

Entwicklung der hygrothermischen Simulation im Bauwesen am Beispiel der Softwarefamilie WUFI®

Hartwig M. Künzel, Klaus Sedlbauer,
Andreas Holm und Martin Krus*

Vorbemerkung

Die Bauphysik ist eine relativ junge Wissenschaft und hat sich im Wesentlichen aus experimentellen Untersuchungen und empirischen Erfahrungen entwickelt. Während numerische Rechenverfahren auf den Gebieten der Tragwerksplanung und der Energieoptimierung bereits seit langem zum Standardrepertoire der Ingenieure gehören, ist die Entwicklung von Simulationsverfahren zur Beurteilung des feuchtetechnischen Verhaltens von Baukonstruktionen neueren Datums. Eine wesentliche Voraussetzung zur Entwicklung neuer Rechenmodelle ist deren Validierung mithilfe von gut dokumentierten und realitätsnahen experimentellen Untersuchungsergebnissen. Das seit mehr als 50 Jahren bestehende Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) bietet in diesem Zusammenhang nicht nur einen wertvollen Pool an Messergebnissen zur Überprüfung der Rechenmodelle, sondern auch die notwendigen Eingabedaten für die Simulation in Form von meteorologischen Datensätzen, gemessenen Übergangsbedingungen und praxisgerechten Materialkennwerten. Andererseits hilft die hygrothermische Simulation dabei, die Ergebnisse aus den Freilandversuchen zu extrapolieren oder auf andere klimatische Randbedingungen zu übertragen. Es ist deshalb nicht verwunderlich dass die Rechenmodelle, die der Software-Familie WUFI® zugrunde liegen von Mitarbeitern der Freilandversuchsstelle des IBP entwickelt und experimentell verifiziert wurden.

Stand der Technik

Bereits seit einiger Zeit sind Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen dem Praktiker verfügbar (z.B. MATCH [1], WUFI® [2], Delfin vormals DIM [3]). Die steigende Anzahl von einschlägigen Fachveröffentlichungen zeigt, dass diese Verfahren zunehmend eingesetzt werden. Wegen der starken Einschränkungen der stationären Dampfdiffusionsbetrachtungen nach Glaser wird inzwischen auch in der Neufassung der DIN 4108-3 [4] zur Beurteilung von begrünten Dachkonstruktionen oder zur Berechnung der Aus-

trocknung von Rohbaufeuchte auf diese instationären hygrothermischen Berechnungsmodelle verwiesen. Zur Qualitätssicherung der modernen Rechenverfahren und ihrer Nutzung wurden auch von der WTA zwei Merkblätter erstellt [5, 6], die dem Praktiker bei der Auswahl und Anwendung dieser Rechenverfahren helfen sollen. Auf der Basis dieser Merkblätter entstand der CEN-Normungsentwurf prEN 15026 "Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation", der demnächst als europäische Norm erscheinen soll. Die Entwicklung der instationären Rechenverfahren ist jedoch nicht allein darauf ausgerichtet alte Beurteilungsmethoden zu ersetzen, sondern auch die Möglichkeiten des modernen Feuchteschutzes zu erweitern und andere Anwendungsgebiete zu erschließen. Im Folgenden werden deshalb einige aktuelle Entwicklungen bzw. Tendenzen im Bereich der hygrothermischen Modellierung kurz skizziert.

Rechenverfahren WUFI®

Aus den von Künzel [2] beschriebenen physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports lässt sich ein geschlossenes Differentialgleichungssystem entwickeln, mit dem man das Feuchteverhalten mehrschichtiger Bauteile unter natürlichen Klimarandbedingungen berechnen kann. Die wesentlichen Grundlagen des ein- und zweidimensionalen EDV-Programms WUFI® (Wärme- und Feuchtetransport instationär) werden kurz erläutert und auf die erforderlichen Klima- und Materialdaten eingegangen. Künzel [2] gibt einen Überblick über die Feuchte-transportphänomene, die abhängig vom Aggregatzustand in porösen mineralischen Baustoffen auftreten können. Einige Transporteffekte sind unter praktischen Bedingungen am Bau weniger bedeutsam und werden deshalb nicht berücksichtigt. Folgende Transportmechanismen sind hingegen wesentlich für bauphysikalische Betrachtungen:

- Dampfdiffusion beruht auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand.
- Oberflächendiffusion stellt den Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe dar.
- Lösungsdiffusion findet nur in nichtporösen Stoffen, z.B. organischen Polymeren statt. Der Wassertransport er-

* Dr. Hartwig M. Künzel, Prof. Dr. Klaus Sedlbauer, Dr. Andreas Holm und Dr. Martin Krus, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

folgt durch An- und Einlagern von Wassermolekülen in die Makromoleküle der Polymere auf der feuchten Seite. Durch Quellvorgänge werden dabei neue Porenräume für die Wassermoleküle geschaffen, in denen sie zur trockneren Seite wandern.

- Kapillarleitung stellt den Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen dar.

In [2] wird außerdem festgestellt, dass zur Berechnung des nicht isothermen Feuchtetransports in porösen Stoffen zwei unabhängige treibende Potentiale erforderlich sind. Einfache und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtetreibkräfte "Dampfdruck" und "Kapillardruck". Der schwer messbare Kapillardruck lässt sich über die Kelvin-Beziehung in die relative Feuchte umwandeln. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotentiale dar, die allgemein bekannt und einfach zu messen sind. Das resultierende gekoppelte Gleichungssystem ist mittels des Programms WUFI® numerisch lösbar. Die mit WUFI® ermittelten Feuchte- und Temperaturfelder dienen als Anfangsbedingungen für die weiterführende Berechnung mit dem bihygrothermischen Modell.

Eingabeparameter	Erforderliche Datensätze oder Angaben
Geometrie	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	numerisches Gitter
Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie -funktionen	Rohdichte und Porosität
	spezifische Wärmekapazität
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	evtl. Feuchtespeicherfunktion
Klimaparameter	Temperatur
	relative Luftfeuchte
	kurzwellige Strahlung (nur außen)
	Niederschlag auf die Bauteiloberfläche (nur außen)
	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Strahlungsabsorptionsgrad
	Regenabsorptionsfaktor (nur außen)
	Zeitschritte
Steuerparameter	Rechengenauigkeit
	Form der Anfangsbedingungen (z.B. Startzeitpunkt)
	Sonstige berechnungsspezifische Parameter

Tabelle 1: Zusammenstellung der für WUFI®-Berechnungen erforderlichen Daten.

Eine Zusammenstellung der für eine Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI® erforderlichen Datensätze zeigt Tabelle 1. Im Wesentlichen ist zunächst die Kenntnis folgender Informationen erforderlich:

- Der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter, dessen Elementgrößen dem Schicht-

aufbau und der zu erwartenden lokalen Klimaeinwirkungen angepasst werden.

- Die hygrothermischen Stoffkennwerte und -funktionen der am Aufbau beteiligten Baustoffe; d.h. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit, die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung. Die für Berechnungen benötigte Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der Sorptionsisotherme und der Saugspannungskurve zusammen und gibt in Abhängigkeit von der am Baustoff anliegenden relativen Feuchte dessen Wassergehalt an. Die Messung der Sorptionsisotherme ist aber nur bis zu einer maximalen relativen Luftfeuchte von 95 % technisch möglich. Der darüber liegende Kapillarwasserbereich wird deshalb mithilfe der Saugspannungsmessung erfasst. Beide Messergebnisse werden zu einer Feuchtespeicherfunktion zusammengefasst.

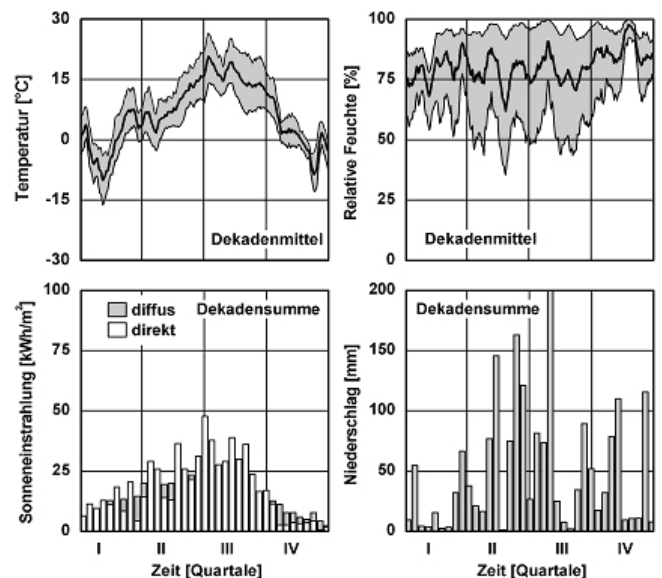


Bild 1: Klimatische Randbedingungen auf der Basis von gemessenen Stundenmittelwerten eines typischen Jahres am Standort Holzkirchen nach [15]. Die Außenlufttemperatur und -feuchte sind als gleitende Dekadenmittel mit Angabe des täglichen Schwankungsbereichs, die kurzwellige Strahlung und der Niederschlag als Dekadensummen dargestellt.

- Die inneren und äußeren klimatischen Randbedingungen sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als außenseitige Klimaparameter dienen Stundenmittelwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte sowie der solaren Einstrahlung, des Normal- oder Schlagregens und der Windgeschwindigkeit. Als typische Verläufe des Außenklimas liegen unterschiedliche, statistisch ausgewertete Jahresverläufe des Klimas vor [15]. Bild 1 zeigt den für die Berechnungen verwendeten Klimadatensatz. Über das Innenklima wurde von Künzel [16] eine Auswertung von Messungen in einer Vielzahl von Wohnräumen durchgeführt. Daraus

werden durchschnittliche Feuchtelasten bei reiner Büronutzung (gering), bei Wohnraumnutzung (normal) und bei hoher Feuchtelastung, z.B. bei Überbelegung in Sozialwohnungen, definiert. Berechnet man anhand dieser Feuchtelasten die sich im Jahresverlauf einstellenden relativen Raumlufffeuchten, so ergeben sich für die drei Nutzungsfälle die in Bild 2 dargestellten sinusförmigen Verläufe. Die Tiefstwerte liegen dabei immer im Februar und die Höchstwerte im August.

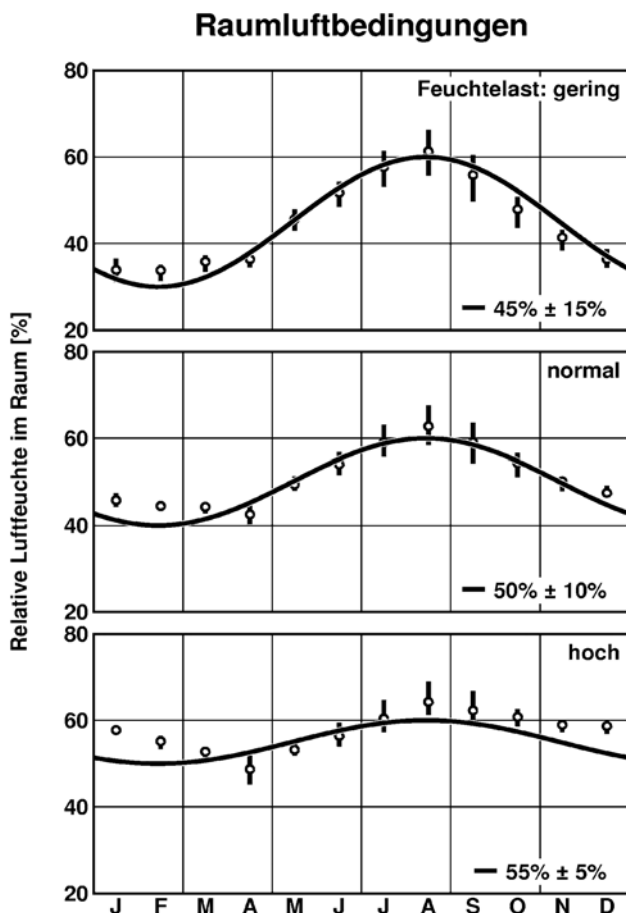


Bild 2: Aus den Daten der deutschen Test-Referenzjahre ermittelte Verläufe der Raumlufffeuchte für drei unterschiedliche Feuchtelasten nach [16]. Die eingezeichneten Punkte und Balken stellen die Mittelwerte und die Bandbreiten der lokalen Unterschiede für das deutsche Klima dar. Ferner werden die jeweiligen Jahresmittelwerte sowie die saisonale Schwankungsbreite der Raumlufffeuchte für die Sinus-Approximation angegeben.

- Die Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen an den Bauteilgrenzen sowie Steuerparameter. Zu den Übergangsbedingungen gehören der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient sowie der Strahlungsabsorptionsgrad und der Regenfaktor. Durch Steuerparameter werden die Rechengenauigkeit, die Form der Anfangsbedingungen und andere berechnungsspezifische Parameter eingestellt.

Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtefelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen ausgegeben. Aus diesen Ergebnissen können sowohl die langzeitlichen

Verläufe der hygrothermischen Parameter (Temperatur, relative Feuchte, Wassergehalt) an verschiedenen Positionen im Bauteil als auch deren örtliche Verteilungen (Profile) zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden. Eine zweckmäßige und anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. Bild 3 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Simulation des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

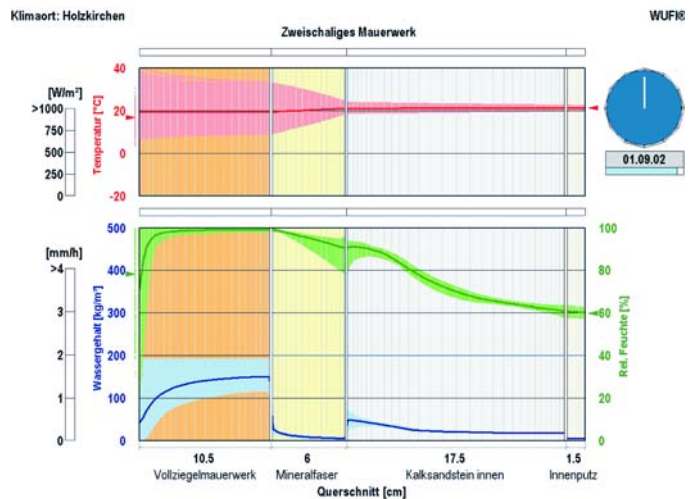


Bild 3 Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer zweischaligen, nach Westen orientierten Außenwand mit Kerndämmung im Verlauf des Monats August. Temperaturschwankungen finden praktisch nur in der Außenschale statt. Der Wassergehalt in der Außenschale erreicht niederschlagsbedingt hohe Werte bis hin zur freien Wassersättigung des Mauerwerks (obere Begrenzung des Bereichs). Die Feuchteschwankungen im äußeren Teil der Innenschale sind durch "Umkehrdiffusion" bedingt.

Aktuelle Entwicklungen zur hygrothermischen Modellierung

In vielen Fällen reicht die detaillierte Kenntnis des hygrothermischen Bauteilverhaltens allein nicht aus, um Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit machen zu können. Dazu sind spezielle Beurteilungskriterien bzw. Bewertungsmodelle erforderlich, die aus den instationären Temperatur- und Feuchteverläufen Aussagen zur Dauerhaftigkeit und zum Schadensrisiko ableiten können. Hier steht die Bauphysik allerdings erst am Anfang einer Entwicklung, die in Zukunft für eine deutlich bessere feuchtetechnische Beurteilung und damit auch Schadensprävention im Bauwesen sorgen wird. Die zur Zeit international verfolgten Entwicklungsschienen betreffen zum einen die Verbesserung der Bauteilberechnung durch Implementierung stochastischer Ansätze [7] und Einbindung zusätzlicher Transportmodelle, wie z.B. turbulente Strömungsmodelle auf der Basis der vollständigen Navier-Stokes Gleichungen, Salztransportansätze oder Modelle, die die zeitliche Veränderung der Materialeigenschaften durch physikalische (Quellvorgänge, Auswaschung) oder chemische (Karbonatisierung, Hydratation) Prozesse sowie durch na-

türliche Alterung beschreiben. Zum anderen werden die bestehenden Verfahren mit anderen Modellen verknüpft, wie z.B. mit der energetischen Gebäudesimulation, biologischen Wachstumsmodellen oder Ansätzen zur mechanischen Festigkeit. In Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie sind am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in den letzten Jahren folgende Modelle entwickelt worden:

Luftströmungsmodell WUFI®-CFD

In den Belüftungsebenen von Bauteilen finden Konvektionsvorgänge statt, die von Auftriebskräften oder durch die windbedingte Gebäudeanströmung hervorgerufen werden. Vor allem in hohen Gebäuden kann das hygrothermische Verhalten von Außen- und Innenbauteilen auch durch Raumluftrömungen beeinflusst werden. Zur Modellierung solcher Vorgänge muss die hygrothermische Bauteilberechnung mit modernen Strömungssimulationsmodellen, den sog. CFD-Modellen (Computational Fluid Dynamics) verknüpft werden. Einfache Darcy-Ansätze, wie sie bisher in Bauteilberechnungsmodellen üblich sind, reichen nicht aus, um die damit verbundenen komplexen Strömungsverhältnisse korrekt erfassen zu können. Im Auftrag der deutschen Flugzeugindustrie, die ähnlich wie der Hochbau mit Kondensationsproblemen zu kämpfen hat (hier in der Kabinenwand von Verkehrsflugzeugen) ist deshalb am IBP ein hygrothermisches CFD-Modell (WUFI®-CFD) entwickelt worden. Damit können, wie in Bild 4 gezeigt, sowohl die instationären Temperatur- und Feuchtefelder als auch die Luftströmungsverhältnisse in der Flugzeughülle während der verschiedenen Flugphasen und am Boden simuliert werden.

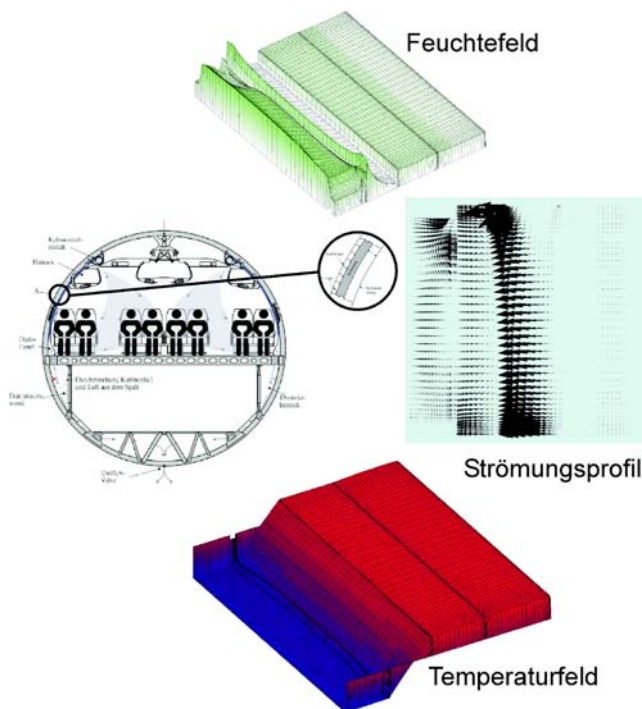


Bild 4: Mit WUFI®-CFD berechnetes Temperatur-, Feuchtefeld und Luftströmungsprofil in der Hüllkonstruktion eines Verkehrsflugzeugs während der Flugphase.

Raumklimamodell WUFI®-Plus

Ein internationaler Schwerpunkt ist die Verknüpfung der hygrothermischen Bauteilberechnung und der energetischen Gebäudesimulation [8 - 10]. Durch diese Verknüpfung können auch die Wärme- und Feuchte-Wechselwirkungen zwischen dem Gesamtgebäude und seinen Bauteilen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Feuchtepufferwirkung der Umschließungsflächen bei Änderungen der Feuchtelast im Raum oder die Feuchtesorption bzw. -desorption bei Temperaturänderungen an den Bauteiloberflächen (z.B. durch die strahlungsbedingte Bauteilerwärmung oder nächtliche Abkühlung). Ein wesentlicher Zweck dieser Entwicklung ist die Schaffung von Planungswerkzeugen zur Gewährleistung eines behaglichen Raumklimas bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieaufwandes für die Klimatisierung von Gebäuden. Durch gezielte Nutzung des Wärme- und Feuchtespeichervermögens der Gebäudemasse oder spezieller Einbauten sollen Raumklimaschwankungen soweit wie möglich ohne den Einsatz von Klimaanlage begrenzt werden. Ähnliches gilt für die Temperierung temporär genutzter Gebäude. Bei richtiger Auslegung und Steuerung kann dort der Heizenergieeinsatz auf das zum Erhalt der Bausubstanz notwendige Minimum beschränkt werden.

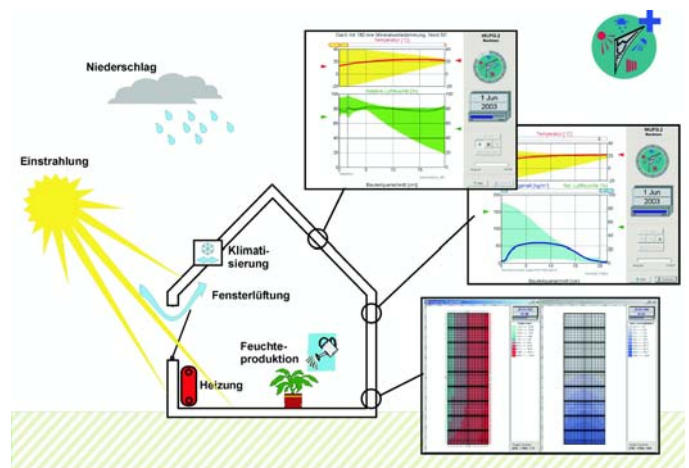


Bild 5: Beispielhafte Darstellung der Modellverknüpfungen bei der Raumklimasimulation mit WUFI®-Plus zur Berücksichtigung der hygrothermischen Wechselwirkung zwischen Raumlufte und Gebäudehülle.

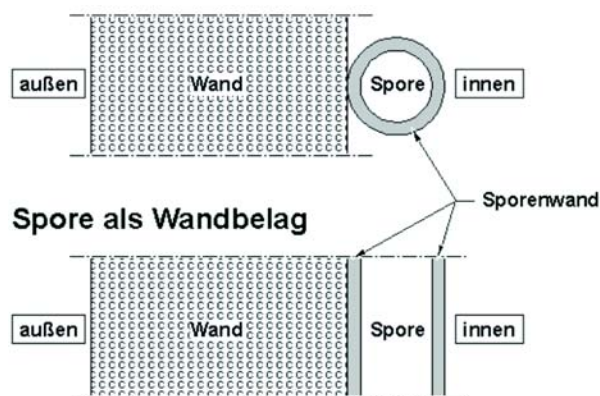
Im Rahmen der WUFI®-Familie wurde dazu das Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt [11, 12]. Es besteht aus einem Raumbilanzierungsmodul an das beliebig viele - die Zahl richtet sich nach Anzahl der sowohl im Aufbau als auch in der Orientierung unterschiedlichen Raumumschließungsflächen - eindimensionale Bauteilsimulationen gekoppelt werden. Diese Ankopplung ist in Bild 5 beispielhaft für eine Dach- und eine Außenwandfläche dargestellt. Eventuelle Wärmebrücken haben zwar im Vergleich zu den flächenmäßig wesentlich größeren ungestörten Bereichen (Bauteilregelquerschnitt) meist keinen großen Einfluss auf das Raumklima, umkehrt hat aber das Raumklima bedeutende Auswirkungen auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse und damit auch das

Schimmelpilzrisiko an der Wärmebrücke. Ähnliches gilt für Wände, die noch anderen Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt sind, wie z.B. lokal begrenzte Baufeuchte oder aufsteigende Grundfeuchte. In solchen Fällen können die Ergebnisse des Raumklimamodells WUFI®-Plus als Eingabe für zweidimensionale Bauteilberechnungen (z.B. mit WUFI®-2D) dienen, wie ebenfalls in Bild 5 rechts unten angedeutet ist. Dadurch lassen sich die instationären hygrothermischen Bedingungen an neuralgischen Punkten der Gebäudehülle recht genau bestimmen.

Biohygrothermisches Modell WUFI®-Bio

Von besonderer Bedeutung für die Baupraxis ist die Beurteilung des Wachstumsrisikos von Schimmelpilzen auf Gebäudeoberflächen und im Inneren von Bauteilen. Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren für das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der genauen Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung mit Hilfe eines neuartigen biohygrothermischen Modells WUFI®-Bio eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden.

Realitätsnahes Modell (stark vergrößerte Spore)



Modellspore

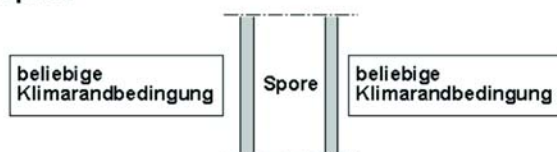


Bild 6: Schematisierte Vergleichsdarstellung einer Spore auf einer Wand (oben), einer Spore als Wandbelag (Mitte) und einer Modellspore (unten).

Das Verhältnis zwischen Sporendurchmesser zur Wanddicke (30 cm) beträgt rund 1:100.000. Die reale Spore berührt den Baustoff, d.h. die hygrothermischen Randbedingungen an dieser Oberfläche beeinflussen die feuchtetechnischen Vorgänge in der Spore. Allerdings beeinflusst die Spore aufgrund ihrer geringen Abmessungen nicht die bauphysikalischen Randbedingungen im Bereich der Baustoffoberfläche. Daher wird keine Gesamtmodellierung, gemäß Bauteilaufbau mit der Spore als Wandbelag (Bild Mitte) verwendet, sondern eine von der Wand unabhängige "Modellspore" (Bild unten). Damit können beliebige Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte als Klimarandbedingungen bei biohygrothermischen Berechnungen berücksichtigt werden.

Um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, bauphysikalisch beschreiben zu können, wurde ein neuartiges biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen. Bild 6 zeigt schematisch die dem biohygrothermischen Verfahren WUFI®-Bio zugrunde liegende Modellspore. Dieses instationäre Verfahren beruht auf dem Grundgedanken, dass eine Pilzspore wegen der in ihr vorhandenen Stoffe ein gewisses osmotisches Potential besitzt, mit dessen Hilfe Wasser aus der Umgebung aufgenommen werden kann. Dieses Potential wird rechnerisch mit Hilfe einer Feuchtespeicherfunktion beschrieben (Bild 7).

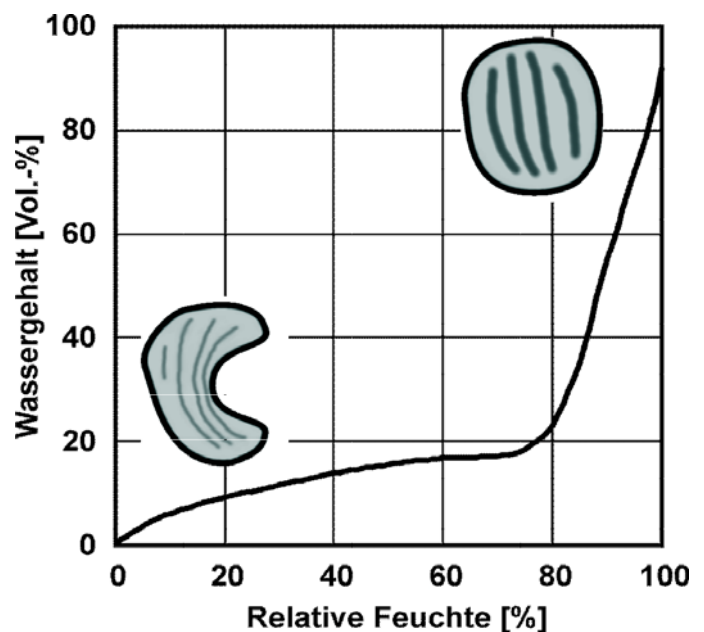


Bild 7: Feuchtespeicherfunktion zur Beschreibung der Modellspore [13].

Die Feuchtaufnahme der Spore durch die Sporenwand hindurch wird im Modell mittels eines Diffusionsansatzes erfasst. Die Sporenwand erhält dabei einen feuchteabhängigen s_d -Wert, der durch Vergleich der berechneten mit den in den vorliegenden Isoplethensystemen fixierten Sporenauskeimungszeiten iterativ angepasst wurde (Bild 8). Ist ein bestimmter Wassergehalt im Sporenninneren vorhanden, der den Beginn des Stoffwechsels zulässt, kann der Pilz unabhängig von äußeren Bedingungen seinen Stoffwechsel selbst regulieren. Der komplizierte Regelmechanismus ist weitgehend unbekannt und kann daher nicht modellhaft beschrieben werden. Dies ist aber auch nicht erforderlich, weil der kritische Wassergehalt (Grenzwassergehalt), ab dem die biologische Aktivität einsetzt, erst gar nicht überschritten werden darf. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt, indem temperaturabhängig

aus den entsprechenden LIM-Kurven [13] die tiefste relative Feuchte ablesbar ist, bei der Sporenauskeimung stattfindet (Bild 9). Mithilfe der für das Sporennere zugrunde gelegten Feuchtespeicherfunktion kann der in der Spore sich einstellende Wassergehalt errechnet und dann mit dem Grenzwassergehalt verglichen werden.

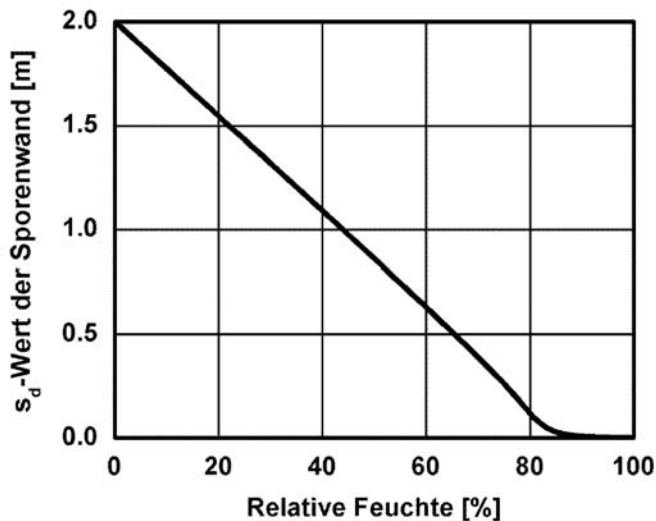


Bild 8: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) für die im biohygrothermischen Modell verwendete Sporenwand

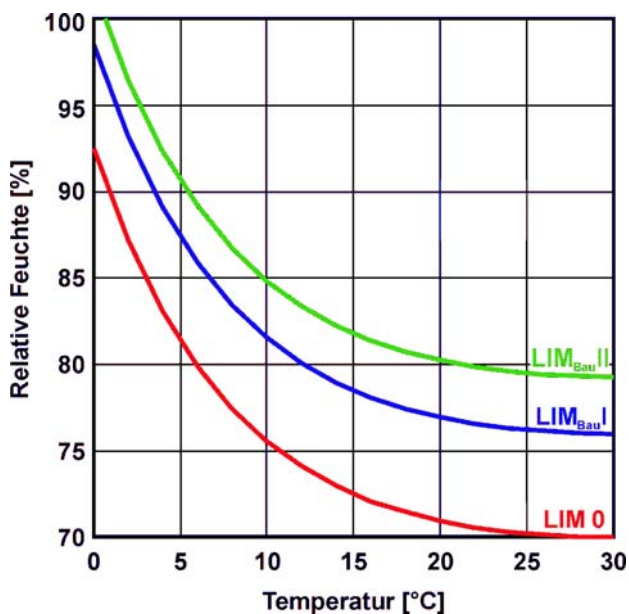


Bild 9: Angabe der für Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur und Substratgruppe erforderlichen relativen Feuchte.

Die untere Wachstumsgrenze wird mit dem Begriff Lowest Isoleth for Mould (LIM) beschrieben; die Substratgruppen besitzen folgende Bedeutung:

- 0 optimales Substrat (biologische Vollmedien)
- I biologisch gut verwertbare Substrate (z.B. Tapeten, Verschmutzung)
- II biologisch kaum verwertbare Substrate (z.B. mineralische Baustoffe)

Zur Berücksichtigung möglicher Substrateinflüsse sind die s_d -Werte der Sporenwand so angepasst worden, dass die unter stationären Bedingungen mit WUFI®-Bio ermittelten Sporenauskeimungszeiten denjenigen in den Isolethensystemen der Substratgruppen 0, I und II ent-

sprechen. Durch dieses Anpassen der s_d -Werte der Sporenwand kann eine Modellspore definiert werden, die für alle drei Substratgruppen Gültigkeit besitzt. Ferner sind bei der Festlegung der substratabhängigen Grenzwassergehalte die LIM-Kurven in den Isolethensystemen der entsprechenden Substratgruppen zu verwenden.

Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [13] enthalten. Ähnliche Modelle werden derzeit auch zur Prognose von Algenwachstum auf Fassaden entwickelt.

Kombination von Raumklimamodell und biohygrothermischem Verfahren

Die zunehmende Anzahl von Veröffentlichungen zeigt, dass das Auftreten von Schimmelpilzen in Wohnräumen trotz steigendem Dämmstandard immer noch ein wichtiges Thema ist. Ein Hauptgrund dafür ist ein falsch verstandenes Energiesparbewusstsein, das dazu führt, dass zu wenig und häufig falsch gelüftet wird. Dies liegt auch daran, dass die für die Schimmelpilzvermeidung erforderliche Lüftung in komplexer Weise von den Klimarandbedingungen, der Baukonstruktion, den unterschiedlichen nutzungsabhängigen Feuchtelasten sowie den sorptiven Eigenschaften der Innenoberflächen und des Mobiliars abhängt. Bei unsachgemäßer manueller Fensterlüftung kann es besonders bei hohen internen Feuchtelasten zu einem Befall mit Schimmelpilzen kommen.

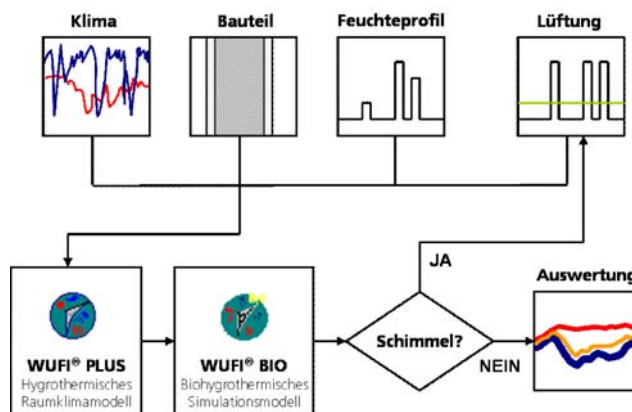


Bild 10: Ablaufschema für die Ermittlung der zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen Lüftung

Eine ausreichende Lüftung, auch bei Abwesenheit der Nutzer, ist zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung notwendig. Dabei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzung, verbunden mit den jeweiligen Feuchtelasten, für jedes Zimmer andere Lüftungserfordernisse [14]. Mit Hilfe des in Bild 10 dargestellten Ablaufschemas können durch eine Kombination von WUFI®-Plus und WUFI®-Bio optimierte Lüftungsstrategien in Abhängigkeit von unterschiedlichen Feuchtelasten ermittelt werden. Bei der Berechnung ist jedoch zu beachten, dass es besonders in den Raumecken aufgrund der Wirkung der geometrischen

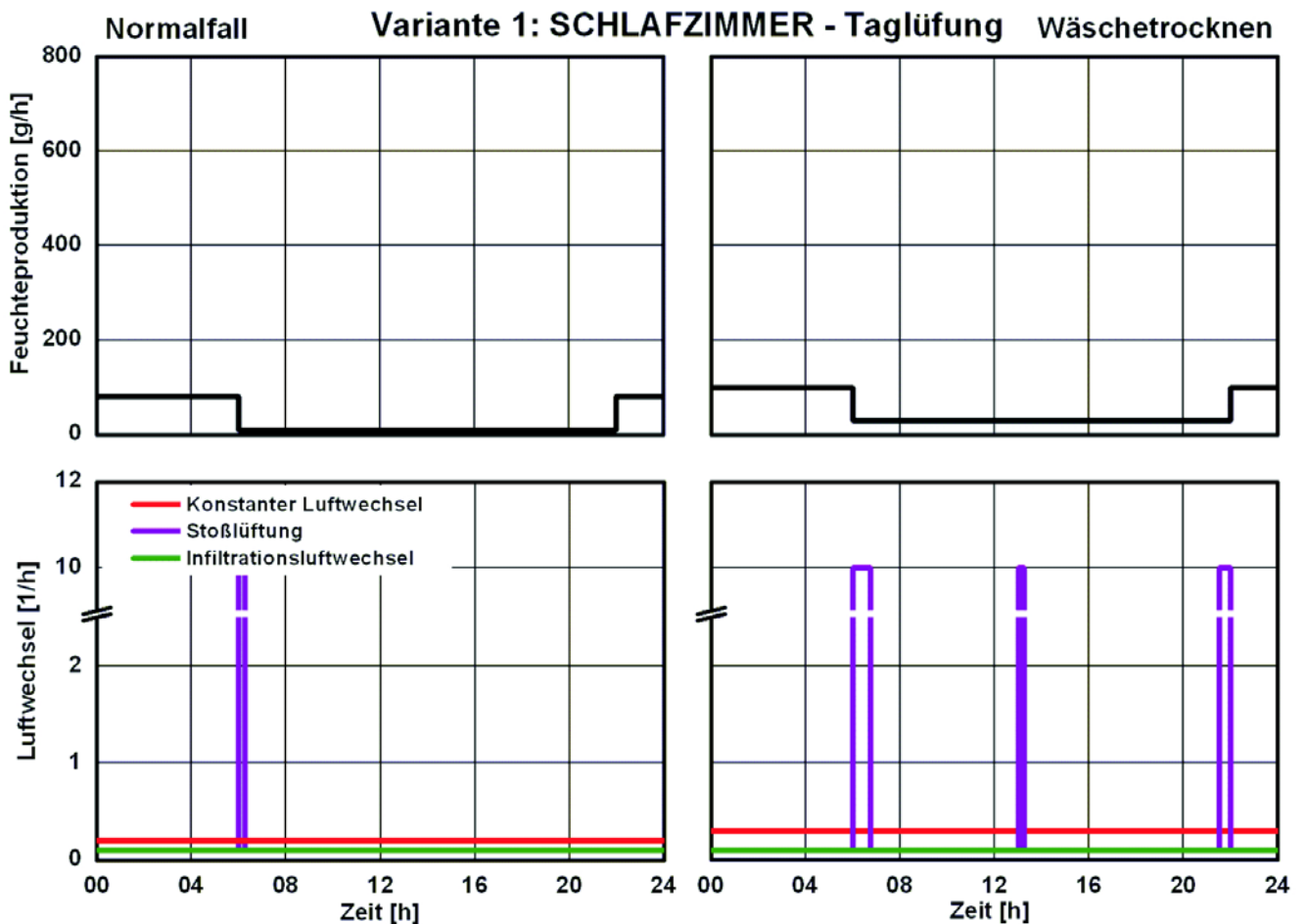


Bild 11: Oben: Zeitverlauf der angenommenen Feuchteproduktion im Schlafzimmer einer gut gedämmten Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.
 Unten: Zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung zusätzlich zum dargestellten Infiltrationsluftwechsel.

Wärmebrücke und der reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten zu niedrigeren Oberflächentemperaturen und somit höheren Oberflächenfeuchten kommt. Die Ermittlung der erforderlichen Luftwechselrate oder Fensteröffnungszeiten für Stoßlüftung oder Spaltlüftung erfolgt iterativ, indem bei vorgegebenem Lüftungsprofil die instationären Temperatur- und Feuchteverläufe in den Raumecken ermittelt werden. Anhand dieser erfolgt mit Hilfe des biohygrothermischen Modells die Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos mit anschließender Anpassung des Lüftungsprofils bis zum Erreichen des gerade erforderlichen Luftwechsels. Als Beispiel zeigt Bild 11 den zeitlichen Verlauf der Feuchteproduktion sowie die daraus zur Schimmelpilzvermeidung resultierenden Lüftungserfordernisse im Falle der Dauerlüftung bzw. der Stoßlüftung für ein Schlafzimmer einer mit einem Wärmedämmverbundsystem gedämmten Wohnung ohne und mit Wäschetrocknung (weitere Beispiele in [17]). Bei dem dargestellten konstanten Mindestluftwechsel (rote Linie) bzw. dem Mindeststoßluftwechsel (violette Linie) ergeben sich in den Außenraumecken Oberflächenfeuchten, die gemäß den Berechnungen mit dem biohygrothermischen Modell gerade unterhalb der für Schimmelpilzbildung erforderlichen Wachstumsvoraussetzungen liegen. Als grüne Linie ist der dabei angesetzte und im konstanten

Mindestluftwechsel enthaltene Infiltrationsluftwechsel mit angegeben. Der Einfluss der erhöhten Feuchtelast durch Wäsche trocknen ist deutlich zu erkennen. Wird in der Wohnung Wäsche getrocknet reicht die morgendliche Stoßlüftung nicht mehr aus, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden; hier müssen dreimal täglich die Fenster geöffnet werden. Die energetische Betrachtung der gesamten Wohnung ergibt dabei, dass die Wäschetrocknung über den erhöhten Mehrbedarf an Lüftung zusätzlichen Energieverbrauch bewirkt, der größer ist als der eines Kondensationstrockners.

Auswertemodelle (Ergebnisverarbeitung)

Die Ergebnisse der hygrothermischen Gebäude- oder Bauteilsimulation zeigen die in der Praxis auftretenden instationären Temperatur- und Feuchtefelder sowie Wärme- und Feuchtestrome auf. Wie in Bild 12 skizziert, lassen sich daraus in Verbindung mit weiteren Modellansätzen Rückschlüsse auf das energetische Verhalten und die Gebrauchstauglichkeit der untersuchten Bauprodukte ziehen. Beispielsweise sind die feuchtebedingten Transmissions- oder Latentwärmeverluste sowie die erforderlichen Lüftungsraten zum Abführen der Feuchte über die Nutzungsdauer eines Gebäudes bilanzierbar. Solche Ergeb-

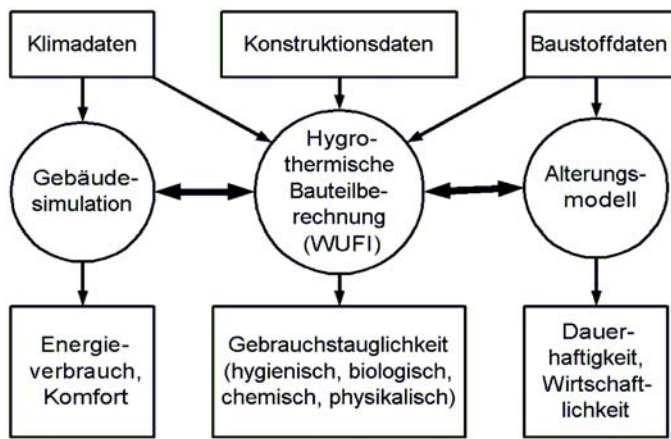


Bild 11: Verknüpfung der Modelle zur hygrothermischen Modellierung und Ergebnisverarbeitung.

nisse können dann auch in die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit einfließen.

Literatur

- [1] Rode Pedersen, C. Combined heat and moisture transfer in building constructions. Diss. TU Denmark 1990.
- [2] Künzle, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart 1994.
- [3] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Diss. TU Dresden 1997.
- [4] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001.
- [5] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Mai 2002.
- [6] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.
- [7] Holm, A.: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Diss. Universität Stuttgart 2001.
- [8] Karagiozis, A. N. und Salonvaara M.: Hygrothermal system-performance of a whole building. Building and Environment, Vol. 36 (2001), No. 6, pp 779-787.
- [9] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden - Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Diss. TU Wien 2000.
- [10] Rode C. und Grau K.: Synchronous calculation of transient hygrothermal conditions of indoor spaces and building envelopes. Proceedings Building Simulation, Rio de Janeiro, 13-15. Aug. 2001.
- [11] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzle, H.M.; Radon, J.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen - Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte. Tagungsbeitrag für das 11. Bauklimatische Symposium der TU Dresden. 26. - 30. Sep. 2002, Dresden, S. 562 - 575.
- [12] Holm, A.; Radon, J.; Künzle, H.M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81 - 94. Hrsg.: WTA-Publications, München.
- [13] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [14] Richter, W.; Hartmann, Th.: Mindestluftwechsel zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnungen. VDI-Berichte Nr. 1603, (2001), S. 121-130.
- [15] Künzle, H. M.; Schmidt, T.: Wetterdaten für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen. IBP-Mitteilung 27 (2000), Nr. 364.
- [16] Künzle, H. M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 (1997), Nr. 314.
- [17] Kainz, E.: Lüftungskonzepte zur Erhaltung der Raumluftqualität und gleichzeitiger Vermeidung von Schimmelpilzen. Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen, Fachhochschule Rosenheim (2004).