Raumklima-Simulation - Methoden, Validierung, Anwendung

Dr. Helmut Künzel zum 80. Geburtstag gewidmet

Andreas Holm, Kristin Lengsfeld,
Hartwig M. Künzel, Klaus Sedlbauer*

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. 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 ein hygrothermisches Raumklimamodell WUFI®-Plus entwikkelt. Mit Hilfe dieser Software besteht die Möglichkeit raumklimatische Bedingungen in Gebäuden zu simulieren. Das neu entwickelte hygrothermische Berechnungstool kann die Temperatur- und Feuchteverhältnisse der umgebenden Umschließungsflächen und der Innenraumluft, sowie den Energieaufwand bzw. -verbrauch berechnen. Für eine erfolgreiche Umsetzung des Berechnungsprogramms werden Freilandexperimente in Räumen durchgeführt. Die ermittelten Messdaten werden im Anschluss für Validierungsberechnungen eingesetzt. Die Hauptaugenmerke bei den Vergleichen zwischen Messung und Rechnung liegen in erster Linie auf dem Verlauf der relativen Raumluftfeuchten. Die Umsetzung und Anwendung des raumklimatischen Simulationstools wird nachfolgend näher erläutert.

2 Programmspezifikationen von WUFI®-Plus

Mit Hilfe des Rechenmodells WUFI®-Plus [1], 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 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 folgendem soll neben der theoretischen Ableitung des Rechenmodells auch dessen Anwendung an Hand eines Beispiels gezeigt werden.

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 [2]:

Wärmetransport im Bauteil

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

Feuchtetransport im Bauteil

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

Mit:

D_w [m²/s]	Flüssigtransportkoeffizient
H [J/m³]	Enthalpie des feuchten Baustoffs
h_v [J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
p_D [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
u [m³/m³]	Wassergehalt
δ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
ϑ [°C]	Temperatur
λ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
μ [-]	Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs
ρ_w [kg/m³]	Dichte des Wassers
φ [-]	Relative Feuchte
t [s]	Zeit

* Dr.-Ing. Andreas Holm, Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel, Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, Kristin Lengsfeld, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

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 in der Regel 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 mitbestimmt. 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 von dem Wärmeeintrag über die Raumumschließungsflächen (Transmission und Sonneneinstrahlung), dem direkten Lüftungsaustausch durch natürliche Lüftung und ggf. den raumlufttechnischen (RLT) Anlagen sowie 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 Gleichung (3). Sie beschreibt die dynamische Enthalpie-Schwankung der Raumluft infolge der Summe der zu- und abfließenden instationären Wärmeströme.

Wärmebilanz des Raumes

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

Mit:

ρ [kg/m³]	Dichte der Raumluft
α_j [W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient
ϑ_a [°C]	Außenlufttemperatur
ϑ_j [°C]	Raumumschließungsflächentemperatur
ϑ_i [°C]	Innenlufttemperatur
t [s]	Zeit
A_j [m²]	Raumumschließungsflächen
c [J/kgK]	spezifische Wärmekapazität der Luft
n [h⁻¹]	Luftwechsel
$\dot{Q}_{Sol}$ [W]	Kurzwellige Sonneneinstrahlung, die direkt zu einer Erwärmung der Innenluft bzw. Inneneinrichtungsgegenstände führt
$\dot{Q}_{I\,WQ}$ [W]	Interne Wärmequellen durch Personen, Beleuchtung und Geräte
$\dot{Q}_{RLT}$ [W]	Wärmestrom der durch raumlufttechnische Anlagen (RLT) zu bzw. abgeführt wird.
V [m³]	Raumvolumen.

Die Feuchtebilanz des Raumes ergibt sich aus den Feuchteströmen durch die inneren Bauteiloberflächen, die nutzungsbedingte Feuchteproduktionsrate und der Feuchtezufuhr bzw. -abfuhr durch die RLT-Anlage oder durch natürlichen Luftaustausch mit der Außenluft.

Feuchtebilanz des Raumes

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

Mit:

c_a [kg/m³]	Absolute Feuchte der Außenluft
c_i [kg/m³]	Absolute Feuchte der Raumluft
$\dot{g}_{w\,j}$ [kg/(sm²)]	Feuchtestrom von der Wandinnenoberfläche zum Raumluft
$\dot{W}_{IFQ}$ [kg/h]	Feuchteproduktion im Raum
$\dot{W}_{RLT}$ [kg/h]	Feuchtezu- bzw. -abfuhr durch raumlufttechnische Anlagen.

Die jeweiligen Oberflächentemperaturen und -feuchten bzw. Wärme- und Feuchteströme über die Raumumschließungsflächen werden mit Hilfe der Transportgleichungen (1) und (2) für die Bauteile bestimmt. Die dazu erforderlichen raumseitigen Randbedingungen stammen aus den Lösungen 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 herkömmlichen Gebäudesimulationsverfahren und mit den laut VDI 6020 [3] vorgesehenen Beispielrechnungen zur Validierung von energetischen Raumsimulationsprogrammen liefern Ergebnisse, die im Bereich der z.B. in VDI 6020 angegebenen Schwankungsbreiten liegen [1]. Der experimentelle Nachweis wird durch die folgend beschriebenen Untersuchungen im Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen erbracht.

3.1 Versuchsdurchführung

Für die Experimente stehen zwei identische Räume zur Verfügung, von denen der genaue Konstruktionsaufbau und die Randbedingungen bekannt sind. Die durchgeführten Versuche sollen den Einfluss verschiedener Innenoberflächenmaterialien in Hinblick auf ihr Feuchtepufferverhalten aufzeigen. In Bild 1 sind der Grundriss und die Lage der Räume im Gebäude dargestellt. Der linke Raum dient als Referenzraum, der innenseitig an den Wänden und der Decke mit einem handelsüblichen

Kalk-Gipsputz und einem Anstrich ausgestattet ist. Das rechte Zimmer dient als Testraum, in diesem sind die Wände und die Decke mit Alufolie beklebt, um eine Feuchteaufnahme über die Oberflächen zu verhindern. Während der Versuche werden verschieden Oberflächenmaterialien, z.B. Gipskartonplatten in dem Raum installiert und der Einfluss der eingebrachten Materialien auf das Raumklima wird im Vergleich zum Referenzraum messtechnisch erfasst.

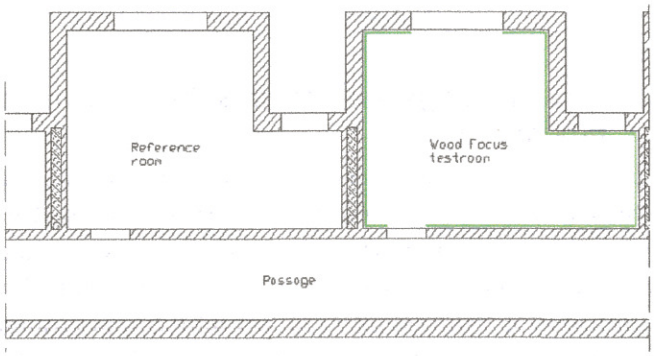

Bild 1: Grundriss und Lage der beiden Versuchsräume im Gebäude [4].

Die anliegenden Randbedingungen während der Experimente können einen großen Einfluss auf das Raumklima und die Untersuchungen haben. Um definierte Randbedingungen zu schaffen, müssen einige Maßnahmen im Voraus getroffen werden. Zur Vermeidung von Temperaturschwankungen im Raum durch wechselnde Sonneneinstrahlung werden Decken von außen vor die Fenster gehängt. Die Raumtemperatur wird konstant auf 20 °C gehalten. In beiden Räumen befindet sich eine Lüftungsanlage, die jeweils einen Luftwechsel von ca. 0,6 h^{-1} erzwingt. Ziel der durchgeführten Versuche ist, das Feuchtepufferverhalten verschiedener Materialien unter bekannten Randbedingungen einzustufen. Für diese Untersuchungen wird in die Versuchsräume täglich eine definierte Feuchtemenge von 2,4 kg/d eingebracht. Das Feuchteprofil (Bild 2) simuliert eine normale Nutzung eines 3-Personen-Haushalts [5]. In den Morgenstunden zwischen 6 – 8 Uhr und abends zwischen 16 – 22 Uhr werden zwei Feuchtespitzen eingebracht. Die erhöhte Feuchteproduktion zu diesen Zeiten simuliert das Dusch-, Koch- und Waschverhalten sowie die Anwesenheit von Personen im Raum.

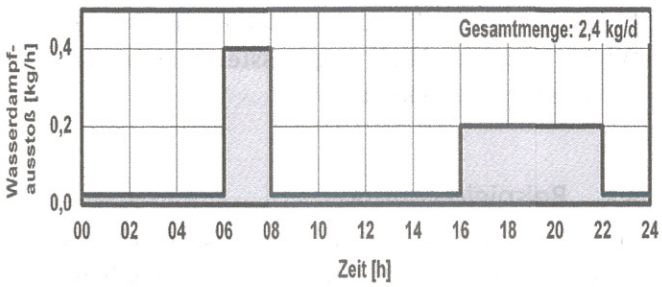

Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Feuchteproduktion in den zwei Versuchsräumen.

Zur Erfassung des Raumklimas sind in den Versuchsräumen mehrere Temperatur- und Feuchtesensoren installiert. Des Weiteren ist zur Ermittlung des Energieverbrauchs der Heizung ein Leistungsmesser eingebaut.

3.2 Untersuchungs- und Berechnungsergebnisse

Für eine erfolgreiche Durchführung von Validierungsberechnungen ist eine genau 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 der angrenzenden Räume sowie die Außenklimabedingungen werden in das Programm implementiert.

Für die Validierungsberechnungen werden die Ergebnisse von drei verschiedenen Varianten herangezogen. Variante 1 zeigt das Innenraumklima im Testraum auf, indem die Wände und die Decke mit Aluminiumfolie beklebt sind. Im Rahmen dieser Validierungsberechnung wird der angegebene Raumluftwechsel nachgerechnet und kontrolliert. Für die zweite Variante werden Gipskartonplatten in den Testraum an den Wänden angebracht. Bei diesem Versuch soll das Feuchtepufferverhalten der Platten betrachtet werden. Zeitgleich zur Variante 2 werden die Messdaten aus dem Referenzraum, der mit einem gestrichenen Gipsputz ausgestattet ist, für die dritte Validierungsberechnung verwendet. Bei den Varianten 2 und 3 liegt der Hauptaugenmerk auf dem Verlauf der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit des Pufferverhaltens der Innenoberflächenmaterialien. Dieses Verhalten soll mit WUFI®-Plus berechnet werden.

In Variante 1 wird das Raumklima im Testraum (mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke) erfasst und berechnet. Bei diesem Schritt ist keinerlei Sorptionsverhalten der Umschließungsflächen möglich und die relative Luftfeuchte im Raum ist nur abhängig vom Luftwechsel. In Bild 3 sind die Mess- und Berechnungsergebnisse der ersten Versuchsreihe über einen Zeitraum von acht Tagen dargestellt.

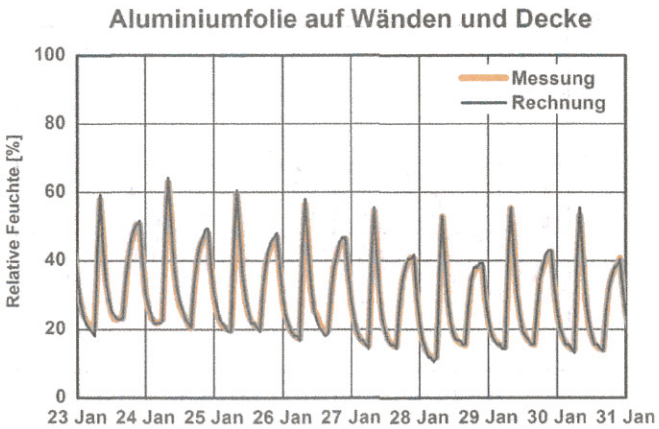

Bild 3: Vergleich der Verläufe der relativen Luftfeuchte zwischen Messung und Rechnung im Testraum mit Alufolie.

Die Verläufe in Bild 3 zeigen, dass durch die Eingabe der bekannten Konstruktionsdaten und der Randbedingungen in das Berechnungsprogramm eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung möglich ist. Der gemessene Luftwechsel im Raum von $n = 0{,}66\ h^{-1}$ kann durch die Berechnung bestätigt werden. Der Einfluss der Lüftungsintensität hat einen wesentlichen Einfluss auf das Raumklima, denn je höher der Luftwechsel ist, desto mehr eingebrachte Feuchte wird hinausgelüftet und kann somit nicht über die Oberflächen der Wände und Decke absorbiert werden.

Im weiteren Verlauf werden unbehandelte Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum angebracht. Die Materialkenndaten sind durch Labormessungen ermittelt und werden in WUFI®-Plus eingegeben. Die Ergebnisse der Validierungsrechnung mit Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum sind in Bild 4 abgebildet. Das Sorptionsverhalten der Platten kann mit WUFI®-Plus gut nachgerechnet werden. Bei dem Vergleich zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen kommt es ebenfall zu einer sehr guten Übereinstimmung.

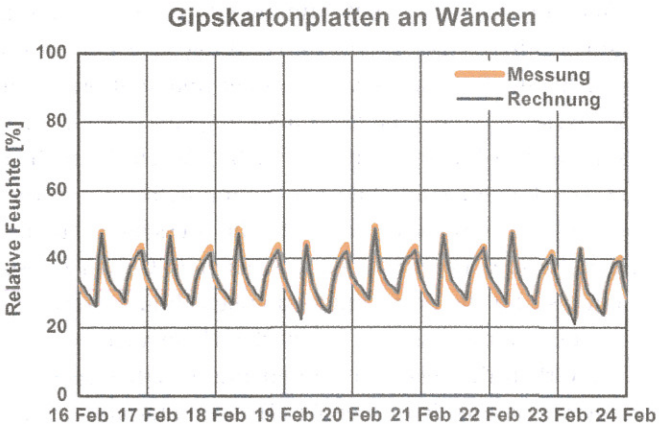

Bild 4: Vergleich der Verläufe der relativen Luftfeuchte zwischen Messung und Rechnung im Testraum mit Gipskartonplatten an den Wänden.

Um die erfolgreiche Berechnung des Feuchtepufferverhaltens von Materialien bestätigen zu können, werden die Messergebnisse aus dem Referenzraum, mit gestrichenem Innenputz, in Variante 3 für eine weitere Validierungsberechnung eingesetzt. Bei dieser Variante ist ein Anstrich vorhanden. Der Farbanstrich kann auf verschiedene Weise in der Berechnung berücksichtigt werden, entweder als eigenständige Materialschicht im Konstruktionsaufbau oder durch Angabe des Wasserdampfdiffusionswiderstandes (s_d-Wert). Der Anstrich ist in der nachfolgenden Berechnung in Form des s_d-Wertes angesetzt worden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Bild 5 abgebildet. Der Vergleich der Mess- und Rechendaten zeigt ebenfalls eine guten Übereinstimmung.

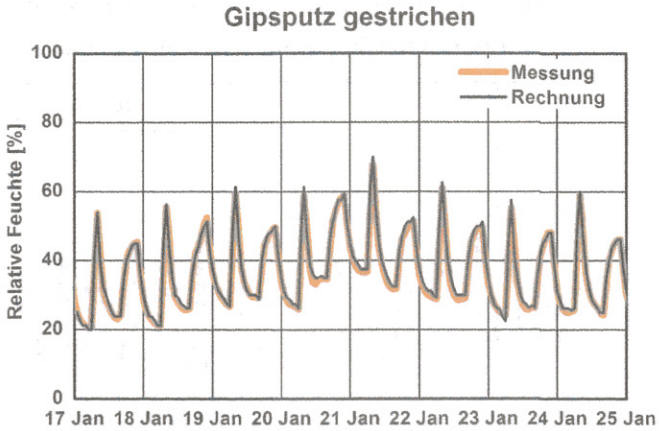

Bild 5: Vergleich der Verläufe der relativen Luftfeuchte zwischen Messung und Rechnung im Referenzraum mit gestrichenem Innenputz an den Wänden und der Decke.

4 Anwendungsgebiete des Berechnungsprogramms

Die Beurteilung des sich einstellenden Raumklimas bei verschiedenen Bauweisen und Materialien ist aus bauphysikalischer Sicht in Hinsicht auf die Behaglichkeit und das Schimmelpilzrisiko auf Oberflächen sehr wichtig. Das entwickelte hygrothermische Berechnungsprogramm WUFI®-Plus stellt ein praktisches Tool zur Beantwortung von Fragen der Behaglichkeit und des Schimmelpilzrisikos in Innenräumen dar. Durch die Möglichkeit, das Innenklima in Abhängigkeit aller Randbedingungen zu simulieren, können Einflüsse verschiedener Materialien, Lüftungsstrategien und Nutzungen von Räumen auf eine einfache und kostengünstige Weise aufgezeigt werden. Das Raumklimamodell kann bei Fragen der Sanierung oder im Neubaubereich problemlos eingesetzt werden.

Anhand des folgenden Anwendungsbeispiels soll der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien auf das Innenraumklima näher untersucht werden. Berechnet wird das hygrothermische Verhalten eines einstöckigen Porenbetonhauses. Aufgrund der Annahme eines "perfekten" Luftaustausches innerhalb des Gebäudes (ideale Durchmischung) wird ein Einzonenmodell zu Grunde gelegt. Wie Durchmischungsvorgänge in Wirklichkeit ablaufen, ist derzeit noch nicht vollständig geklärt und kann daher nicht exakt modelliert werden. Gleichwohl ergeben sich Einflüsse, wenn es um Feuchteübertragungsvorgänge und Schimmelpilzbewertungen in Ecken, Nischen und dergleichen von Räumen geht. Neben den Besonderheiten der thermischen und hygrischen Grenzschicht verändern sich z.B. in Ecken auch die langwelligen Strahlungsverhältnisse. Diese letztgenannten Effekte werden in der vorliegenden Programmversion von WUFI®-Plus mit Hilfe angepasster Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt.

4.1 Beispielrechnung

Als Referenzgebäude dient ein eingeschossiges Gebäude mit einer Höhe von 2,6 m und einer quadratischen Grundfläche von 100 m². Die Außenwände bestehen aus Porenbeton (30 cm) mit mineralischem Außenputz und einem innenseitigen Gipsputz. Die Materialdaten stammen

aus der WUFI-Datenbank [6]. Im Standardfall haben alle Bauteile zu Beginn über den gesamten Querschnitt ihren praktischen Feuchtegehalt, d.h. einen Sorptionswassergehalt bei 80 % relativer Luftfeuchte. Da die Berechnungen nur für einen Zeitraum von mehreren Tagen (bis sich ein eingeschwungener Zustand ergibt) erfolgen, werden als äußere klimatische Randbedingungen konstante Außenluftverhältnisse (80 % rel. Feuchte) mit zwei verschiedenen Temperaturen (- 5 bzw. - 10 °C) gewählt. Die gewünschte Mindesttemperatur für den Innenraum soll 20,0 °C betragen. Die Leistung der Heizanlage ist zunächst nicht beschränkt. Zusätzlich werden Berechnungen mit Beschränkung der Heizleistung auf 2 kW und 5 kW durchgeführt. Die interne Feuchteproduktion ist tageszeitabhängig und ergibt in der Summe 12 kg/d (Tagesprofil siehe Bild 6 oben). Der gesamte Luftaustausch während eines Tages soll dabei 12 h^{-1} entsprechen. Das kommt dem nach DIN 4108 geforderten Mindestluftwechsel von 0,5 h^{-1} gleich. Untersucht wird der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien (siehe Bild 6 unten):

I. Luftwechsel n= 0,5 h^{-1} konstant über den Tag.
II. Stoßlüftung (Luftwechsel n= 5 h^{-1}) während und am Ende der erhöhten Feuchtebelastung (jeweils 15 Minuten); sonst etwa n = 0,3 $^{h-1}$.
III. Entsprechend dem Tagesverlauf der Feuchtebelastung, d.h. für zwei mal vier Stunden n= 1 h^{-1}, sonst n = 0,25 h^{-1}.

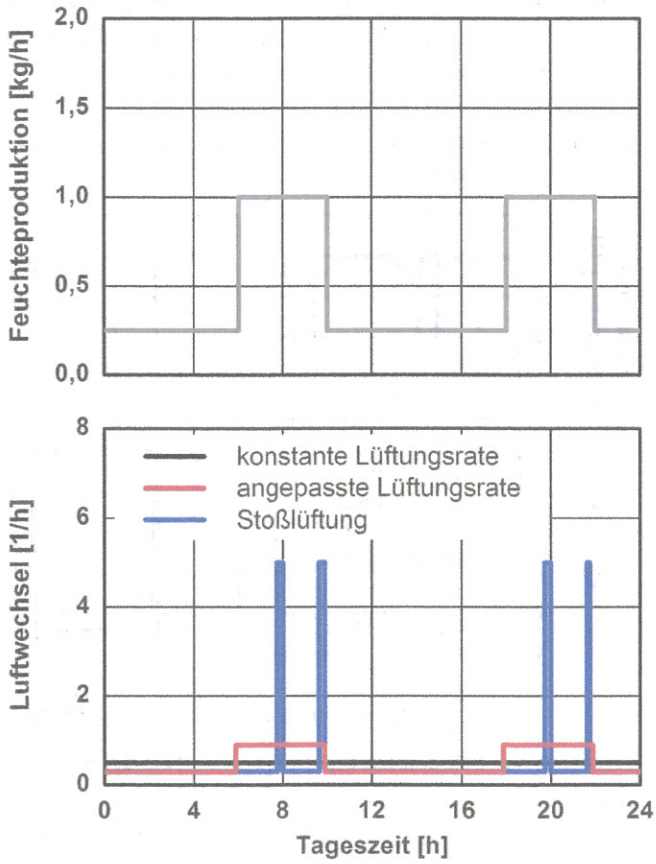

Bild 6: Zeitlicher Verlauf der angenommenen Randbedingungen während eines Beobachtungstages.
Oben: Feuchteproduktion
Unten: Luftwechselrate

Neben dem Einfluss der verschiedenen Lüftungsstrategien sollen auch die Auswirkung von Anstrichen, Tapeten oder Fliesen auf das Ergebnis näher studiert werden. Deshalb werden Berechnungen mit zusätzlichen Schichten auf der Rauminnenseite mit s_d-Werten im Bereich von 0 bis 100 m durchgeführt, die den Einfluss der Pufferung der Luftfeuchte durch die Raumumschließungsflächen zu zeigen in der Lage sind.

Idealfall einer unbeschränkten Heizleistung

Zunächst wird der Fall eines "ideal" geheizten Raumes untersucht. Dabei wird angenommen, dass die benötigte Heizleistung immer ausreichend ist, um den Temperaturabfall bedingt durch den erhöhten Luftaustausch bei den verschiedenen Lüftungsstrategien sofort auszugleichen. Die geforderte Mindesttemperatur von 20°C wird somit nicht unterschritten. Die Raumumschließungsflächen wurden als nicht beschichtet angenommen. In Bild 7 sind die berechneten Tagesgänge der relativen Feuchte im Innenraum aufgezeigt. Verglichen wird bei zwei verschiedenen Außenlufttemperaturen (- 5 °C und - 10 °C) der Einfluss der Oberflächenbeschichtung auf das Feuchteverhalten des Raumes. Dabei ist zum einem zu erkennen, dass mit höherer Außenlufttemperatur die durchschnittliche relative Feuchte im Raum ansteigt. Dies ist selbstverständlich, da für beide Temperaturen jeweils eine relative Feuchte von 80 % angenommen wurde. Zum anderen zeigt sich, dass eine "dampfdichte" Beschichtung (Bilder unten) auf der Innenraumseite zu ausgeprägteren Feuchtespitzen, aber im Durchschnitt zu niedrigeren relativen Feuchten führt. Ferner ist aus den berechneten Verläufen der Einfluss des Lüftungsverhaltens deutlich zu sehen. Obwohl die im Laufe eines Tages ausgetauschte Luftmenge in allen drei Fällen identisch ist, ergeben sich unterschiedliche Raumluftverhältnisse. Die

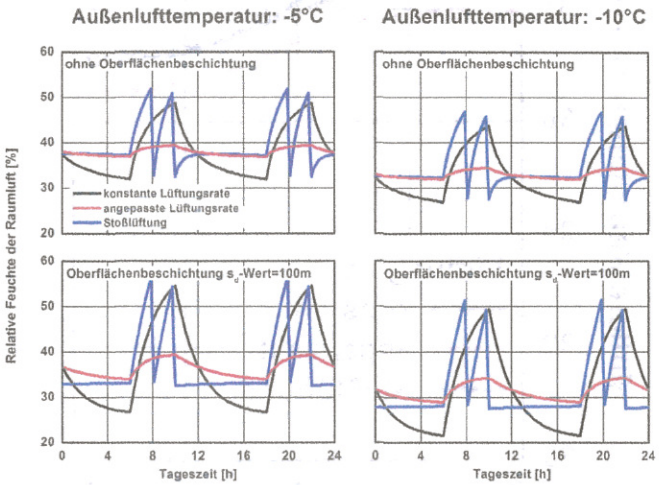

Bild 7: Zeitlicher Verlauf der rechnerisch ermittelten Raumluftfeuchte während eines Beobachtungstages. Die Raumlufttemperatur beträgt 20 °C. Die Außenluft hat bei einer Temperatur von –5 °C (links) bzw. –10 °C (rechts) jeweils 80 % relative Feuchte.
Oben: Raumumschließungsflächen ohne Beschichtung
Unten: Oberflächenbeschichtung mit einem sd-Wert von 100 m.

niedrigsten Schwankungen der relativen Feuchte erreicht man durch einen erhöhten Luftwechsel während der Feuchteproduktion. Durch ein kurzfristig intensives Stoßlüften werden zwar die "Feuchtespitzen" abgebaut, doch durch die zwar geringe, aber permanente, stets vorhandene Feuchteproduktion steigt die relative Feuchte im Raum rasch wieder an. Ein etwas erhöhter, jedoch konstanter Luftwechsel führt zu einem Feuchtemaximum während der Zeiträume erhöhter Feuchteproduktion. Diese Maxima decken sich in etwa mit denen bei der Stoßlüftung. Ferner zeigt sich in den Abschnitten geringer Feuchteproduktion die geringste Raumluftfeuchte aller Varianten.

Interessante Effekte ergeben sich im Vergleich der Varianten ohne und mit einer angenommenen Oberflächenbeschichtung. Die maximalen Feuchtespitzen steigen zwar mit der "Dampfdichtheit" der Innenraumoberfläche, doch, wie Bild 8 belegt, fällt gleichzeitig die durchschnittliche relative Luftfeuchte. Demzufolge kann eine sorptive Innenwand zwar kurzfristig erhöhte Feuchtelasten ausgleichen, doch führt die anschließende Feuchteabgabe in den Raum im Mittel zu einer höheren Raumluftfeuchte. Da sich bei konstantem Luftwechsel die größten Schwankungen vor allem bei diffusionsdichter Versiegelung der Raumumschließungsflächen ergeben und sich auch im Falle der Stoßlüftung ausgeprägte Feuchtemaxima einstellen, kann im Sinne einer optimalen Lüftung ein erhöhter Luftwechsel während der Feuchteproduktion empfohlen werden, falls dieses möglich ist. Dieser führt auch zu den niedrigsten mittleren relativen Feuchten (Bild 8) für alle s_d-Werte.

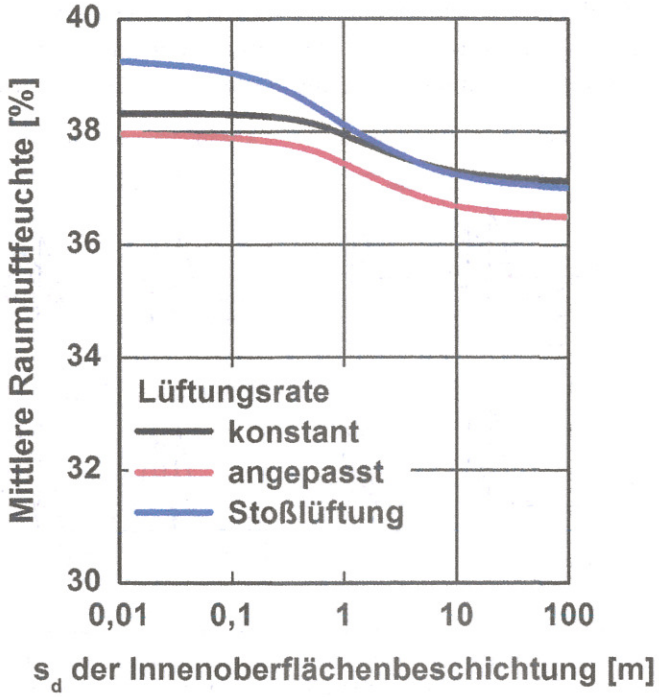

Bild 8: Mittlere relative Feuchte der Raumluft in Abhängigkeit vom Diffusionswiderstand (s_d-Wert) der Innenoberflächen der Raumumschließung.

Beschränkte Heizleistung

Wie die beschriebenen Untersuchungen darlegen, führen bei Annahme einer konstanten Außenluftfeuchte höhere Außenlufttemperaturen auch zu höheren Raumluftfeuchten. Im folgenden werden die Ergebnisse auf den Fall einer konstanten Außenlufttemperatur von – 5°C beschränkt. Nachdem bisher nur die Variante einer idealisierten Heizungsanlage untersucht wurde, soll im folgenden angenommen werden, dass die maximale Heizleistung auf 2 bzw. 5 kW beschränkt sei. Der resultierende Verlauf der Raumlufttemperatur ist Bild 9 oben zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist der kurzfristige Abfall der Temperatur, bedingt durch erhöhte Luftwechselraten. Ist die Heizungsanlage auf maximal 2 kW dimensioniert, fällt die Temperatur während der Stoßlüftung von den gewünschten 20 °C auf etwas unter 10 °C ab. Dies bedeutet, dass eine Heizleistung von 2 kW nicht ausreichend ist, um den erhöhten Luftwechsel während der gesamten Dauer der Feuchteproduktion thermisch auszugleichen. Wie die Ergebnisse der Berechnungen unter Annahme einer maximalen Heizleistung von 5 kW darlegen, kommt es nur bei der Stoßlüftung vor, dass die Soll-Temperatur nicht eingehalten werden kann. Die jeweils benötigte Heizleistung ist in Bild 9 unten aufgezeichnet. Der Vergleich des benötigten Heizleistungsverlaufes mit dem der Feuchteproduktion zeigt einen interessanten Effekt, der nur durch die rechnerische Kopplung zwischen Wärme und Feuchte realitätsnah zu erfassen ist. Sobald die Feuchteproduktion einsetzt, reduziert sich die benötigte Heizleistung zum Aufrechterhalten der Mindesttemperatur im Innenraum für den Fall, dass die Lüftungsrate konstant bleibt zum Zeitpunkt des Beginns der erhöhten Feuchtelast. Durch die Absorption der Feuchte an den Raumumschließungsflächen wird Enthalpie freigesetzt.

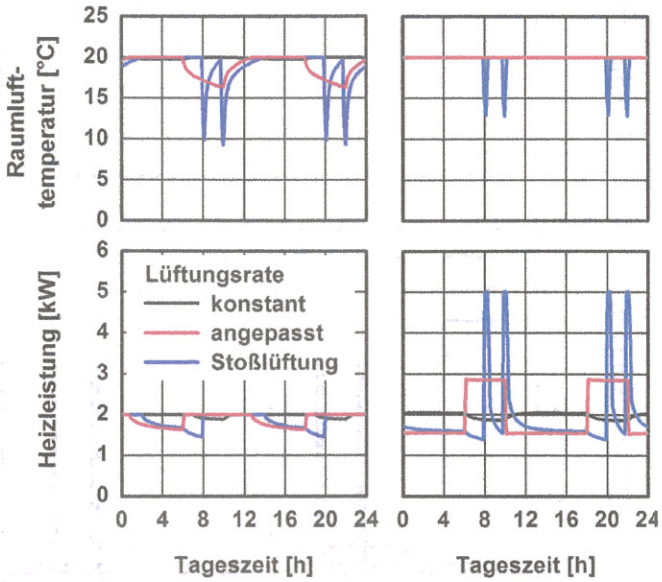

Bild 9: Rechnerisch ermittelter zeitlicher Verlauf der Raumlufttemperatur (oben) und der Heizleistung (unten) während eines Beobachtungstages für unterschiedliche Lüftungsstrategien bei einer angenommenen Beschränkung der maximalen Heizleistung auf 2 kW (links) und 5 kW (rechts). Die Außenlufttemperatur beträgt für alle Varianten – 5 °C und die Soll-Raumlufttemperatur 20 °C.

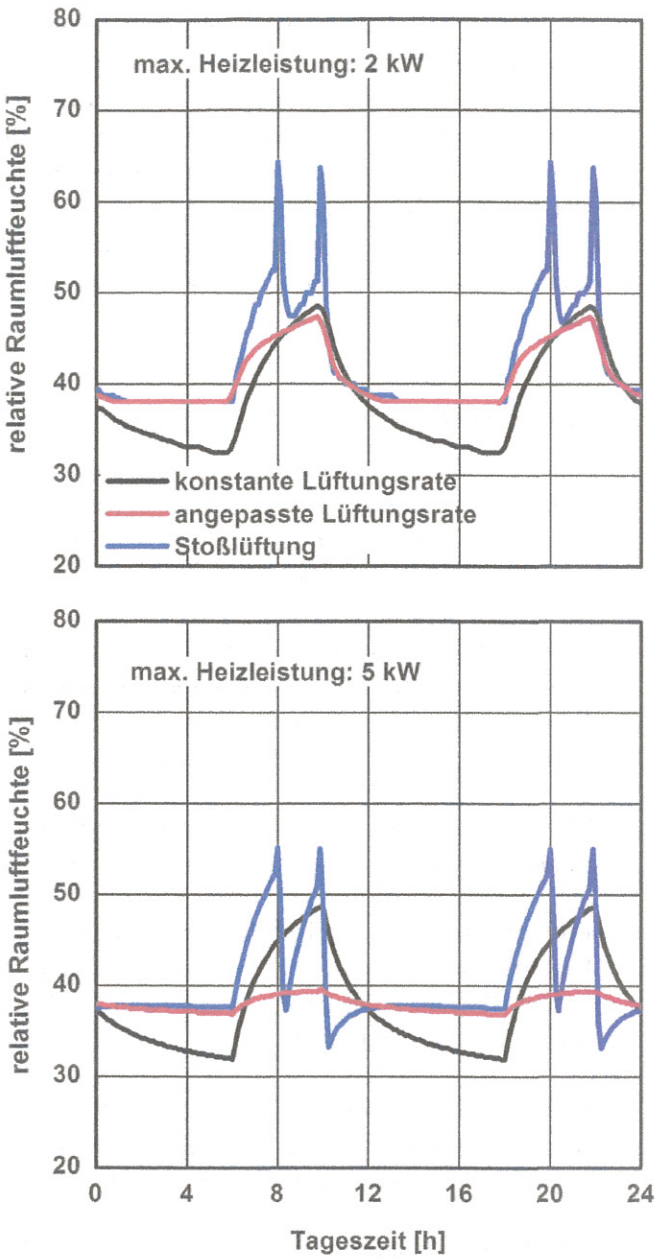

Bild 10: Rechnerisch ermittelter zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte in der Raumluft während eines Beobachtungstages für unterschiedliche Lüftungsstrategien bei einer angenommenen maximalen Heizleistung von 2 kW (oben) und 5 kW (unten) sowie einer Außenlufttemperatur von – 5 °C und einer Soll-Raumlufttemperatur von 20 °C.

Der Tagesgang der relativen Feuchte im Innenraum bei den beiden Varianten für verschiedene Lüftungsstrategien ist Bild 10 zu entnehmen. Durch die verminderte Heizleistung beobachtet man neben dem bereits erwähnten Temperaturabfall auch eine Erhöhung der relativen Feuchte. Vor allem im Fall der Stoßlüftung kommt es zu hohen Werten der relativen Feuchte, die bis zu 65 % erreichen. Für den Fall einer maximalen Heizleistung von 5 kW und einer diffusionsoffenen Innenbekleidung sind in Bild 11 die errechneten Oberflächenfeuchten (oben) und der Wassergehalt des Innenputzes (unten) aufgetragen. Der Innenputz kann zwar die durch die Stoßlüftung bedingten Feuchtespitzen der Raumluft etwas durch Diffusion nach innen an den Oberflächen abfedern, doch muss an Wärmebrücken möglicherweise mit Tauwasser gerechnet werden. Ferner wird im Falle einer diffusionsdichten Versiegelung der Raumumschließungsflächen von vermehrter großflächiger Tauwasserbildung an wenig wärmespeichernden Flächen (z.B. Fenster) ausgegangen. Sollte es bei einer solch kritischen Situation zu einer Ansammlung von Feuchte hinter Schränken, in Fugen oder auf kleinflächig saugenden Oberflächen kommen, muss man Schimmelpilzbildung befürchten. Für den Fall, dass kein angepasstes Lüften möglich ist sollte einer permanenten, also zeitlich konstanten Lüftungsrate gegenüber der Stoßlüftung der Vorrang gegeben werden.

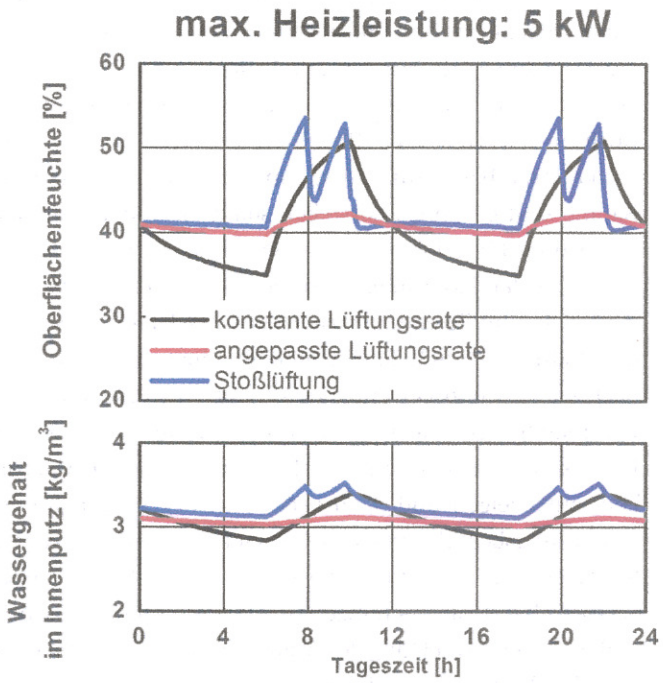

Bild 11: Rechnerisch ermittelter zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte an der Raumumschließungsoberfläche (oben) und des Wassergehaltes im Innenputz (unten) während eines Beobachtungstages mit unterschiedliche Lüftungsstrategien bei einer angenommenen maximalen Heizleistung 5 kW sowie einer Außenlufttemperatur von – 5 °C und einer Soll-Raumlufttemperatur von 20 °C.

Folgerungen aus den Ergebnissen der Beispielrechnungen

Das Programm WUFI®-Plus dient in den Beispielrechnungen als Basis für rechnerische Untersuchungen des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftverhältnisse. In dem angenommenen Fall wird ein "perfekter" Luftaustausch innerhalb eines Gebäudes (ideale Durchmischung) und ein Einzonenmodell zu Grunde gelegt. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass je nach gegebenen Randbedingungen hinsichtlich Außenlufttemperatur und -feuchte, Begrenzung der Heizleistung sowie Diffusionsdichtheit der Raumumschließungsflächen verschiedene Lüftungsstrategien jeweils optimal sind.

5 Zusammenfassung

Der Begriff Raumklima umfasst Fragestellungen wie z.B. Themen der Behaglichkeit und Schimmelpilzrisiken in Innenräumen. Oft ist eine Beurteilung der Raumklimabedingungen erst nach Umsetzung von Baumaßnahmen oder wenn bereits Probleme mit Schimmelpilzen aufgetreten sind möglich. Die nachträgliche Ursachenforschung erfordert meist aufwändige und kostenintensive Untersuchungen. Um eine einfachere, schnellere und kostengünstigere Bewertungsmöglichkeit zu finden, wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik ein hygrothermisches Raumklimamodell WUFI®-Plus zur Berechnung von Innenklimabedingungen entwickelt. Durch die Variation von Randparametern kann der Einfluss verschiedener Materialien, Lüftungsintensitäten und Raumnutzungen dargestellt werden. Im Rahmen der Neuentwicklung der Software werden Freilandversuche unter realen Bedingungen zur Validierung durchgeführt. Die Experimente finden in zwei identischen Versuchsräumen statt. Die Randbedingungen, wie Konstruktionsaufbau, Luftwechsel und Feuchteproduktion der Räume sind bekannt und stellen somit die wichtigsten Voraussetzung für erfolgreiche Validierungsberechnungen dar. Während der Experimente werden die Innenoberflächenmaterialien im Testraum variiert, um mit Hilfe der Simulation Schritt für Schritt einzelne Randparametereinflüsse nachrechnen und bewerten zu können. Im Rahmen dieser Untersuchungen liegt der Hauptaugenmerk darauf, den Einfluss von Feuchtepuffereffekten verschiedener Materialien, aufzuzeigen und nachzurechnen. Die Ergebnisse der Validierungsberechnungen der verschiedenen Experimente zeigen alle eine gute Übereinstimmung. Mittels dieser erfolgreichen Untersuchungen ist somit ein wichtiger Schritt in der Weiterentwicklung des hygrothermischen Raumklimamodells WUFI®-Plus erfolgt. Weiterführend werden komplexere Freilandexperimente durchgeführt, bei denen Temperaturschwankungen und solare Einstrahlung mit berücksichtigt werden. Jeder Einfluss bzw. jede Variation der Randbedingung muss in Validierungsberechnungen umgesetzt werden, um die Zuverlässigkeit der entwickelten Software sicher zu stellen.

Mit Hilfe des Rechenmodells WUFI®-Plus, das eine Verknüpfung von energetischer Gebäude- und hygrothermischer Bauteilberechnung enthält, ist eine situationsbedingte Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Gebäude und in seinen Umschließungsflächen möglich. In Abhängigkeit vom Außenklima sowie den Heizungs- und Lüftungsgegebenheiten sind die hygrothermischen Bedingungen im Raum und an den Innenoberflächen genauso bestimmbar wie die Wärmeverluste durch Transmission, Verdunstung und Lüftung. Das hier vorgestellte Programm WUFI®-Plus ist der Anfang einer neuen Entwicklung. Beschäftigte man sich bisher fast ausschließlich mit den hygrothermischen Zuständen im Bauteil, so ist in den letzten Jahren die Betrachtung von Räumen von immer größerem Interesse. Die in den bisher existierenden Modellen vereinfachten Feuchtemodelle reichen für eine genaue Analyse der Feuchtesituation im Raum nicht aus. Deshalb sind neue Ansätze, welche die thermischen und hygrischen Rückkopplungen zwischen dem Raum und seinen Bauteilen ermöglichen, erforderlich [7 bis 9].

6 Literaturverzeichnis

[1] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81-94. Hrsg.: WTA-Publications, München.

[2] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.

[3] VDI 6020: Anforderungen an Rechenverfahren für Gebäude- und Anlagensimulation, Part 1, Mai 2001.

[4] Künzel, H.M. et al.: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Bauforschung für die Praxis Band 75, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2006.

[5] Hartmann, T.; Reichel, D.; Richter, W.: "Feuchteabgabe in Wohnungen – alles gesagt?" Gesundheitsingenieur. 122. Jahrgang. Heft 4. S. 189-195. (2001).

[6] Künzel, H.M.; Holm, A.; Schmidt, Th.: WUFI-3.2: Programm zur instationären Berechnung des eindimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen, Holzkirchen (2001).

[7] Karagiozis, A. N.; Salonvaara M.: Hygrothermal system-performance of a whole building, Building and Environment, 36 (2001), H. 6, S. 779-787.

[8] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden - Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation Technische Universität Wien (2000).

[9] Rode C.; Grau K.: Synchronous calculation of transient hygrothermal conditions of indoor spaces and building envelops. Tagungsband 2, Building Simulation, Rio de Janeiro, 13-15. Aug. 2001.