conditions, the behaviour of components, building envelope and building use. This model library should be used for developing an energy-optimized ventilation system regulated according to demand in order to minimize the risk of mould forming while maintaining hygrothermal and hygienic comfort. The component and model library should be validated in example configurations in both simulations and trials.

1 Hintergrund und Problemstellung

Die Entwicklung energetisch optimierter Lüftungsstrategien für feuchtebedingte Probleme bzw. die Planung und die Sanierung energiesparender Gebäude benötigt die genaue Kenntnis des hygrothermischen Bauteil- und Gebäudeverhaltens. Diese Fragestellungen können vor dem eigentlichen Ausführen mit Hilfe von Simulationstools beantwortet werden. Die Komplexität solcher Fragestellungen führt zu komplexen Modellen, die schnell unüberschaubar werden können, wenn nicht geeignete Beschreibungsmittel verwendet werden.

Seit den 1960-er Jahren wurden zur Beurteilung von Bauteilen, beginnend mit einfachen grafischen Verfahren zur Ermittlung des Tauwasserausfalls in Bauteilen [1], über die Berechnung von mehrdimensionalen Temperaturfeldern bis zur Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchte- transports [2], [3], [4] immer mehr Modelle und Rechenverfahren entwickelt. In den letzten Jahren konnten große Fortschritte auf dem Gebiet der hygrothermischen Bauteilsimulation und deren experimenteller Validierung verzeichnet werden.

Programme zur thermischen Gebäudesimulation auf Basis generischer Simulationswerkzeuge [5], [6]) bieten gegenüber dem klassischen Ansatz [7], [8], [9], [10] sowie blockschaltbildorientierten Simulationssystemen [11] eine Reihe von Vorteilen (leichte Erweiterbarkeit der Modellbibliothek, Kombination mit anderen thematisch verwandten Modellbibliotheken, Austausch der Modellbibliotheken zwischen verschiedenen Simulationswerkzeugen bei Verwendung von Modellierungssprachen, wie Modelica [12], sind aber als neue Entwicklungen in der Praxis noch nicht weit verbreitet.

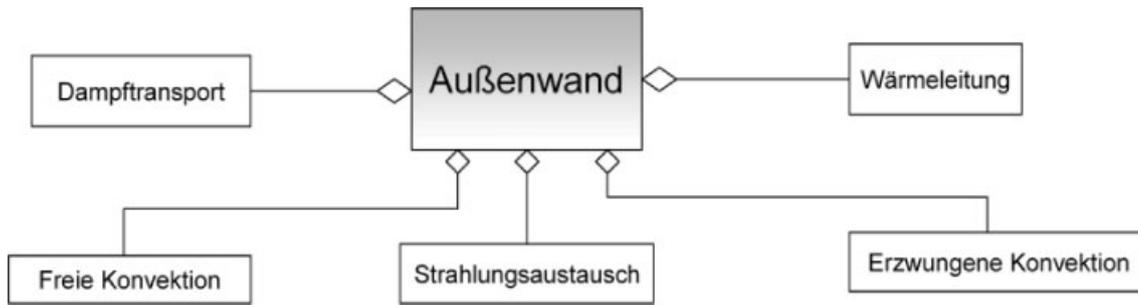


Bild 1. Beispiel einer Aggregation für eine Außenwand in der UML (Unified Modeling Language-Repräsentation [13])
 Fig. 1. Example of an aggregation for an external wall in UML (unified modeling language representation) [13]

Solche Sprachstandards ermöglichen aufgrund ihrer generischen Konzepte, wie beispielsweise Klassenprinzip, Vererbungsprinzip, Aggregationsprinzip (Bild 1) und Polymorphie, komplexe Systeme in einfache Teilsysteme zu zerlegen, diese zu verifizieren und dann wieder zusammenzuführen.

In der Forschung und in der Praxis existieren zurzeit kaum generische Modellbibliotheken zur Bauteil- und Gebäudesimulation, die eine hygrothermische Analyse mit starken Wechselwirkungen zwischen Gebäudeverhalten und Raumklima ermöglichen.

2 Zielsetzung

Ziel einer kürzlich abgeschlossenen Dissertation [14] ist die Entwicklung einer flexiblen objektorientierten hygrothermischen Modellbibliothek für die Simulation und die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Raumklima, Gebäudekomponenten sowie Gebäudenutzung auf Basis der Modellierungssprache Modelica.

Modelica ist eine frei verfügbare objektorientierte Modellierungssprache für große, komplexe und heterogene technische Systeme, die Ende der 1990-er Jahre entwickelt wurde. Diese Sprache ist objektorientiert, gleichungsorientiert und basiert auf dem generischen Prinzip. Aus diesem Grund besitzen Modelle, die in dieser Sprache geschrieben wurden, ein hohes Maß an Flexibilität, Modularität und Wiederverwendbarkeit verglichen mit Modellen der klassischen Bausoftware. In dem Modelica-Ansatz wird die Modellbildung von der Numerik getrennt. Der Modelica-Modellierer muss sich nur auf die Modellentwicklung konzentrieren und muss keinen speziellen Algorithmus für die rechnerisch-numerische Umsetzung seiner Modelle entwickeln. Diese Aufgabe wird von allgemeinen Simulationswerkzeugen übernommen, die die Sprache Modelica „verstehen“.

Die Komponenten- bzw. Modellbibliothek wird in der Arbeit in exemplarischen Konfigurationen simulativ sowie experimentell validiert. Die Modellbibliothek ist dann für die Entwicklung von einem energetisch optimierten, bedarfsgeregelten Lüftungssystem zur Minimierung des Risikos der Schimmelpilzbildung unter Einhaltung eines hygrothermischen und hygienischen Komforts eingesetzt worden. An einem praktischen Beispiel wird die Modellbibliothek angewandt, um die Konsequenzen einer unüberlegten Gebäudesanierung durch Simulationen nachzuweisen und unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung miteinander zu vergleichen.

3 Objektorientierte hygrothermische Modellbibliothek

In [14] ist eine Modellbibliothek zur Simulation des hygrothermischen Gebäudeverhaltens in Modelica entwickelt worden. Diese Bibliothek ist modular aufgebaut und in mehrere Submodelle untergliedert. Die Kopplung der Submodelle dieser Bibliothek ermöglicht die Abbildung eines komplexen Gebäudes und die Vorhersage des Verhaltens von Bauteilen bzw. Gebäuden unter stationären und instationären Randbedingungen. Die neue entwickelte Bibliothek beinhaltet unter anderem:

- Wandmodelle für die Berechnung des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransports in Wänden,
- Fenstermodelle für die Berechnung des Solargewinns sowie der Wärmeverluste durch Fenster,
- Luftvolumenmodelle für die Berechnung der Energie-, Massen- und CO₂-Bilanz eines Luftknotens in einer Zone,
- Zonenmodelle für die Berechnung der Geometrie einer Zone sowie des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen den umschließenden Flächen einer Zone,
- ein Umgebungsmodell für die Berechnung der notwendigen Klimaparameter für die Bauteil- und die Gebäudesimulation auf Basis von Klimadatensätzen,
- Anlagenmodelle für die Berechnung von verschiedenen Heizungs-, Kühl- und Lüftungsanlagen.

Teilkomponenten der Modellbibliothek werden in der Arbeit validiert. Anschließend erfolgt die Zusammenführung aller Komponenten der Modellbibliothek zu einem Gebäudemodell. Diese neue Komponente wird ebenfalls in ihrer Gesamtheit validiert.

1. Zunächst werden die eindimensionalen Wandmodelle der Modellbibliothek validiert. Dies erfolgt in drei Schritten:

In einem ersten Schritt werden die Transportprozesse zur Beschreibung der reinen Wärmeleitung und der reinen Diffusion eines berechneten Wandmodells mit bekannten analytischen Lösungen verglichen. Dabei werden für eine quasi-unendliche Wand die Temperatur (reine Wärmeleitung) und die relative Feuchte (reine Diffusion) in unterschiedlichen Tiefen des Bauteils berechnet. Es zeigt sich beispielhaft für die ersten 10 cm der Wand eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den analytischen Lösungen und den Berechnungsergebnissen des Modelica Wandmodells, Bild 2.

In einem zweiten Schritt wird das hygrothermische Verhalten eines Wandmodells mit WUFI [15], einem vali-

dierten Berechnungsmodell verglichen. Eine gute Übereinstimmung zwischen den zwei Modellen ist den Simulationsergebnissen zu entnehmen.

In einem dritten Schritt werden mit dem Modelica-Modell Benchmarks des HAMSTAD-Projekts [16], ein europäisches Projekt zur Validierung von Wandmodellen zur Berechnung des Wärme-, Feuchte- und Lufttransports in Bauteilen, berechnet und mit Ergebnissen von anderen Modellen verglichen. Die Berechnungsergebnisse des Modelica-Modells stimmen mit denen der anderen Modelle sehr gut überein, Bild 3.

2. Anschließend werden die zweidimensionalen Wandmodelle der Modellbibliothek validiert Dies erfolgt in zwei Schritten:

In einem ersten Schritt wird eine Plausibilitätsüberprüfung durch Modellvergleich eines eindimensionalen mit einem zweidimensionalen hygrothermischen Wandmodell durchgeführt.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Validierung des zweidimensionalen Wandmodells durch die Berechnun-

gen von Benchmarks für den stationären bzw. instationären Fall. Für den stationären Fall existiert eine analytische Lösung. Für den instationären Fall wird das Berechnungsergebnis des zweidimensionalen Wandmodells mit den Ergebnissen von zwei anderen zweidimensionalen Wandmodellen verglichen.

In allen Fällen zeigt das Modelica-Modell sehr gute Ergebnisse.

3. Zuletzt werden die Komponenten der Modellbibliothek zu einem Gebäudemodell zusammengeführt. Bild 4 zeigt ein Klassendiagramm zur Darstellung der Konfiguration eines Gebäudemodells. Die Validierung des Gebäudemodells erfolgt in zwei Schritten:

In einem ersten Schritt wird die Reaktion des Gebäudemodells auf das Außenklima am Beispiel eines aus hygrothermischer Sicht frei schwingenden Raumes des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen untersucht.

In einem zweiten Schritt wird die Dynamik des Gebäudemodells für einen komplexeren Fall mit Hilfe von

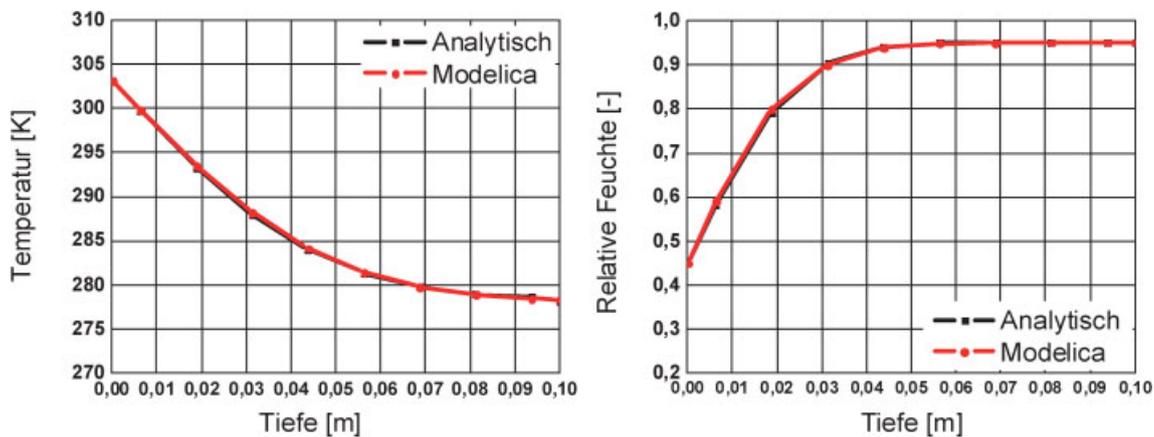


Bild 2. Vergleich zwischen dem Modelica-Wandmodell und der analytischen Lösung, reine Wärmeleitung (links), reine Diffusion (rechts)

Fig. 2. Comparison between the Modelica wall model and the analytic solution, thermal conduction only (left), diffusion only (right)

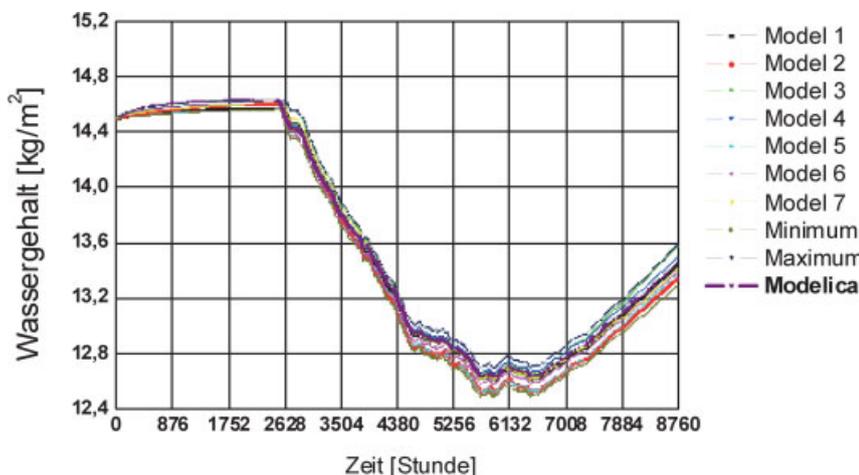


Bild 3. Vergleich zwischen dem mit sieben Simulationstools berechneten mittleren Wassergehalt und dem mit Hilfe des Modelica-Modells berechneten Wassergehalt (Benchmark 1 aus dem HAMSTAD-Projekt)

Fig. 3. Comparison between the mean water content calculated with seven simulation tools and the water content calculated using the Modelica model (benchmark 1 from the HAMSTAD project)

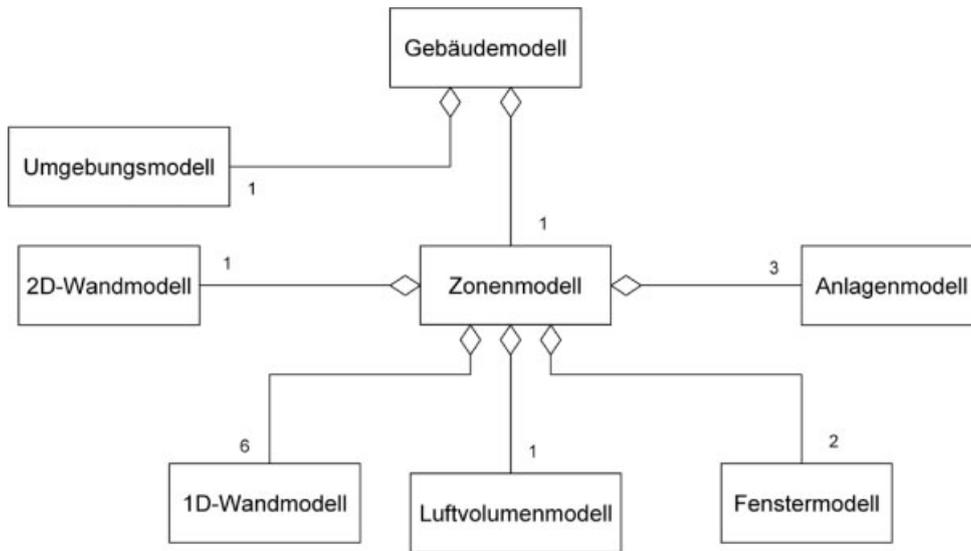


Bild 4. Klassendiagramm zur Darstellung der Konfiguration des Gebäudemodells aus der Modelica-Bibliothek BuildingPhysicsLibrary

Fig. 4. Class diagram to illustrate the configuration of the building model from the Modelica building physics library

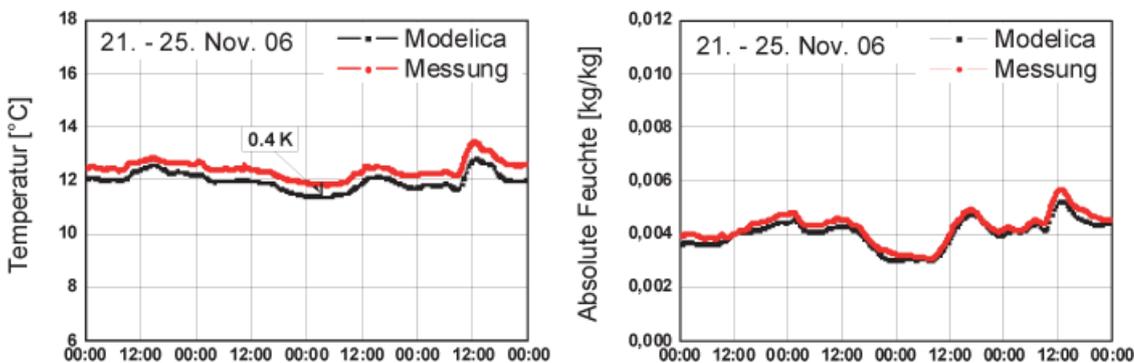


Bild 5. Vergleich zwischen Temperatur (links) und absoluter Feuchte (rechts) des Modelica-Modells und der jeweils gemessenen Werte für das erste Experiment (frei schwingender Raum)

Fig. 5. Comparison between the temperature (left) and absolute moisture (right) of the Modelica model and the respective measured values for the first trial (freely oscillating room)

gewonnenen Messwerten eines Versuchsraumes aus dem VERU-Projekt überprüft.

Die Validierung erfolgt in beiden Fällen durch einen absoluten Vergleich zwischen Berechnung und Messung. Eine minimale Abweichung zwischen Berechnung und Messung tritt in beiden Fällen auf, Bild 5. Es lässt sich jedoch zeigen, dass das Gebäudemodell das hygrothermische Verhalten eines realen Raumes in guter Näherung wiedergibt.

4 Anwendungsbeispiel „Lüftungsstrategien“

In dem betrachteten Beispiel wird eine Modellwohnung (gemäß Bild 6) mit unterschiedlichen Lüftungssystemen betrachtet. Die Abbildung dieser Modellwohnung bzw. die Kopplung der Modellwohnung mit deren Anlagen in Modelica, stellen aufgrund der unterstützten generischen Konzepte der Sprache Modelica, wie beispielsweise Klassen- oder Aggregationsprinzip, keine Probleme dar.

Es ist also mit dem validierten Gebäudemodell der Modellbibliothek möglich, an einem praktischen Beispiel zu zeigen, wie die Kopplung von Gebäudemodell und Lüf-

tungssystemen eingesetzt werden kann, um simulativ die möglichen bauphysikalischen Konsequenzen der Sanierung eines Altbaus in Hinsicht auf den hygrothermischen und hygienischen Komfort sowie auf das Schimmelpilzrisiko zu untersuchen.

Dazu wird, um möglichst viele Bausituationen zu repräsentieren, die Modellwohnung in drei verschiedenen Ausführungen betrachtet. In der ersten Variante stellt die Wohnung einen Altbau (U-Wert der Außenwände von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) mit undichten Fenstern dar (natürlicher Infiltrationsluftwechsel von $0,7 \text{ h}^{-1}$). In der zweiten Variante wird die Wohnung mit der Altbaukonstruktion durch das Einbringen von dichteren Fenstern saniert (natürlicher Infiltrationsluftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$). In der letzten Variante wird der Altbau komplett mit Wärmedämmverbundsystem renoviert (U-Wert der Außenwände von $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$) und mit den dichten Fenstern der zweiten Variante betrachtet.

Für die weitere Untersuchung wird ein Raum der Modellwohnung (Wohnzimmer) intensiv betrachtet hinsichtlich der Gefahr einer schlechten Luftqualität, des Risikos der Schimmelpilzbildung, der Notwendigkeit der Einhal-

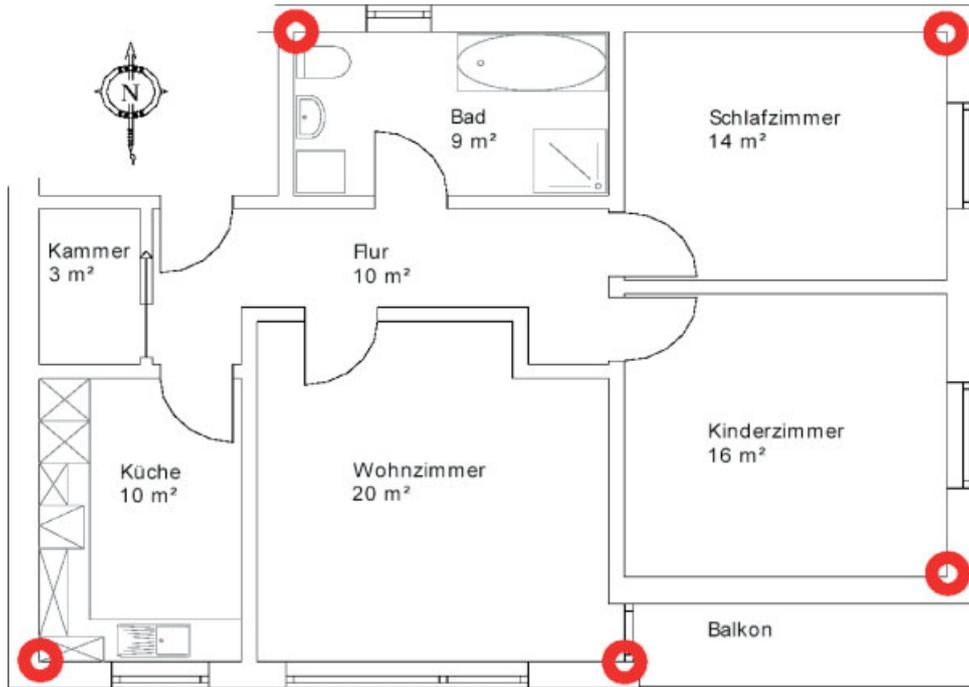


Bild 6. Grundriss der für die Berechnung ausgewählten 3-Zimmer-Modellwohnung; die Außenecken der Räume sind rot gekennzeichnet

Fig. 6. Ground plan for calculating the three-room model apartment selected: the outer room corners are marked in red

tung eines hygrothermischen Komforts aufgrund der Nutzung sowie eines erhöhten Energieverbrauchs. In der Außenwand des Wohnzimmers ist südseitig ein Fenster eingebaut mit einem U-Wert von $2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei der Variante 1 bzw. $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei den Varianten 2 und 3.

Für die Bewertung des hygrothermischen Komforts werden, ausgehend von Behaglichkeitsdiagrammen (siehe Bild 7), die Bedingungen zur Einhaltung der thermischen Behaglichkeit überprüft.

Die Bewertung der Luftqualität erfolgt durch Vergleich der berechneten CO_2 -Konzentration der Raumluft mit der maximal zulässigen CO_2 -Konzentration von 1200 ppm. Dieser Wert ist zulässig für Wohngebäude der Kategorie III [25].

Die Bewertung des Risikos des Schimmelpilzwachstums bzw. der Sporenauskeimung erfolgt mit Hilfe des Diagramms zur Bestimmung der Gefahr der Sporenauskeimung (siehe Bild 8).

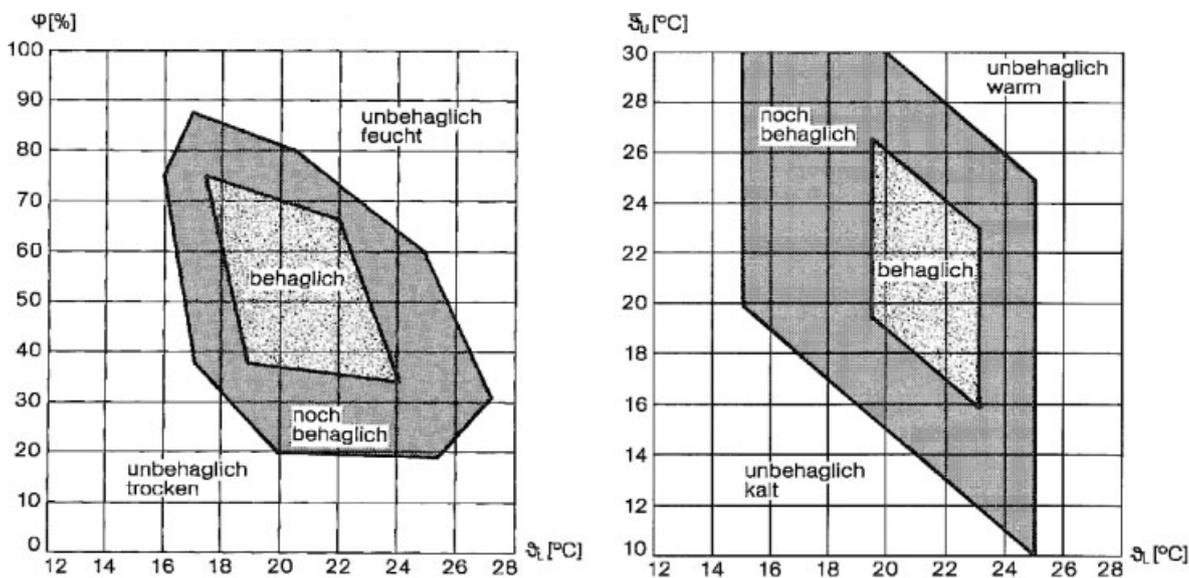


Bild 7. Zusammenspiel von Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte bei der thermischen Behaglichkeitsempfindung nach [17], [18], [19], [20], [21] (links); Zusammenspiel von Raumlufttemperatur und Raumumschließungsflächentemperatur bei der thermischen Behaglichkeitsempfindung nach [17], [18], [21] (rechts)

Fig. 7. Interaction of indoor air temperature and indoor air humidity for a thermal comfort sensation according to [17], [18], [19], [20], [21] (left); interaction of room air temperature and surface temperature for thermal comfort sensation according to [17], [18], [21] (right)

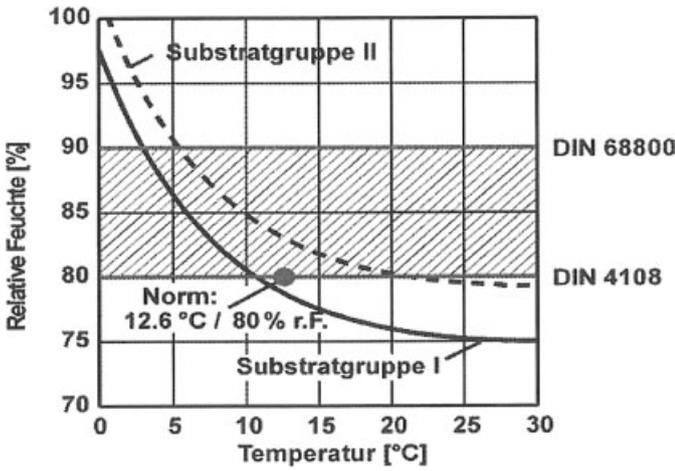


Bild 8. Vergleich der in DIN 4108 und DIN EN ISO 13788 als untere Wachstumsgrenze bezeichneten relativen Feuchte von 80 % mit den LIM (Lowest Isopleth for Mould) des Isoplethensystems für Sporenauskeimung. Ebenfalls dargestellt ist das in DIN 68800-2 genannte Materialfeuchte Kriterium von 20 M.-%, das sich mit Hilfe einer Sorptionsisotherme für Holz als relative Feuchte von 90 % angeben lässt [22]

Fig. 8. Comparison of the relative humidity of 80 % referred to in DIN 4108 and DIN EN ISO 13788 as lower growth limit with the LIM (lowest isopleth for mould) of the isopleth system for spores to germinate. Also illustrated is the material moisture criterion of 20 M.-% referred to in DIN 68800-2 which can be defined as relative moisture of 90 % with the aid of a sorption isotherm for wood [22]

Dabei werden Oberflächenmaterialien der Substratgruppe 1 zugrunde gelegt. Diese entsprechen dem durchschnittlichen Nährstoffangebot auf Bauteiloberflächen [23].

Bei allen Berechnungen wird die Raumlufttemperatur auf einen konstanten Wert von 20 °C geregelt, um den Heizenergiebedarf bei Anwendung der unterschiedlichen Lüftungsstrategien miteinander zu vergleichen.

Die eigentliche Bewertung der Lüftungssysteme erfolgt durch einen relativen Vergleich zwischen dem bedarfsgeregelten System, einer konstanten Lüftung und einer tradi-

tionellen Stoßlüftung. Für die konstante Lüftung wird eine Luftwechselrate von 0,6 h⁻¹ in dem Modell eingestellt. Für die Stoßlüftung wird bei der Simulation angenommen, dass die Fenster des Wohnzimmers dreimal täglich für 6 Minuten weit geöffnet werden (Luftwechselrate von 10 h⁻¹ [24], wenn der Raum betreten wird. Das bedarfsgeregelte Lüftungssystem regelt seine Luftwechselrate so, dass die Bedingungen zur Minimierung des Risikos der Schimmelpilzbildung unter Einhaltung eines hygrothermischen und hygienischen Komforts weitgehend erfüllt sind. Aufgrund der starken Kopplung zwischen den drei Effekten (Behaglichkeit, Schimmelpilz, Raumluftqualität) ist es nicht immer gewährleistet, dass die drei Kriterien gleichzeitig erfüllt sind.

In Bild 9 sind die Simulationsergebnisse der ersten (oben) und der zweiten Variante (unten) zu sehen.

In der ersten Variante (siehe Bild 9 oben) liegt bei Verwendung des bedarfsgeregelten Lüftungssystems die relative Feuchte ca. 60 % der Zeit in dem Behaglichkeitsbereich. Mit der konstanten Lüftung bzw. der Stoßlüftung liegen die berechneten relativen Feuchten ca. 40 % bzw. 50 % der Zeit in dem Komfort-Bereich. Es zeigt sich, dass die bedarfsgeregelte Lüftung bessere Ergebnisse gegenüber den anderen Lüftungsstrategien erzielt. Die Begründung dafür ist, dass sie „intelligent“ arbeitet und nur lüftet, wenn es nötig ist.

Aufgrund des hohen natürlichen Infiltrationsluftwechsels ist die CO₂-Konzentration bei dieser Variante in der Raumluft niedrig. Mit der bedarfsgeregelten Lüftung wird erreicht, dass diese Konzentration sich immer unterhalb der kritischen zulässigen Konzentration von 1200 ppm befindet. Mit der Verwendung der konstanten Lüftung bzw. der Stoßlüftung liegen die berechneten CO₂-Konzentrationen der Raumluft ca. 88 % bzw. 75 % der Zeit unterhalb der kritischen zulässigen Konzentration.

Das Schimmelpilzrisiko stellt bei allen Strategien aufgrund des hohen natürlichen Infiltrationsluftwechsels und des niedrigen Feuchtehaushalts des Raumes kein reelles Problem dar.

Bild 9 (unten) zeigt für den zweiten Fall die Konsequenzen einer Sanierung durch einen reinen Austausch

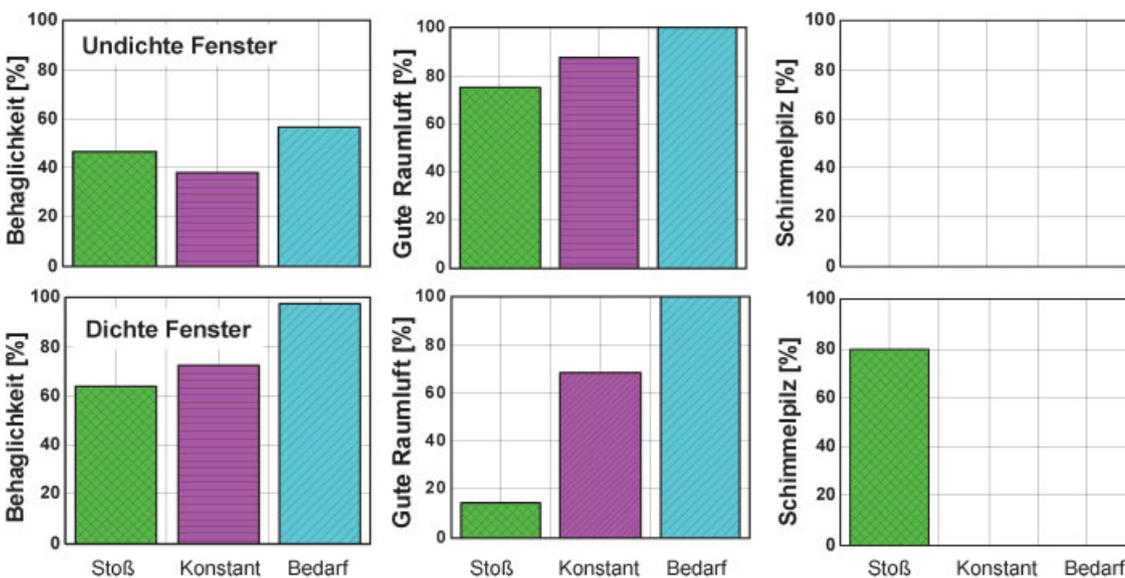


Bild 9. Berechnungsergebnisse für Variante 1 (oben) und Variante 2 (unten) mit den drei unterschiedlichen Lüftungsstrategien

Fig. 9. Calculation results for variants 1 (top) and variants 2 (bottom) with the three different ventilation strategies

des Wohnzimmerfensters in Hinblick auf den Komfort und das Risiko der Schimmelpilzbildung bzw. der Sporenauskeimung. Diese Maßnahme bewirkt eine Reduzierung des natürlichen Infiltrationsluftwechsels von 0,7 auf 0,1 h⁻¹.

Bei der Verwendung des bedarfsgeregelten Lüftungssystems liegt die relative Feuchte ca. 98 % der Zeit in dem Behaglichkeitsbereich. Mit der konstanten Lüftung bzw. der Stoßlüftung liegen die berechneten relativen Feuchten ca. 73 % bzw. 64 % der Zeit in dem Komfort-Bereich.

Aufgrund der Reduzierung des natürlichen Infiltrationsluftwechsels ist die CO₂-Konzentration in der Raumluft höher als bei der ersten Variante. Mit der bedarfsgeregelten Lüftung wird erreicht, dass die CO₂-Konzentration sich immer unterhalb der kritischen zulässigen Konzentration von 1200 ppm befindet. Mit der Verwendung der konstanten Lüftung bzw. der Stoßlüftung liegen die berechneten CO₂-Konzentrationen der Raumluft ca. 70 % bzw. 15 % der Zeit unterhalb der kritischen zulässigen Konzentration von 1200 ppm.

Das Schimmelpilzrisiko stellt nur bei der Stoßlüftung aufgrund des niedrigen natürlichen Infiltrationsluftwechsels und des hohen Feuchtehaushalts des Raumes ein reelles Problem dar. Bei dieser Lüftungsstrategie liegt die berechnete Oberflächenfeuchte der Ecke während 80 % der Zeit über der kritischen zulässigen Eckenfeuchte.

Bild 10 zeigt den Heizenergiebedarf bei Anwendung der drei unterschiedlichen Lüftungsstrategien für die Variante 1 (links) und 2 (rechts). Eine Renovierung der Modellwohnung durch Austausch der Fenster führt zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs bei allen Strategien. Aus den Bildern ist erkennbar, dass die Stoßlüftung energetisch das günstigste ist. Die bedarfsgeregelte Lüftung kommt an zweiter Stelle. Wenn der gesundheitliche Aspekt berücksichtigt wird, ist klar, dass die bedarfsgeregelte Lüftung als optimierte Lüftungsstrategie bei den betrachteten Fallbeispielen zu sehen ist, da sie sowohl einen hygrothermischen und hygienischen Komfort sicherstellt, als auch den Heizenergiebedarf reduziert.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird klar, dass eine bedarfsgeregelte Lüftung die Probleme, die nach einer Gebäudesanierung auftreten, mindern kann. Außerdem zeigt sich, dass der Nutzer nach einer Sanierung von Altbauten sein Lüftungsverhalten (bei Stoßlüftung) radikal ändern muss, um unter angenehmen hygrothermischen und hygienischen Bedingungen wohnen zu können.

Aus den Simulationsergebnissen wird mit dem Gebäudemodell und den unterschiedlichen Lüftungsstrategien rechnerisch folgendes belegt:

- Die Konsequenzen einer Gebäudesanierung lassen sich im Vorfeld auf einfache und kostengünstige Weise mit Hilfe der entwickelten Modellbibliothek durch Variationen von Ausgangsbedingungen gut quantifizieren.
- Der Einsatz der neu entwickelten Modellbibliothek kann dazu dienen, optimierte Lüftungsstrategien bzw. Lüftungssysteme zur Minimierung des späteren Betriebsaufwandes nach erfolgter Gebäudesanierung zu entwerfen.

5 Zusammenfassung

In [14] wurde eine neue Modelica-basierte Modellbibliothek *BuildingPhysicsLibrary* für die Berechnung des gekoppelten instationären Wärme-, Feuchte- und Lufttransports in Baukonstruktionen sowie für die hygrothermische Gebäudeanalyse mit starker Wechselwirkung zwischen Raumklima, Bauteilverhalten, Gebäudehülle und Gebäude-nutzung entwickelt.

Sie ermöglicht mit Hilfe von Simulationsrechnungen Antworten auf Fragestellungen wie die Verringerung des Heiz- und Kühlwärmebedarfs und das Sicherstellen eines hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen, die sich in der Gebäudeplanung bzw. der Gebäudesanierung stellen. Dabei nutzt sie die Vorteile der nicht berechnungskausalen objektorientierten Sprache Modelica, um Modelle mit einem hohen Grad an Flexibilität, Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit zu entwickeln.

Trotz der positiven Eigenschaften der neuen Modellbibliothek sowie der guten Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung lässt sich feststellen, dass die Simulationsrechnungen mit den entwickelten Modellen der *BuildingPhysicsLibrary* in bestimmten Fällen langsamer sind als die Modelle der klassischen Bausoftware. Dies liegt daran, dass die Modelle der klassischen Bausoftware bereits ein optimiertes angepasstes Lösungsverfahren besitzen. Die verwendeten numerischen Lösungsverfahren sind dort Teil der Modellentwicklung und optimiert auf den Typ des Modells. Ein großer Nachteil bei solch einem Ansatz ist, dass aufgrund der starren Implementierung der Modelle deren Erweiterbarkeit stark eingeschränkt ist.

Es steht nun für Forscher und Praktiker eine validierte, flexible, anwendbare und erweiterbare Modellbibliothek

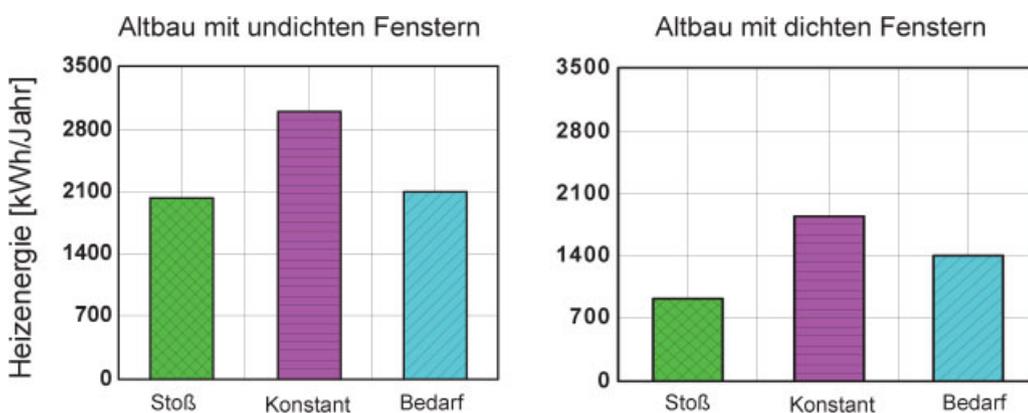


Bild 10. Heizenergie für Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts) mit den drei unterschiedlichen Lüftungsstrategien
Fig. 10. Heating energy for variants 1 (left) and variants 2 (right) with the three different ventilation strategies

für hygrothermische Berechnungen in der objektorientierten Modellierungsbeschreibungssprache Modelica zur Verfügung.

6 Ausblick

In den Modellen der Modellbibliothek *BuildingPhysicsLibrary* werden in der Arbeit dreidimensionale Effekte auf zwei- und eindimensionale Effekte zurückgeführt. Strömungseffekte werden vereinfacht modelliert. Da diese Effekte mit Hilfe von bestimmten FEM (Finite Elemente Methode)- oder CFD (Computational Fluid Dynamic)-Tools besser zu lösen sind, kann als zukünftige Untersuchung die Kopplung der entwickelten Modelle mit solchen Tools erfolgen, um beispielsweise den Einfluss von Strömungseffekten bzw. den dreidimensionalen Einfluss von Wärmebrücken in Gebäudekonstruktionen im Hinblick auf Behaglichkeit bzw. Schimmelpilzbildung besser untersuchen zu können. Die Kopplung des Gebäudemodells der Modellbibliothek *BuildingPhysicsLibrary* mit effizienten Tools für Regelungsalgorithmen wie Matlab/Simulink eröffnet die Möglichkeit, neue und optimierte Regelstrategien für Räume bzw. Gebäude zu entwickeln.

Die Absorption von CO₂ durch Wände bzw. Umschließungsflächen von Räumen wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Effekte, die damit verbunden sind, sollten noch untersucht und zukünftig in die Wandmodelle der *BuildingPhysicsLibrary* integriert werden.

Für die Bewertung des hygrothermischen Komforts bzw. der Gefahr der Sporenauskeimung wurde der Einfluss der Luftbewegung bzw. die Dauer der Überschreitung der LIM-Kurve derzeit nicht berücksichtigt. Diese Effekte könnten ebenfalls in weiteren Arbeiten in der Modellbibliothek berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] Glaser, H.: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. *Kältetechnik* 10 (1959), S. 345–349.
- [2] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Essen, 1983.
- [3] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [4] Grunewald, J.: Diffuser und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation, TU Dresden, 1997.
- [5] Nytsch-Geusen, C.: Berechnung und Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden und ihren energetischen Anlagen in einer objektorientierten Simulationsumgebung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001.
- [6] Felgner, F., Agustina, S., Bohigas, R. C., Merz, R., Litz, L.: Simulation of thermal building behaviour in modelica. Proceedings of the 2nd Modelica Conference, 2002.
- [7] Clarke, J. A.: *Energy Simulation in Building Design*. Oxford: Butterworth Heinemann, 1985.
- [8] Bonneau, D., Rongere, F., Coalet, D., Gauthier, B.: Clim2000 – Modular software for energy simulation in buildings. Proceedings of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), 1993.

- [9] Solar Energy Laboratory: TRNSYS a Transient System Simulation Program. University of Wisconsin-Madison. 1994.
- [10] Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., Winkelmann, F. C.: EnergyPlus: Creating a new-generation of building simulation program. *Energy & Buildings*, Vol. 33 (2001), No. 4, pp. 319–331.
- [11] Hagetoft, C.-E.: Thermal System Analysis Using Simulink, Development of a Building Physics Toolbox. Chalmers University of Technology Göteborg, 2000.
- [12] Modelica-Association: Modelica-Tutorial und Modelica-Semantics V2.0, 2002. <http://www.modelica.org>.
- [13] Rational: The Unified Modeling Language (UML). Version 1.3. (1999). <http://www.jollervoss.ch>.
- [14] Noudui, T.: Entwicklung einer objektorientierten Modellbibliothek zur Ermittlung und Optimierung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [15] Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): WUFI: Software zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen. 1994. <http://www.wufi.de>.
- [16] Hagetoft, C.-E.: HAMSTAD WP2 Modeling, Version 4. Report R-02:9. Chalmers University of Technology Göteborg, 2001.
- [17] Franck, W.: Die Erfassung des Raumklimas mit Hilfe richtungsempfindlicher Frigorimeter. *Berichte aus der Bauforschung*, Heft 104. Berlin: Ernst & Sohn, 1968.
- [18] Franck, W.: Raumklima und thermische Behaglichkeit. *Gesundheits-Ingenieur* 89 (1975), S. 301 ff.
- [19] Green, G. H.: Die Wirkung der relativen Luftfeuchtigkeit auf Abwesenheit und Erkältungen in Schulen. *Klima + Kälte-Ingenieur* (1975), S. 51 ff.
- [20] Green, G. H.: The positive and negative effects of building humidification. *ASHRAE Transactions*, Vol. 88 (1982), Part 1.
- [21] Beckert, J., Mechel, F., Lamprecht, H.-O.: *Gesundes Wohnen. Wechselbeziehungen zwischen Mensch und gebauter Umwelt; ein Kompendium*. Beton-Verlag, 1986.
- [22] Krus, M., Sedlbauer, K.: *Feuchteschutz und Biohygrothermik*. Vorlesungsskript, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Freilandversuchsstelle Holzkirchen, 2001.
- [23] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [24] Rauch, P.: *Schimmelpilze in Wohngebäuden – Ursachen, Vermeidung und Sanierung*. 2. Aufl. Leipzig: Verlag Peter Rauch Verlag, 2007.
- [25] DIN EN 15251:2007-08 Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Thierry Noudui, Abt. Raumklima, Klimawirkung, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Beide:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley
 Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen, Lehrstuhl für Versorgungsplanung und Versorgungstechnik, Universität der Künste Berlin, Fakultät Gestaltung, Institut für Architektur und Städtebau, Hardenbergstraße 33, 10623 Berlin
 Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl, Professor für Bauklimatik, Fakultät Architektur, Bauhaus-Universität Weimar, 99421 Weimar