

Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI®-Plus

Gut abgestimmte raumklimatische Bedingungen bzgl. Wärme, Feuchte und Luftqualität sind notwendig um negative Auswirkungen auf die Nutzer und die Bausubstanz zu vermeiden. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss verschiedener Wandaufbauten auf den Feuchteverlauf und die Pufferung von Feuchtespitzen in Innenräumen. Anstelle von aufwendigen Versuchen werden zunehmend Softwareprogramme zur Simulation der raumklimatischen Parameter verwendet. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) hat die Software WUFI®-Plus [1] zur hygrothermischen Simulation des Raumklimas entwickelt. Damit ist es möglich, die Temperatur und Feuchte in Wand- und Deckenkonstruktionen sowie in der Raumluft und den Energieverbrauch eines Gebäudes zu simulieren. Im Rahmen des internationalen IEA-Annex 41 Projektes „Moist-Eng“ wurde ein „common exercise“ zur Validierung solcher Softwaremodelle durchgeführt. Zur Ermittlung des Feuchtepufferverhaltens wurden Versuche in Holzkirchen in zwei identischen Versuchsräumen mit verschiedenen Wandinnenoberflächen durchgeführt. Die Messergebnisse wurden für Validierungsberechnungen der 13 am „common exercise“ beteiligten Softwaretools verwendet.

Development and validation of the hygrothermal indoor climate simulation software WUFI®-Plus. *Well-balanced conditions of thermal, moisture and air quality are very important in buildings because an imbalance of these factors could have significant influences on the construction and the inhabitants. The focus of this paper is the influence of different materials on the fluctuation of relative humidity specifically humidity peaks. In lieu of complicated and expensive laboratory testing several different software tools have been developed to estimate the indoor environmental conditions of buildings. The Fraunhofer-Institute for Building Physics (IBP) developed a hygrothermal simulation tool. With this software the temperature and moisture conditions of the walls, ceiling and floor constructions, of the indoor air and the energy consumption for the building can be calculated. In the context of the IEA-Annex 41 project „Moist-Eng“ a common exercise has been carried out for the validation of such software tools. For the common exercise at the free field investigation area in Holzkirchen (Germany) two identical rooms were used to measure the moisture buffering capacity of several interior finish systems. To address the questions of buffering capacity the IBP developed a hygrothermal simulation tool, WUFI®-Plus [1]. Using the measurement data from the common exercise calculations were carried out with several software tools for the validation of it. In this paper the results of the laboratory tests and simulation results are described.*

1 Einleitung

Die Thematik Behaglichkeit und Wohlbefinden in Innenräumen spielt eine große Rolle, da die Ansprüche der Menschen weltweit steigen. Für ein ausgeglichenes behagliches Raumklima ist ein Gleichgewicht zwischen dem Wärme-, Feuchte- und Lufthaushalt ausschlaggebend. Ein Ungleichgewicht dieser Faktoren kann maßgebliche Auswirkungen auf die Konstruktion und die Bewohner, wie z. B. eine Schädigung der Bausubstanz, Reduzierung der Behaglichkeit und erhöhten Energieaufwand, haben. Durch höhere Anforderungen an die Energieeffizienz und Luftdichtheit von Gebäuden [2] und Änderung der Lebensgewohnheiten der Bewohner treten in den letzten Jahren vermehrt Schimmelpilzprobleme in Wohngebäuden auf. Eine wesentliche Ursache liegt in der reduzierten Luftwechselrate und veränderten Lüftungsgewohnheiten der Nutzer. In diesem Zusammenhang gibt es vermehrt Diskussionen über die Einflüsse von zu hohen Feuchteverhältnissen in Hinblick auf das Schimmelpilzrisiko, aber auch über die Einflüsse auf die Gesundheit der Bewohner, denn auch zu niedrige Feuchten können Probleme verursachen, wie z. B. zu trockene Schleimhäute und Augen [3].

Die Beurteilung des hygrothermischen Raumklimas ist durch aufwendige und kostenintensive Untersuchungen möglich. Um eine einfachere und kostengünstigere Lösung für die Bewertung des sich einstellenden Raumklimas zu finden, wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) ein hygrothermisches Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt. Mit Hilfe des Rechenmodells WUFI®-Plus [4], das eine Verknüpfung von energetischer Gebäude- und hygrothermischer Bauteilberechnung beinhaltet, ist eine situationsbedingte Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse sowohl im Gebäude als auch in seinen Umschließungsflächen möglich. In Abhängigkeit vom Außenklima sowie von den Heizungs- und Lüftungsgegebenheiten sind die hygrothermischen Bedingungen im Raum und an den Innenoberflächen genauso bestimmbar wie die Wärmeverluste durch Transmission, Verdunstung und Lüftung. Im Folgenden soll neben der theoretischen Ableitung des Rechenmodells auch dessen Anwendung für Validierungsberechnungen gezeigt werden.

Für eine erfolgreiche Umsetzung dieses und anderer Berechnungsprogramme wurde im Rahmen des interna-

tionalen IEA-Annex 41 Projektes Moist-Eng eine „gemeinsame Aufgabe“ („common exercise“) für die Weiterentwicklung und Validierung der Softwaretools durchgeführt. Im Rahmen dieses „common exercise“ werden Freilandexperimente in Räumen zum Feuchtepufferverhalten von Materialien mit verschiedenen Simulationsmodellen verglichen.

Das Feuchtepufferverhalten ist u. a. abhängig von den Sorptions- und Diffusionseigenschaften der Materialien, wobei Hystereseinflüsse zwischen Ab- und Desorption einen großen Einfluss auf das Pufferverhalten haben können. Um den Einfluss verschiedener Materialien auf das Raumklima zu untersuchen werden mehrere Varianten gemessen. Die ermittelten Daten werden in einem „common exercise“ zusammengefasst und im Rahmen des Projektes von verschiedenen Teilnehmern für Validierungsberechnungen eingesetzt, wobei der wesentliche Punkt darin besteht im Rahmen dieser Validierung die Feuchteverhältnisse nachzubilden. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgen nachfolgend mit dem Hauptaugenmerk auf den Vergleichen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen, die mit dem neuentwickelten hygrothermischen Raumklimamodell WUFI®-Plus erstellt wurden. Die Umsetzung und Anwendung des raumklimatischen Simulationstools wird nachfolgend näher erläutert.

2 Ableitung des Modellansatzes zum hygrothermischen Raummodell

Ein Raum besteht aus wärme- und feuchtespeichernden bzw. nicht speichernden, z. T. transparenten Raumumschließungsflächen, der Raumluft und aus inneren Speichermassen (z. B. Zwischenwände, -decken, Einrichtungsgegenstände). Der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport in den raumumschließenden Bauteilen kann mit Hilfe folgender partieller Differentialgleichungen beschrieben werden [5]:

Wärmetransport im Bauteil

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Feuchtetransport im Bauteil

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (2)$$

mit:

D_w	Flüssigtransportkoeffizient [m ² /s]
H	Enthalpie des feuchten Baustoffs [J/m ³]
h_v	Verdunstungsenthalpie des Wassers [J/kg]
p_D	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
u	Wassergehalt [m ³ /m ³]
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft [kg/msPa]
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs [W/mK]
μ	Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs [-]
ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m ³]
φ	relative Feuchte [-]
t	Zeit [s].

Diese gekoppelten Transportgleichungen müssen für jedes Bauteil separat gelöst werden. Neben der genauen Definition des jeweiligen Bauteilaufbaus mit den entsprechenden Materialparametern ist dazu auch die Vorgabe der inneren und äußeren Randbedingungen erforderlich. Die äußeren Klimabedingungen werden i. d. R. nicht nennenswert durch das Gebäude oder seine Bauteile beeinflusst. Das Raumklima wird jedoch in erheblichem Maße durch die hygrothermischen bzw. strahlungstechnischen Eigenschaften der transparenten und opaken Umschließungsflächen mit bestimmt. Deshalb muss für eine realitätsnahe Erfassung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Raum der Schritt „von der Wand zum Raum“ gemacht werden.

Aufgrund der breiten Anwendung von energetischen Berechnungsprogrammen wird hier nur kurz auf die Aufstellung der Energiebilanz eingegangen. Grundlage der Berechnung der Raumlufttemperatur ϑ_i ist die Bilanz der Wärmeströme im Raum. ϑ_i ist abhängig vom Wärmeeintrag über die Raumumschließungsflächen (Transmission und Sonneneinstrahlung), vom direkten Luftaustausch durch natürliche Lüftung und ggf. von den raumlufttechnischen (RLT) Anlagen sowie von den internen Wärmelasten. Um das instationäre hygrothermische Verhalten eines Gebäudes berechnen zu können, müssen die RLT-Anlagen mit den zur Verfügung stehenden Leistungen, die hygrothermischen Sollwerte, die internen Wärme- und Feuchtelasten und die Regelungsstrategien vorgegeben werden. Das Lüftungsgeschehen durch Öffnen von Fenstern und Türen ist durch eine entsprechende Variation des Luftwechsels berücksichtigt. Für die Wärmebilanz eines Raumes gilt Gl. (3). Sie beschreibt die dynamische Enthalpie-Schwankung der Raumluft infolge der Summe der zu- und abfließenden instationären Wärmeströme.

Wärmebilanz des Raumes

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} = \sum_j A_j \alpha_j (\vartheta_j - \vartheta_i) + \dot{Q}_{\text{Sol}} + \dot{Q}_{\text{IWQ}} + n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i) + \dot{Q}_{\text{RLT}} \quad (3)$$

mit:

ρ	Dichte der Raumluft [kg/m ³]
α_j	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
ϑ_a	Außenlufttemperatur [°C]
ϑ_j	Raumumschließungsflächentemperatur [°C]
ϑ_i	Innenlufttemperatur [°C]
t	Zeit [s]
A_j	Raumumschließungsflächen [m ²]
c	spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kgK]
n	Luftwechsel [h ⁻¹]
\dot{Q}_{Sol}	kurzwellige Sonneneinstrahlung, die direkt zu einer Erwärmung der Innenluft bzw. Inneneinrichtungsgegenstände führt [W]
\dot{Q}_{IWQ}	interne Wärmequellen durch Personen, Beleuchtung und Geräte [W]
\dot{Q}_{RLT}	Wärmestrom der durch raumlufttechnische Anlagen (RLT) zu bzw. abgeführt wird [W]
V	Raumvolumen [m ³].

Die Feuchtebilanz des Raumes ergibt sich aus den Feuchteströmen durch die inneren Bauteiloberflächen, die nut-

zungsbedingte Feuchteproduktionsrate und der Feuchtezufuhr bzw. -abfuhr durch die RLT-Anlage oder durch natürlichen Luftaustausch mit der Außenluft:

Feuchtebilanz des Raumes

$$V \cdot \frac{dc_i}{dt} = \sum_j A_j \dot{g}_{wj} + n \cdot V(c_a - c_i) + \dot{W}_{IFQ} + \dot{W}_{RLT} \quad (4)$$

mit:

- c_a Absolute Feuchte der Außenluft [kg/m^3]
- c_i Absolute Feuchte der Raumluft [kg/m^3]
- \dot{g}_{wj} Feuchtestrom von der Wandinnenoberfläche zum Raumluft [$\text{kg}/(\text{sm}^2)$]
- \dot{W}_{IFQ} Feuchteproduktion im Raum [kg/h]
- \dot{W}_{RLT} Feuchtezu- bzw. abfuhr durch raumlufttechnische Anlagen [kg/h].

Die jeweiligen Oberflächentemperaturen und -feuchten bzw. Wärme- und Feuchteströme über die Raumschließungsflächen werden mit Hilfe der Transportgleichungen (1) und (2) für die Bauteile bestimmt. Die dazu erforderlichen raumseitigen Randbedingungen stammen aus der Lösung der Raumbilanzgleichungen (3) und (4). Die Kopplung der Gleichungssysteme erfolgt iterativ mit Hilfe adaptiver Unterrelaxationsalgorithmen. Durch implizite Formulierungen bei der Diskretisierung der Transport- und der Raumbilanzgleichungen wird die numerische Stabilität des Lösungsverfahrens auch für größere Zeitschritte sichergestellt.

3 Validierung

Vergleichsberechnungen mit anderen rein energetischen Programmen [4] und mit den laut VDI 6020 [6] vorgesehenen Beispielrechnungen zur Validierung von energetischen Raumsimulationsprogrammen liefern Ergebnisse, die im Bereich der z. B. in [6] angegebenen Schwankungsbreiten liegen. Der experimentelle Nachweis wird durch die folgend beschriebenen Untersuchungen im Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen erbracht.

3.1 Experimentelle Untersuchungen

Versuchsaufbau

Für die Experimente stehen zwei identische Räume in einem Versuchsgebäude aus den 1980er Jahren mit einer West-Ost-Ausrichtung zur Verfügung, wobei die beiden Ver-

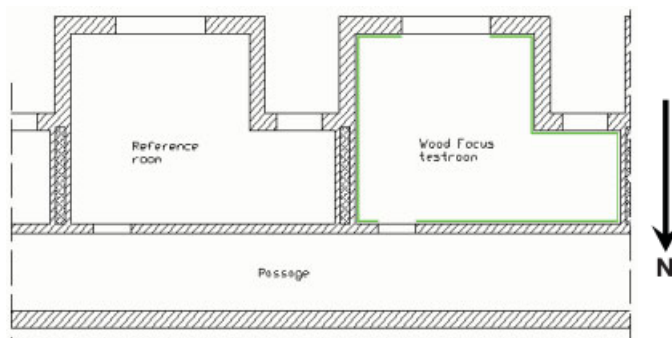


Bild 1. Grundriss und Lage der beiden Versuchsräume im Gebäude [7]

Fig. 1. Ground plan of the two test rooms [7]

suchsräume nach Süden orientiert sind. Der Grundriss des Gebäudes ist mit der Lage der Räume in Bild 1 dargestellt.

Die Außenwände der Räume sind aus 24 cm Ziegel und 10 cm Polystyrol-Außendämmung aufgebaut, der U-Wert der Wände beträgt $0,32 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Auf der Südseite ist jeweils ein Fenster mit einem U-Wert von ca. $1,1 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,6 eingebaut. Die Innenwände zu den angrenzenden Räumen sind durch ihren Konstruktionsaufbau thermisch entkoppelt. Dadurch werden die Versuchsräume nicht von den umliegenden Randbedingungen im Gebäude beeinflusst [7].

Im Folgenden wird als Referenzraum der Raum bezeichnet, der einen herkömmlichen gestrichenen Innenputz als Wandoberfläche hat. Der Testraum ist in Geometrie und Dimension mit dem Referenzraum identisch. Der Unterschied zum Referenzraum besteht darin, dass die Wand- und Deckenoberflächen mit Aluminiumfolie beklebt wurden, um das Sorptionsvermögen der Oberflächen zu verhindern. Die Dampfsperre garantiert, dass vom ursprünglichen Putz unter der Aluminiumfolie kein Einfluss auf den Feuchtehaushalt des Raumes zu erwarten ist. Es wird also ausschließlich die Wirkung der neu eingebrachten Bekleidungen bestimmt. Der Fußboden besitzt in beiden Räumen einen PVC-Belag, der ebenfalls als feuchtetechnisch inert anzusehen ist. Jeder der Räume hat ein Volumen von etwa 50 m^3 und eine Raumbooberfläche (ohne Fußboden, Fenster und Tür) von etwa 67 m^2 .

Die Raumlufttemperatur in den Versuchsräumen wird auf konstant 20 °C geregelt. Einen wesentlichen Einfluss kann der Raumluftwechsel durch Infiltration über Fugen und sonstige Undichtigkeiten haben. Die natürliche Luftwechselrate wurde in beiden Versuchsräumen durch Abkleben von Fehlstellen reduziert. Die Luftwechselrate wurde in beiden Räumen mittels Blower-Door-Messverfahren ermittelt und ergab bezogen auf mittlere Druckdifferenzen für den Referenzraum einen Luftwechsel von $n = 0,04 \text{ h}^{-1}$ und für den Testraum $n = 0,03 \text{ h}^{-1}$. In beiden Versuchsräumen befindet sich eine Lüftungsanlage, die für einen konstanten Luftwechsel sorgt (nach DIN 4108-2 [2] muss bei einer mechanischen Belüftung von Wohnräumen ein Mindestluftwechsel von $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ vorliegen). Der Luftwechsel wird mithilfe eines Volumenstromreglers in der Lüftungsanlage winddruckabhängig geregelt. Damit ist ein konstanter Luftwechsel gewährleistet. Die Luftwechselraten bei Betrieb der Lüftungsanlagen wurden durch Tracer-Gas-Messungen erfasst und liegen im Referenzraum bei $n = 0,63 \text{ h}^{-1}$ und im Testraum bei $n = 0,66 \text{ h}^{-1}$.

Zur realitätsnahen Beurteilung des Verlaufs der relativen Raumluftfeuchte in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten wird täglich jeweils eine Feuchtemenge von $2,4 \text{ kg}$ in die Räume eingebracht, die eine normale Nutzung in einem 3-Personen-Haushalt [8] simuliert. Für die Differenzierung der kurz- und längerfristigen Feuchtepufferung der raumschließenden Flächen wird ein möglichst praxisnaher, täglich sich wiederholender Feuchteproduktionszyklus gewählt, dessen Spitzen eine kurze aber hohe Intensität am Morgen und eine etwas längere und mäßige Intensität am Abend besitzen. Das Feuchteprofil [9] (Bild 2) weist somit zwei Feuchtespitzen auf, morgens von 6 bis 8 Uhr und nachmittags von 16 bis 22 Uhr. Diese Spitzen simulieren Duschen, Waschen, Kochen und die Anwesenheit von Menschen. Die Feuchtigkeit

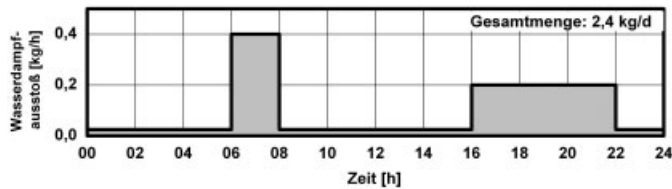


Bild 2. Zeitlicher Verlauf der Feuchteproduktion in den zwei Versuchsräumen [9]

Fig. 2. Course of the daily humidity generation in the two test rooms [9]

wird durch den Einsatz von Ultraschallverdampfern, die mit einer Zeitschaltuhr geregelt werden, nach dem angegebenen Feuchteprofil in Bild 2 produziert.

Zur Erfassung der raumklimatischen Verhältnisse sind in den Versuchsräumen Temperatur- und Feuchtesensoren angebracht. Messtechnisch erfasst werden Oberflächentemperaturen der Wände, Temperaturschichtungen in der Mitte der Räume sowie die relative Raumluftfeuchte. Der Energieverbrauch der Heizungen wird durch Leistungsmesser erfasst. Für die Versuchsauswertung wird nachfolgend die Temperatur- und Feuchte in Raummitte betrachtet. Die Messdaten werden mithilfe des IMEDAS® Messdatenerfassungssystem kontinuierlich aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert und anschließend ausgewertet.

Variantenplan

Bevor das Testmaterial in den Testraum eingebracht werden kann, wird das Material vorkonditioniert, um einen definierten Ausgangszustand für die Versuche zu gewährleisten. Die untersuchten Gipskartonplatten werden dazu über einen Zeitraum von mehreren Wochen bei einem Klima von 20 °C und 50 % r.F. gelagert. Nach der erfolgten Akklimatisation kann mit der Untersuchung begonnen werden.

Die Abfolge der durchgeführten Experimente ist in Tabelle 1 aufgelistet. Der erste Messzyklus mit einem leeren Testraum, d.h. mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke, dient zur Kontrolle. Im weiteren Verlauf werden ungestrichene und gestrichene Gipskartonplatten an den Wänden angebracht. Abschließend wird das Raumklima im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an den Wänden und der Decke in Step 4 berechnet.

Tabelle 1. Versuchsschritte
Table 1. Test programme

Variante	Material im Testraum	Projizierte Fläche [m ²]
Step 1	Aluminiumfolie – Wände und Decke	67
Step 2	Gipskartonplatten – Wände	45
Step 3	gestrichene Gipskartonplatten – Wände	45
Step 4	gestrichener Gipsputz – Wände und Decke	67

Vergleich der einzelnen Untersuchungen

Die Reduktion der feuchteproduktionsbedingten Ausschläge der Raumluftfeuchte im Testraum in Relation zur Situation im verputzten Referenzraum ist ein Maß für die Feuchtepufferwirkung der im Testraum eingebrachten Materialien. Die Messergebnisse verschiedener Materialien und des Farbanstriches sollen den Einfluss der verschiedenen Sorptions- und Diffusionseigenschaften der Produkte in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten darstellen. Der Ergebnisse der Varianten aus Tabelle 1 sind in Bild 3 dargestellt. Da der unbedeckte Testraum so gut wie keine hygroskopische Feuchtepufferkapazität besitzt, sind dort die Feuchteamplituden größer als im verputzten Referenzraum. Allen untersuchten Bekleidungen ist gemeinsam, dass sie eine größere Feuchtepufferung besitzen als der gestrichene Innenputz, auch wenn die eingebrachte Testfläche kleiner ist als im Referenzraum.

Ein interessanter Effekt zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse des gestrichenen mit den ungestrichenen Gipskartonplatten. Erwartungsgemäß wird durch den Diffusionswiderstand des Anstriches die Feuchtepufferwirkung deutlich reduziert. Dies ist aber bei der kurzfristigen hohen Feuchtebelastung von 0,8 kg am Morgen wesentlich ausgeprägter als bei der längerfristigen andauernden Belastung am Nachmittag mit 1,2 kg. Bei den gestrichenen Gipskartonplatten ist deshalb bei der nachmittäglichen Feuchtelast im Vergleich zum Referenzraum eine stärkere Absenkung der Amplitude (rechter Balken in Bild 3) als bei der morgendlichen Feuchtelast (linker Balken in Bild 3) zu beobachten. Beim unbedeckten Gipskarton verhält es sich gerade anders herum.

Der zusätzliche Diffusionswiderstand der Farbe reduziert die Ab- und Desorptionsgeschwindigkeit des darunter liegenden Materials. Der Einfluss des Farbanstriches ist während der morgendlichen, hohen Feuchteproduktion deutlicher, als am Nachmittag. Die Unterschiede am Morgen und am Nachmittag zwischen den Höhen der Amplituden der ungestrichenen und der gestrichenen Gipskarton-

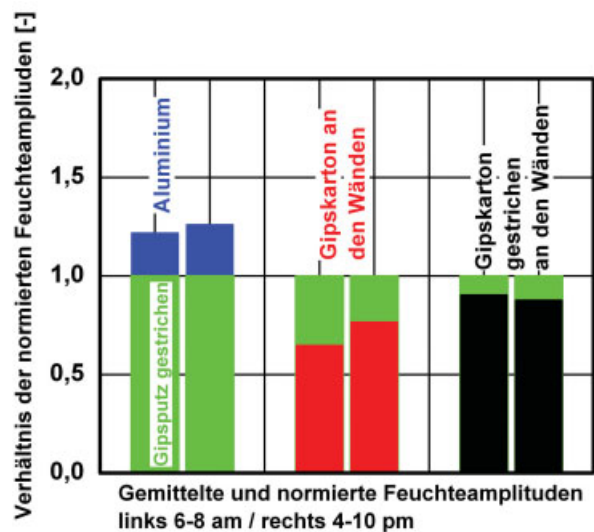


Bild 3. Zusammenstellung der gemittelten und normierten Feuchteamplituden der verschiedenen Versuchsvarianten bezogen auf die Verhältnisse im Referenzraum (Step 4 – Validierung)
Fig. 3. Comparison of the averaged and standardized humidity amplitudes of the different test variations in relation to the conditions in the reference room (step 4 – validation)

platten im Vergleich zum gestrichenen Gipsputz sind deutlich zu sehen. Die Erklärung dieses Effektes liegt darin, dass während einer länger andauernden Feuchteproduktion, wie am Nachmittag, die Sorptionsisotherme des Materials und bei einer kurzen intensiven Feuchteproduktion der Diffusionswiderstand der obersten Schicht in Hinblick auf das Pufferverhalten ausschlaggebend sind.

3.2 Validierungsberechnungen und Ergebnisse

Für eine erfolgreiche Durchführung von Validierungsberechnungen ist eine genaue Kenntnis aller erforderlichen Konstruktionsdetails und Randbedingungen während der Versuche erforderlich. Da bei der experimentellen Versuchsdurchführung alle wichtigen Klimadaten messtechnisch erfasst wurden sowie die Aufbauten der Umschließungsflächen bekannt sind, sind die wesentlichen Voraussetzungen gegeben. Alle Daten über den Konstruktionsaufbau, den Luftwechsel, die Feuchteproduktion und die Klimadaten, die angrenzenden Räume sowie die Außenklimabedingungen wurden allen Teilnehmern des „common exercise“ zur Verfügung gestellt. Bevor die Validierungsberechnungen beginnen können ist es notwendig, alle vorhandenen und notwendigen Daten in das Programm zu implementieren.

Das Ziel dieser Validierungsberechnungen liegt darin, die Verläufe der relativen Raumluftfeuchten realistisch mit entsprechenden Softwaretools abzubilden, deshalb werden im weiteren Verlauf nur die Verläufe der relativen Feuchten aus Messung und Berechnungen dargestellt. Die relative Raumluftfeuchte wird anhand der Messstelle in der Mitte der Versuchsräume ausgegeben. Die Temperatur in den Räumen wird auf 20 °C geregelt und alle Berechnungsergebnisse zeigen hier gute Übereinstimmungen, so dass nachfolgend die relativen Feuchten ohne Probleme betrachtet werden können.

Im Rahmen vom IEA-Annex 41 Projekt werden die Steps 1, 2 und 4 für Validierungsrechnungen herangezogen. Der Step 3 mit gestrichenen Gipskartonplatten ist nicht Bestandteil des Projektes, wird aber für eine weitere Validierungsberechnung mit WUFI®-Plus verwendet.

Während der ersten Versuchsphase von Step 1, in der im Testraum nur Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke angebracht ist, ist kein Sorptionsverhalten möglich. Ziel dieser Variante ist die Innenraumverhältnisse ohne sorptive Materialien und nur anhand der bekannten Luftwechselrate zu berechnen. Die Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen mit 13 verschiedenen Simulationstools aus Step 1 sind in Bild 4 für zwei beispielhafte Tage dargestellt. Der größte Einfluss auf das Innenraum-

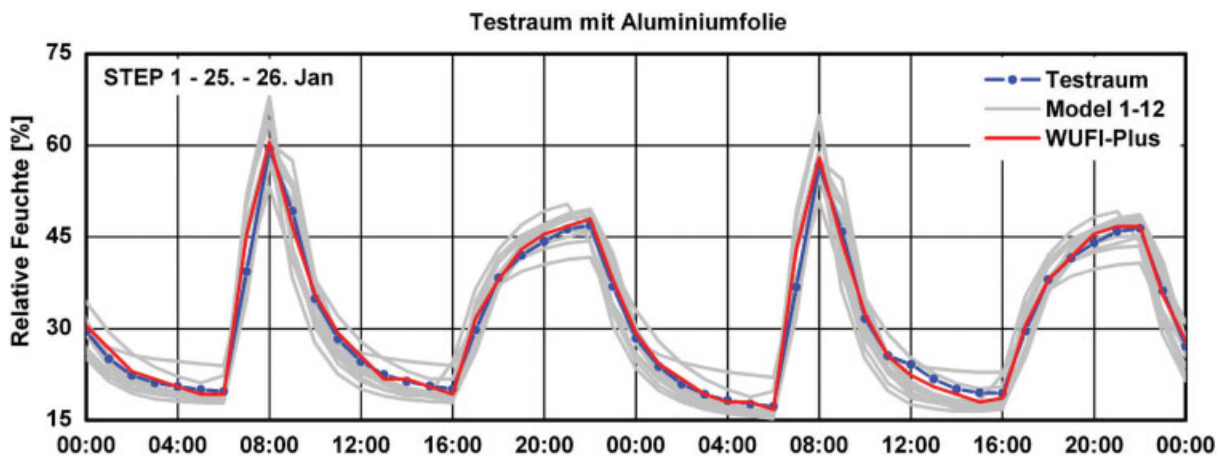


Bild 4. Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumluftfeuchten im Testraum mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke

Fig. 4. Courses of the relative humidity in the test room where all surfaces are completely covered with aluminium foil

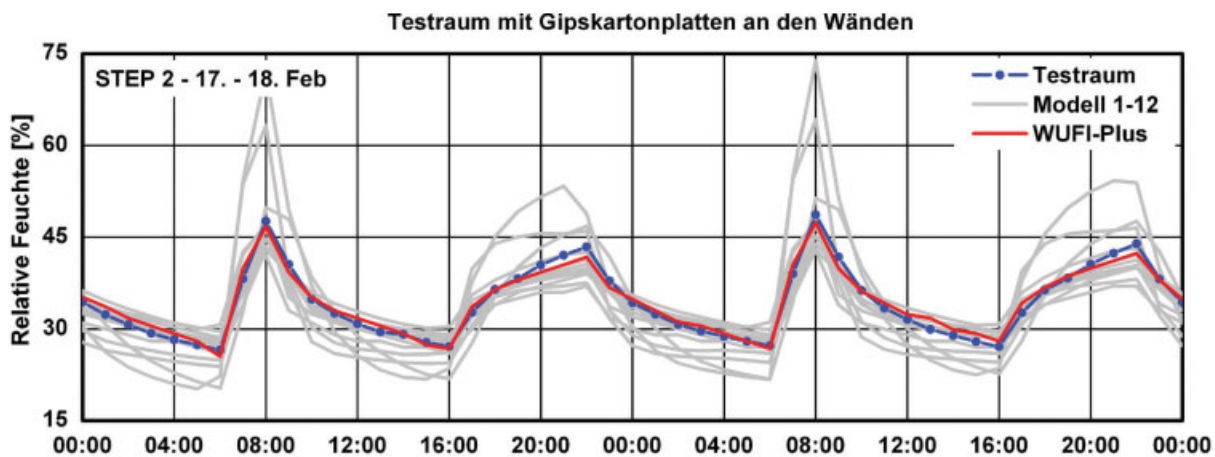


Bild 5. Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumluftfeuchten im Testraum mit ungestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden

Fig. 5. Courses of the relative humidity in the test room with gypsum boards on the walls

klima entsteht in diesem Fall durch die Luftwechselrate von $0,66 \text{ h}^{-1}$ im Testraum. Im Vergleich der berechneten Feuchtwerte mit den gemessenen liegen die Ergebnisse in einem tolerierbaren Bereich und es kommt zu einer guten Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnungen.

Step 2 wird mit ungestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum durchgeführt. Die Fläche der sorptiven Oberfläche beträgt ca. 45 m^2 . Bei dieser Variante wird das Feuchtepufferverhalten im Verlauf der Raumluftfeuchte im Vergleich zu Step 1 deutlich. Die Ergebnisse aus Messung und Berechnungen sind in Bild 5 dargestellt.

Die Streuung der Ergebnisse ist hier sehr hoch. Während der zwei Befeuchtungsphasen liegen bei Step 2 die Feuchten zwischen -5 bis $+30 \%$ r. F. entfernt von den Messergebnissen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass einige Modelle Probleme haben, das Feuchtepufferverhalten der Gipskartonplatten realistisch nachzubilden. Die Berechnungen mit WUFI®-Plus zeigen respektable Ergebnisse auf. Die Ergebnisse von WUFI®-Plus zeigen, dass die Feuchtespitzen sehr gut abgebildet werden können.

Da Gipskartonplatten in Räumen normalerweise nicht ungestrichen zum Einsatz kommen, wurde ein weiterer Versuch mit gestrichenen Gipskartonplatten an den

Wänden durchgeführt. Die angewendete Farbe weist einen s_d -Wert von $0,34 \text{ m}$ auf. Die Ergebnisse der Messung werden nur für eine weitere Validierung von WUFI®-Plus eingesetzt (Bild 6), da Step 3 kein Bestandteil vom „common exercise“ des IEA-Annex 41 Projektes ist.

Die Untersuchungen mit einem zusätzlichen Anstrich auf der Oberfläche zeigen den Einfluss auf das Feuchtepufferverhalten des darunter liegenden Materials. Die Ergebnisse der Berechnungen mit WUFI®-Plus zeigen in diesem Step gute Übereinstimmungen mit den Messungen.

Im Zusammenhang mit dem durchgeführten „common exercise“ erfolgt der letzte Schritt der Validierungsrechnungen. Bei dieser Variante wird der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an den Wänden und der Decke ermittelt. Der eingesetzte Anstrich hat einen s_d -Wert von $0,15 \text{ m}$. Die Ergebnisse der Berechnungen mit 13 Simulationstools sind in Bild 7 dargestellt. Darin ist deutlich zu sehen, dass die meisten Simulationstools keine großen Schwierigkeiten aufweisen, um den Verlauf der relativen Luftfeuchte realistisch abzubilden. Die Streuung der Ergebnisse liegt im Bereich von $\pm 5\%$ r.F. zur Messung.

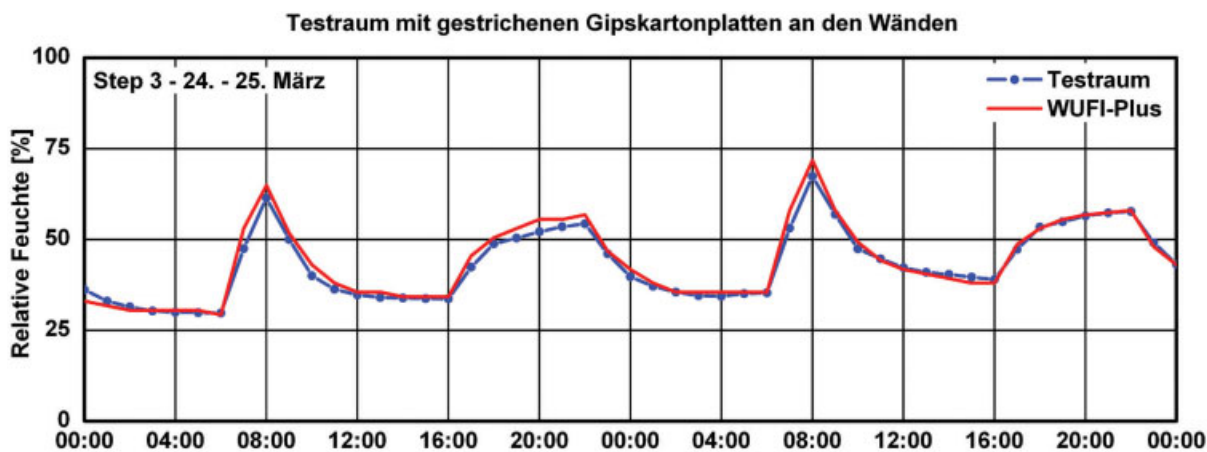


Bild 6. Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumluftfeuchten im Testraum mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden

Fig. 6. Courses of the relative humidity in the test room with painted gypsum boards on the walls

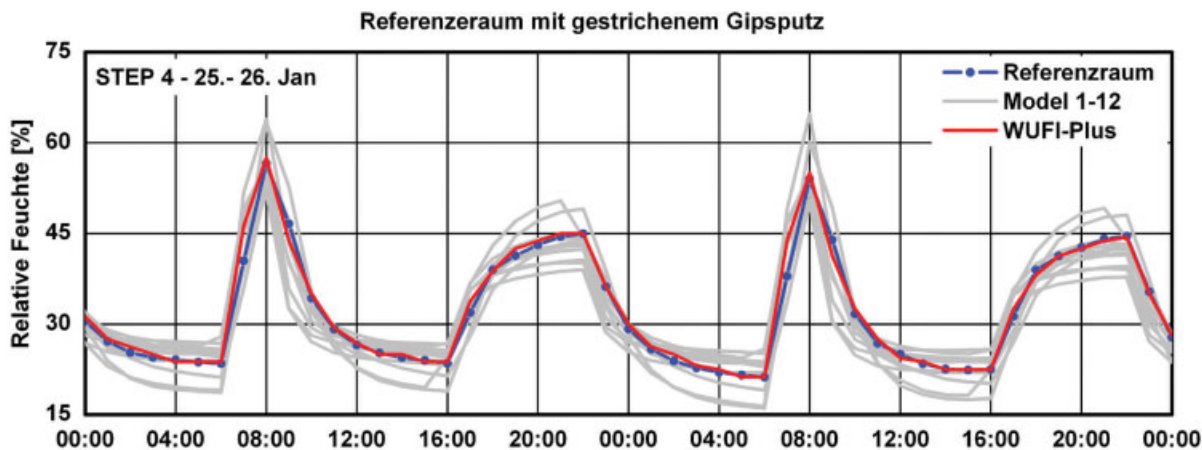


Bild 7. Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumluftfeuchten im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an Wänden und Decke

Fig. 7. Courses of the relative humidity in the reference room with painted gypsum plaster on the walls and the ceiling

3.3 Statistische Analyse der Ergebnisse der Validierungsberechnungen

Anhand der Ergebnisse der Validierungsberechnungen wird eine statistische Analyse auf Basis der deskriptiven Statistik erstellt. In den nachfolgenden Grafiken sind Box-Whisker-Plots aller Ergebnisse, in denen jeweils der Mittelwert, Median, 25 %- und 75 %-Perzentile sowie die Min- und Max-Werte dargestellt. Die Analyse umfasst jeweils den gesamten Mess- bzw. Berechnungszeitraum der einzelnen Varianten.

In Bild 8 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse von Step 1 (Testraum mit Aluminiumfolie) dargestellt. Der

auswertbare Zeitraum umfasst 16 Tage. Die Ergebnisse für diese Variante zeigen großteils gute Resultate. Die Median-Werte liegen bis auf einige Ausnahmen alle um 30 % r. F., auch 25 bis 75 % aller Werte weisen eine ähnliche Schwankungsbreite auf.

Die statistische Auswertung für Step 2 mit ungestrichenen Gipskartonplatten zeigt in Bild 9, dass die Streuung der Ergebnisse und die Extremwerte im Vergleich zur ersten Variante teilweise deutlich abweichen. In Step 2 zeigen drei Modelle eine starke Abweichung zu den Messwerten.

Bild 10 zeigt die statistische Auswertung der Ergebnisse, die für den Step 4 über eine Periode von 16 Tagen er-

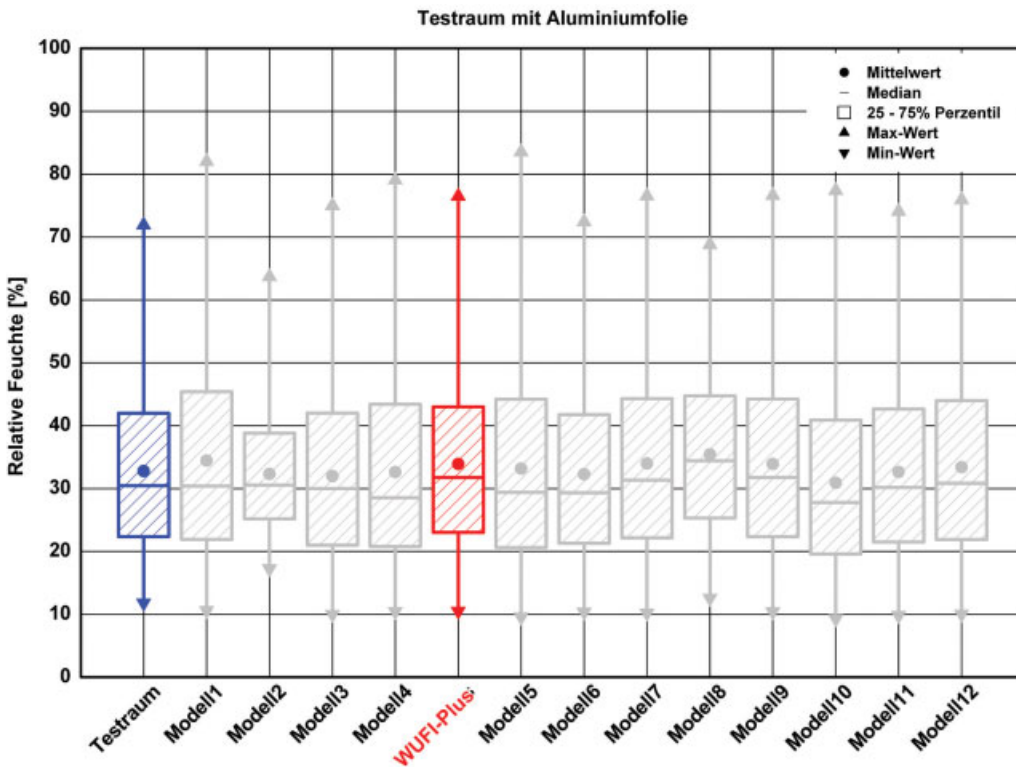


Bild 8. Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 1

Fig. 8. Results of the descriptive statistical analysis of the results of Step 1 with the test room only with aluminium foil

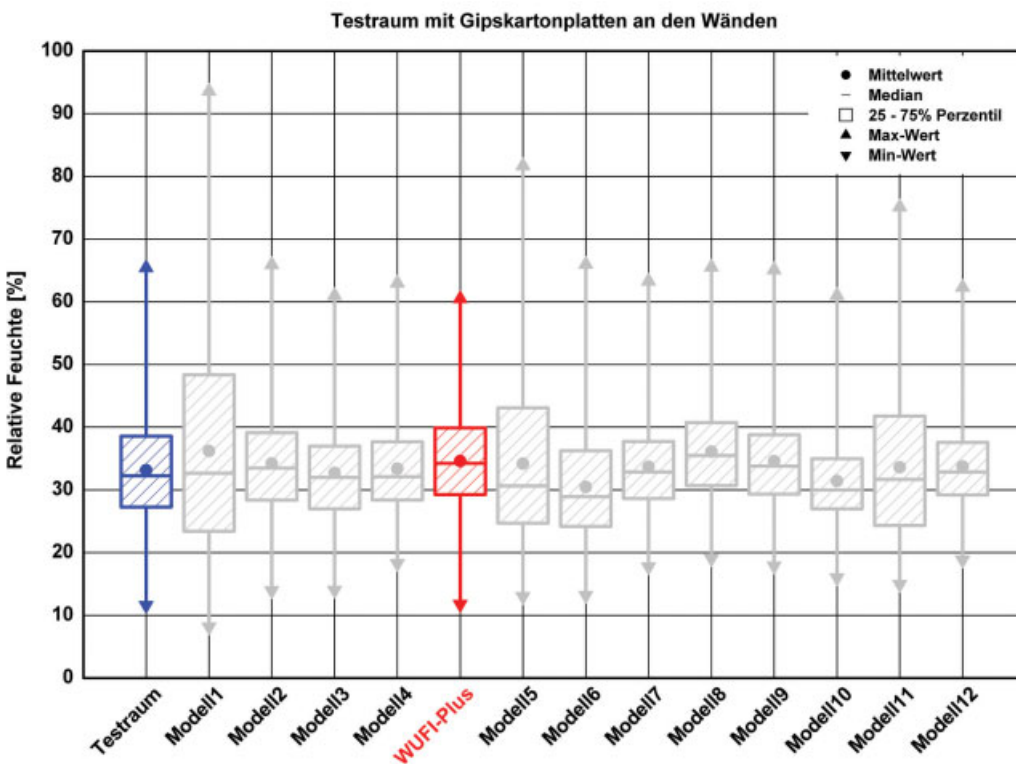


Bild 9. Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 2

Fig. 9. Results of the descriptive statistical analysis of the results of Step 2 with the test room and gypsum boards on the walls

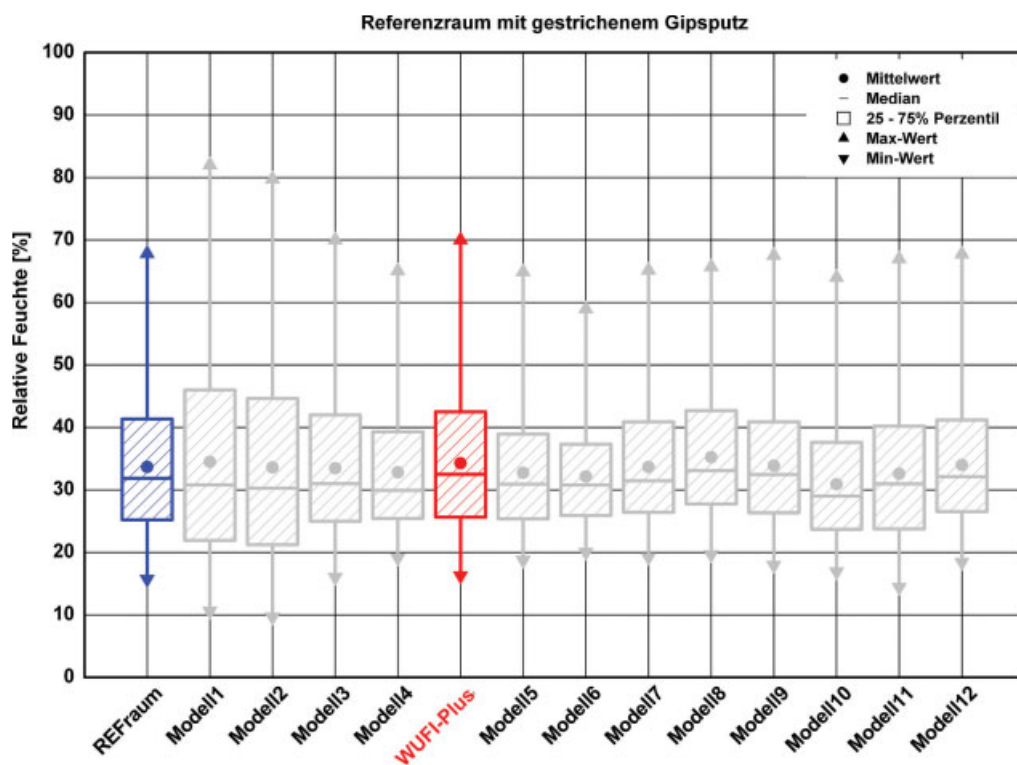


Bild 10. Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse des Referenzraumes
Fig. 10. Results of the descriptive statistical analysis of the results of Step 3 with the test room and gypsum boards on the walls and the ceiling

mittelt wurden. Die Schwankungen liegen teilweise wieder in einem akzeptablen Bereich. Bei den Ergebnissen von WUFI®-Plus zeigt sich hier eine Übereinstimmung von fast 100 %.

Auffällig bei der statistischen Auswertung ist, dass einige der Modelle bei der Simulation des Innenraumklimas mit stark sorptiven Materialien, wie den ungestrichenen Gipskarton, Probleme haben die Extremwerte optimal zu berechnen. Bei den meisten Modellen liegen 25–75 % der Ergebnisse etwa mit den der Messung überein.

4 Zusammenfassung

Für eine genaue Abschätzung der hygrothermischen Klimabedingungen in Innenräumen sind aufwendige Untersuchungen mit verschiedensten Materialien notwendig. Für eine einfachere Lösung zur Ermittlung der Innenraumbedingungen durch den Einsatz von sorptiven Materialien und unterschiedlichen Randbedingungen ist es notwendig Simulationstools zu entwickeln, mit denen verschiedene Szenarien auf eine einfache und schnelle Weise durchzuspielen sind. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des internationalen IEA-Annex 41 Projektes „Moist-Eng“ ein „common exercise“ zur Validierung mehrerer Softwaremodelle durchgeführt, mit denen es möglich sein soll die Innenraumbedingungen realistisch nachzubilden. Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen war, das Feuchtepufferverhalten von Materialien unter gleichen bzw. ähnlichen Randbedingungen zu untersuchen sowie den Einfluss von Anstrichen zu beurteilen. Hierfür wurden in zwei identischen Versuchsräumen unter realen Bedingungen Experimente mit ungestrichenen, gestrichenen Gipskartonplatten sowie mit gestrichenem Gipsputz durchgeführt. Die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wurden während der Versuchsphasen kontinuierlich erfasst und gespeichert. Die Ergebnisse zeigen, dass unge-

strichene Gipskartonplatten, auch bei geringerer Fläche, ein besseres Feuchtepufferverhalten aufweisen als ein Gipsputz, der mit einer handelsüblichen Dispersionsfarbe gestrichen ist. Die Feuchtespitzen werden im Vergleich zum gestrichenen Gipsputz um bis zu 40 % reduziert. Allerdings wird dieser Effekt durch den Einsatz eines Anstriches mit einem s_d -Wert von 0,34 m auf den Gipskartonplatten auf 10 bis 15 % reduziert, was mit der Verringerung der sorptiven Eigenschaften zusammenhängt.

Alle Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen wurden für Validierungsberechnungen der Softwaretools, die im Rahmen vom IEA-Annex 41 Projekt neu entwickelt bzw. weiterentwickelt wurden, eingesetzt. An dem durchgeführten „common exercise“ haben 13 Institutionen mit verschiedenen Modellen teilgenommen. Alle ermittelten Ergebnisse wurden mittels einer statistischen Analyse verglichen, um aufzuzeigen, in welchen Bereichen noch Probleme bei der realistischen Abbildung der Innenraumverhältnisse liegen. Alle Modelle können einen Raum ohne sorptive Materialien mit einer Korrelation von 97 % nachbilden. Bei der Abbildung des Feuchtepufferhaltens von ungestrichenen Gipskartonplatten treten bei vereinzelt Modellen jedoch noch deutliche Probleme auf. Die Korrelation liegt hierbei teilweise nur bei 80 % im Vergleich zu den Messergebnissen. Sobald allerdings das Puffervermögen der eingesetzten Materialien, z. B. durch einen Anstrich, reduziert wird, steigt die Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse des Referenzraumes auf eine Korrelation von 92 % an. Die Übereinstimmung der Ergebnisse, die mit dem hygrothermischen Raumklimamodell WUFI®-Plus erstellt wurden, zeigen in allen Bereichen passable Ergebnisse.

Durch die Entwicklung und Anwendung solcher neu entwickelten Softwareprogramme entsteht eine Möglichkeit auf einfache und kostengünstige Weise zur Berechnung von Innenraumverhältnissen unter verschiedensten Bedingungen. Hierdurch lassen sich einfach die Effekte

verschiedener Materialkombinationen und Raumnutzungen in Hinblick auf das sich einstellende Innenraumklima untersuchen und vergleichen.

Danksagung

Die durchgeführten Experimente wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und vom Projektträger Jülich (PTJ) unterstützt und gefördert.

Literatur

- [1] *Holm, A.* et. al. 2006. Raumklima Simulation – Methoden, Validierung, Anwendung. wksb Nr. 57, S. 37–44.
- [2] DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: *Beuth Verlag* 2003.
- [3] *Hartmann, T.* et. al. 2004. Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall in Wohnungen. *Bundesbaublatt* 53, Nr. 3, S.38–42.
- [4] *Holm, A., Radon, J., Künzel, H. M., Sedlbauer, K.*: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94.
- [5] *Künzel, H. M.*: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [6] VDI 6020: Anforderungen an Rechenverfahren für Gebäude- und Anlagensimulation, Teil 1, Mai 2001.
- [7] *Künzel, H. M.* et al.: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Bauforschung für die Praxis Band 75, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2006.
- [8] *Hartmann, T., Reichel, D., Richter, W.*: Feuchteabgabe in Wohnungen – alles gesagt? *Gesundheitsingenieur*. 122 (2001) H. 4. S. 189–195.
- [9] *Ellinger, M.*: Feuchtepufferwirkung von Holzinnenraumverkleidungen. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim, 2004.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Kristin Lengsfeld, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
Holzkirchen, Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

Dr.-Ing. Andreas Holm, Abteilungsleiter Raumklima, Klimawirkungen,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) Holzkirchen, Fraunhoferstraße 10,
83626 Valley