

# Hygrothermische Lüftungskonzepte

## Einleitung

Insbesondere im Bestand ist die Anzahl von Gebäuden mit Schimmelpilzproblemen in den letzten Jahrzehnten gestiegen. Der Hauptgrund für dieses Phänomen liegt an der mit wärmeschutztechnischen Maßnahmen (Fenster austausch) gleichzeitig einhergehende Verbesserung der Luftdichtheit der Gebäudehülle, die ohne zusätzliche, bewusst eingesetzte Lüftungsmaßnahmen zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchte führen kann. Die in diesem Zusammenhang häufig propagierte Stoßlüftung durch den Nutzer hat sich leider als wenig wirksam erwiesen, da sie das reale Feuchteverhalten in Gebäuden zu wenig berücksichtigt. Das Ziel der Stoßlüftung ist ein nahezu vollständiger Austausch der Raumluft bei gleichzeitig möglichst geringem Wärmeverlust, d. h., die Wärme in den Decken und Wänden soll durch die kurze Dauer der Außenluftzufuhr keine Gelegenheit haben, zu entweichen. Geht es um die Beseitigung von Gerüchen oder Kohlendioxid aus der Raumluft ist eine Stoßlüftung sicher sinnvoll. Soll allerdings auch die von den Bewohnern produzierte Feuchte abgeführt werden, ist ihre Wirksamkeit begrenzt. Da ein großer Teil der Feuchte – ähnlich wie bei Wärme – in der Gebäudehülle und im Mobiliar gespeichert ist, bleibt sie für die Stoßlüftung unerreichbar, denn die Feuchteaustauschprozesse sind noch deutlich langsamer als der Wärmeaustausch zwischen Raumluft und Gebäudehülle.

Wie wird also richtig gelüftet? Wie muss ein Lüftungskonzept aussehen, das die Raumluftfeuchte so steuert, dass eine Schimmelpilzbildung im Gebäude mit Sicherheit auszuschließen ist? Um diese Fragen beantworten zu können, benötigt man

1. so genannte instationäre – also zeitabhängige – Raumklimamodelle, die den Wärme- und Feuchteaustausch mit der Gebäudehülle praxisnah beschreiben

2. ein Modell, das eine Einschätzung des Schimmelpilzwachstumsrisikos auf den sensiblen Bauteiloberflächen (z. B. Wärmebrücken) erlaubt

Erst durch die Kombination solcher Modelle können Lüftungskonzepte entwickelt werden, die geeignet sind, unter Aufrechterhaltung eines hohen Hygienestandards und Nutzerkomforts die Lüftungswärmeverluste im Gebäude zu minimieren. Über den Hintergrund dieser Modelle und ihrer Einsatzmöglichkeiten soll hier berichtet werden.

## Wärme- und Feuchtetransportvorgänge in der Gebäudehülle

Das Fraunhofer IBP hat ein PC-Programm zur instationären Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen – WUFI® (Wärme und Feuchte instationär [1]) – für den Praktiker entwickelt. Die steigende Anzahl von einschlägigen Fachveröffentlichungen zeigt, dass diese Verfahren zunehmend eingesetzt werden. Wegen der starken Einschränkungen der stationären Dampfdiffusionsbetrachtungen wird inzwischen auch in der Neufassung der DIN 4108-3 [2] auf diese instationären hygrothermischen Berechnungsmodelle verwiesen. Seit letztem Jahr wird dem Praktiker der Einsatz hygrothermischer Berechnungsverfahren für die feuchtetechnische Beurteilung von Bauteilen durch die EN 15026 [3] nahegelegt. Die Grundlagen und Voraussetzungen der hygrothermischen Simulation werden hier am Beispiel des Rechenverfahrens WUFI® beschrieben. Aus den in [1] 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. Dabei sind folgende Transportmechanismen zu berücksichtigen:

Prof. Dr. Klaus  
Sedlbauer  
Fraunhofer IBP  
sedlbauer@  
hoki.ibp.fraunhofer.de

Dr. Hartwig M.  
Künzel  
Fraunhofer IBP  
kuenzel@  
hoki.ibp.fraunhofer.de

Prof. Dr. Anton Maas  
Universität Kassel  
Fachbereich Architektur,  
Stadtplanung,  
Landschaftsplanung;  
Fachgebiet Bauphysik  
maas@asl.uni-kassel.de

- **Dampfdiffusion:** thermische Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand.
- **Oberflächendiffusion:** Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe.
- **Kapillarleitung:** Flüssigwassertransport in den Kapillaren poröser Baustoffe.

Für die Berechnung des nicht-isothermen Feuchtetransports in porösen Stoffen sind zwei unabhängige treibende Potenziale erforderlich sind. Einfache und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtetriebkräfte „Dampfdruck“ und „Kapillardruck“. Der schwer messbare Kapillardruck lässt sich über die Kelvin-Beziehung<sup>1</sup> in die relative Feuchte umwandeln. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotenziale dar, die allgemein bekannt und einfach zu messen sind. Für die Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI® ist die Kenntnis folgender Informationen erforderlich:

- Der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter<sup>2</sup>, dessen Elementgrößen dem Schichtaufbau und der zu erwartenden lokalen Klimaeinwirkungen angepasst werden.
- Die thermischen und hygri-schen Stoffkennwerte und -funktionen der am Aufbau beteiligten Baustoffe; d. h. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit, der feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstand sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung.
- Die inneren und äußeren klimatischen Randbedingungen sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als Klimaparameter dienen Stundenmittelwerte der Temperatur und der relativen

<sup>1</sup> Über die Kelvin-Beziehung besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kapillardruck und relativer Luftfeuchte.

<sup>2</sup> Mit Hilfe eines numerischen Gitters können reale Bauteile simuliert und berechnet werden.

Luftfeuchte sowie der solaren Einstrahlung, des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit.

Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtefelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen erhalten. 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 sehr anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. *Abbildung 1* zeigt beispielhaft einen „Schnappschuss“ aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Berechnung des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

## Raumklimamodelle

Im Gegensatz zur weit verbreiteten energetischen Gebäudesimulation berücksichtigen Raumklimamodelle auch die komplexen instationären Feuchtetransport- und -austauschvorgänge in Gebäuden. Das heißt, solche Modelle basieren auf einer Verknüpfung von Gebäudesimulation und hygrothermischer Bauteilberechnung [4]. Durch diese Verknüpfung können auch die Wärme- und Feuchte-Wechselwirkungen zwischen der Raumluft und der Gebäudehülle 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 strahlungsbedingte Bauteilerwärmung oder nächtliche Abkühlung). Ein wesentlicher Zweck dieser Entwicklung ist die Schaffung von Planungswerkzeugen zur Sicherstellung eines hygienischen und 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

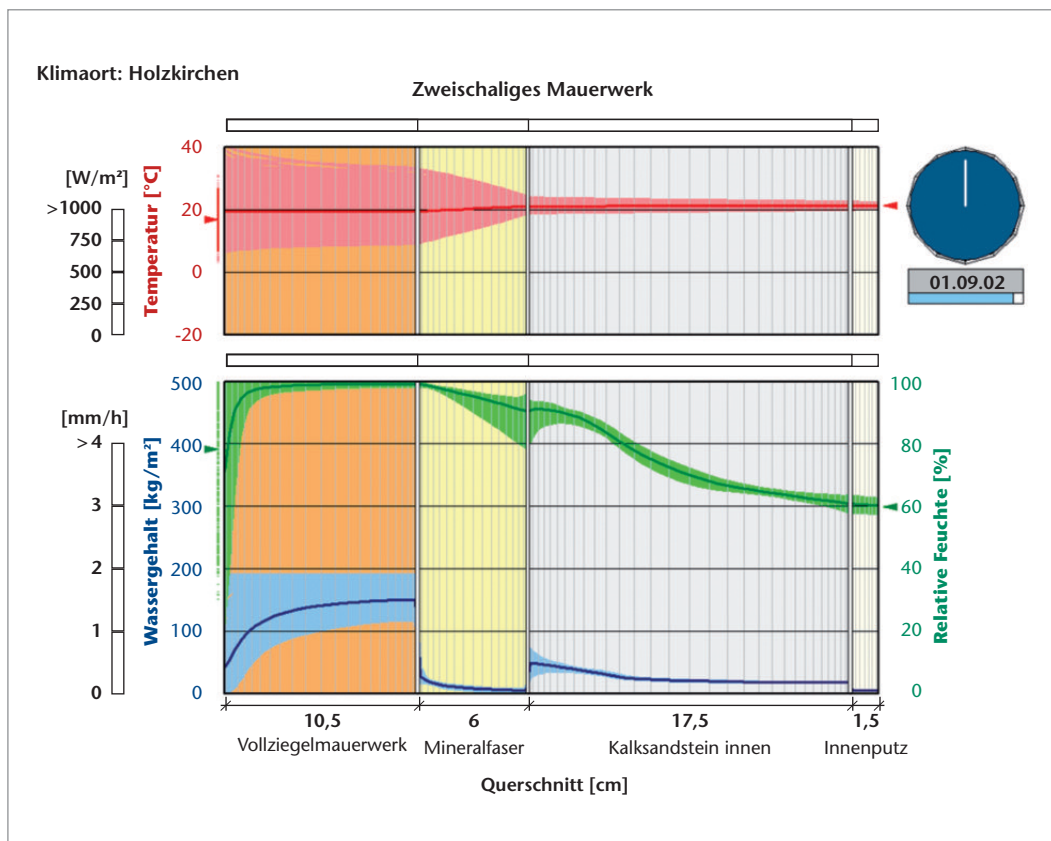


Abbildung 1  
Momentaufnahme der  
Filmdarstellung der  
instationären  
Temperatur- und  
Feuchteverteilung  
(Bereiche und  
Mittelwerte) in einer  
zweischaligen, nach  
Westen orientierten  
Außenwand mit  
Kerndämmung im  
Verlauf des Monats  
August

Grafik: Fraunhofer IBP

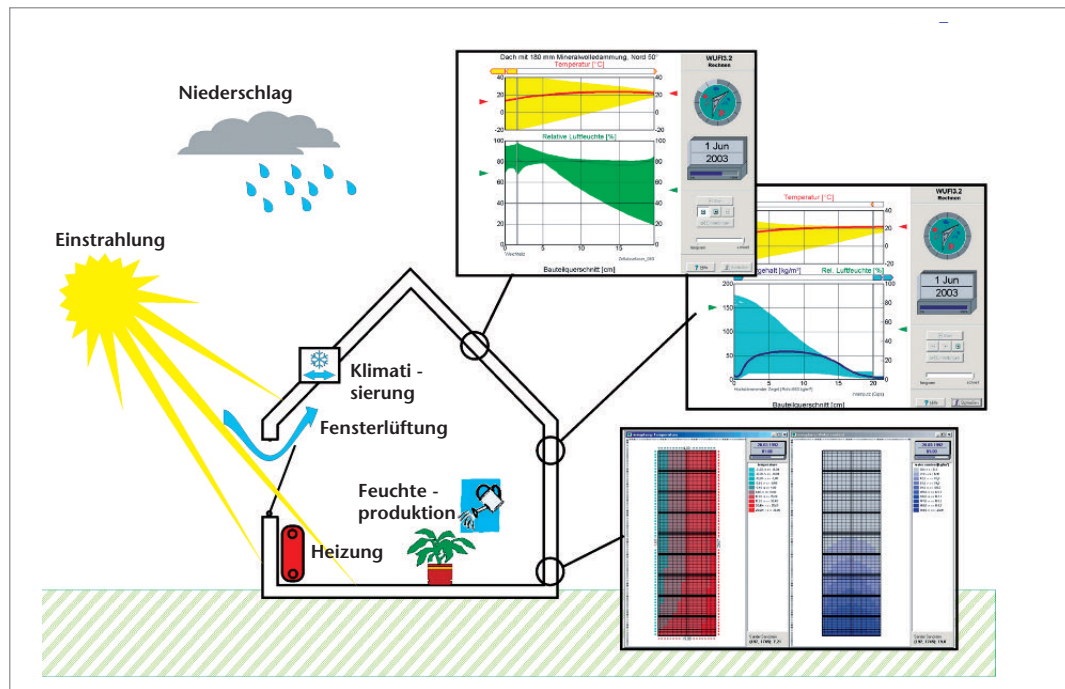
soweit wie möglich ohne den Einsatz einer aufwändigen Anlagentechnik begrenzt werden.

Dazu wurde das Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt. WUFI®-Plus besteht aus einem Raumbilanzierungsmodul, an das beliebig viele eindimensionale WUFI®-Bauteilsimulationen gekoppelt werden können. Die Zahl richtet sich nach Anzahl der sowohl im Aufbau als auch in der Orientierung unterschiedlichen Raumschließungsflächen. Diese Ankopplung ist in [Abbildung 2](#) 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 auf 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 [Abbildung 2](#) rechts unten angedeutet ist. Dadurch lassen sich die instationären hygrothermischen Bedingungen an kritischen Punkten der Gebäudehülle recht genau bestimmen.

Abbildung 2  
Beispielhafte  
Darstellung der  
Modellverknüpfungen  
zur Berücksichtigung  
der hygrothermischen  
Wechselwirkung  
zwischen Raumluft  
und Gebäudehülle

Grafik: Fraunhofer IBP



## Modelle zur Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos

Zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung werden die biologischen Wachstumsvoraussetzungen (Soll-Werte) mit den hygrothermischen Bedingungen verglichen. Die Ermittlung der „Ist-Werte“ sollte alle Einfluss nehmenden bauphysikalischen Vorgänge berücksichtigen. Die modernen hygrothermischen Berechnungsverfahren bieten dazu gute Voraussetzungen. 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 eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden. Um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung von Sporen bauphysikalisch beschreiben zu können, wurde ein biohygrothermisches Modell entwickelt (WUFI®-Bio) das in der Lage ist, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen.

Dieses instationäre Verfahren beruht auf dem Grundgedanken, dass eine Pilzspore wegen der in ihr vorhandenen Stoffe ein gewisses osmotisches Potenzial besitzt, mit dessen Hilfe Wasser aus der Umgebung aufgenommen werden kann. Dieses Potenzial wird rechnerisch mit Hilfe einer Feuchtespeicherfunktion beschrieben. Die Feuchtaufnahme der Spore durch die Sporenwand hindurch wird im Modell mittels eines Diffusionsansatzes erfasst. Ist ein bestimmter Wassergehalt im Sporennieren 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 in *Abbildung 3* dargestellten substratabhängigen Minimalbedingungen (LIM) festgelegt, die die untere hygrothermische Grenze für eine mögliche Keimung von Schimmelpilzsporen bilden. Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [5] enthalten.

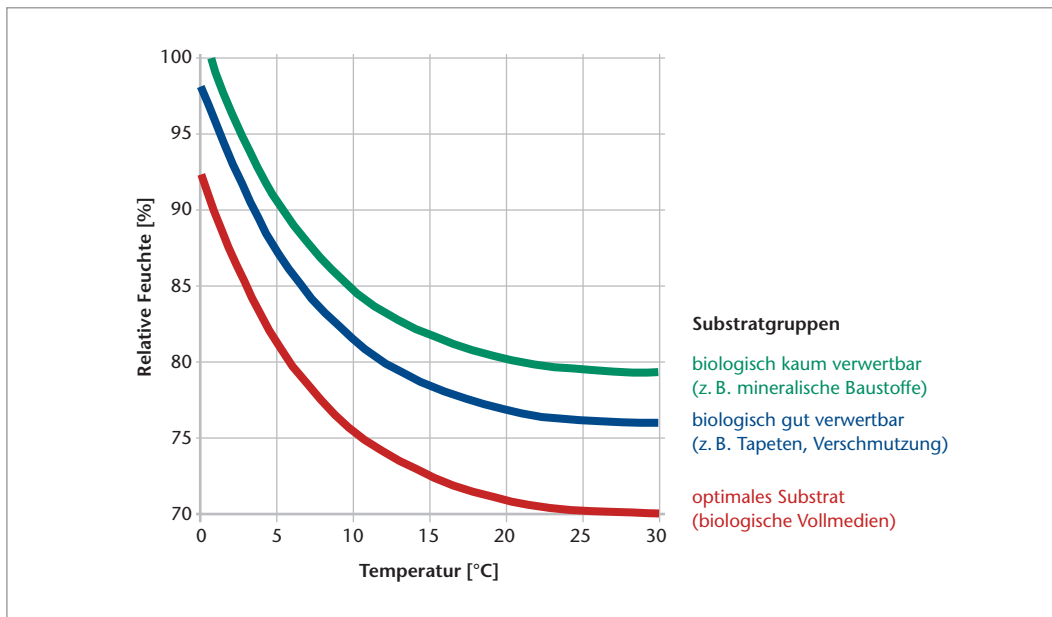


Abbildung 3  
 Substratabhängige  
 hygrothermische  
 Minimalbedingungen  
 (LIM) für das Auskei-  
 men von Schimmel-  
 pilzsporen nach [5]

Grafik: Fraunhofer IBP

## Kombination von Raum- klimamodell und Schimmel- pilzprognosemodell

Die zunehmende Anzahl von einschlägigen Veröffentlichungen zeigt, dass Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze trotz steigendem Dämmstandard immer noch ein wichtiges Thema ist. Ein Hauptgrund dafür ist ein falsch verstandenes Energiesparbewusstsein, das dazu führt, dass zu wenig und 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. Eine ausreichende Lüftung, auch bei Abwesenheit der Nutzer, ist vor allem zur Vermeidung von Feuchteschäden notwendig. Dabei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzung verbunden mit den jeweiligen Feuchtelasten für unterschiedliche Räume verschiedene Lüftungserfordernisse [6]. Mit Hilfe der Kombination eines Raumklimamodells (WUFI®-Plus) und eines Modells zur Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos (WUFI®-Bio) können sinnvolle Lüftungsstrate-

gien ermittelt werden. Bei der Berechnung ist jedoch zu beachten, dass es besonders in den Raumecken aufgrund der Wirkung der geometrischen 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 von WUFI®-Bio die Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos mit anschließender Anpassung des Lüftungsprofils bis zum Erreichen des gerade erforderlichen Luftwechsels.

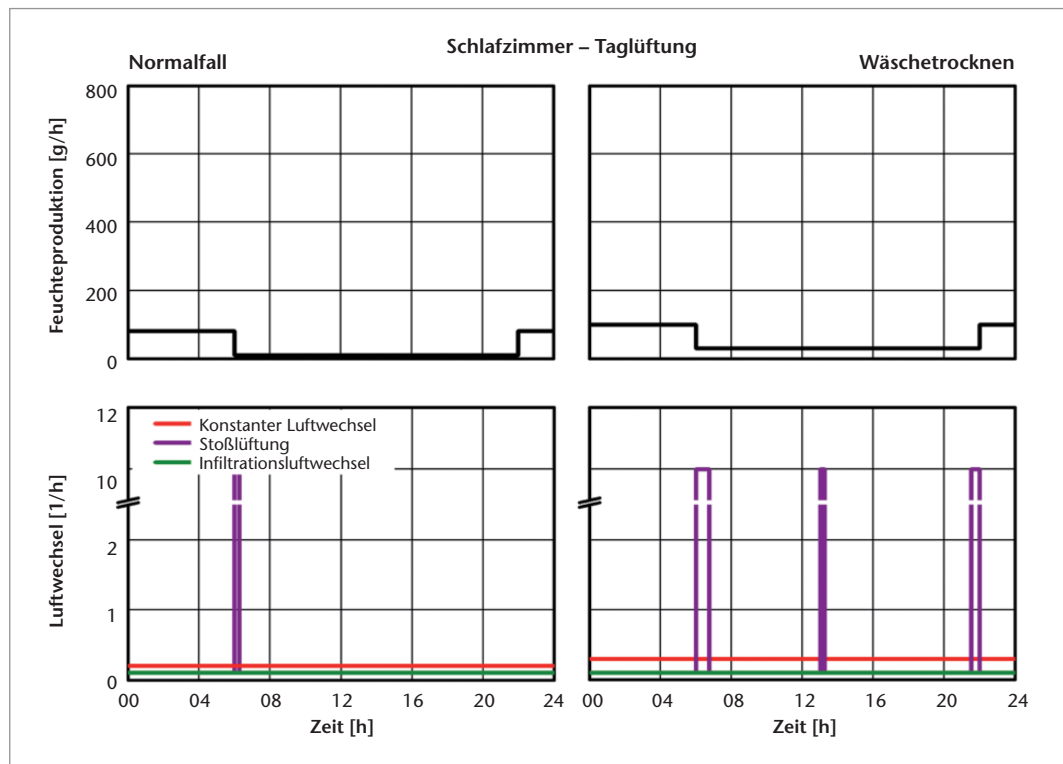
Als Beispiel zeigt *Abbildung 4* den zeitlichen Verlauf der Feuchteproduktion sowie die daraus zur Schimmelpilzvermeidung resultierenden Lüftungserfordernisse im Falle der Dauerlüftung bzw. der Stoßlüftung für ein Schlafzimmer einer mit einem Wärmedämmverbundsystem gedämmten Wohnung ohne und mit Wäschetrocknung. Bei dem dargestellten konstanten Mindestluftwechsel (rote Linie) bzw. dem Mindeststoßluftwechsel (lila Linie) ergeben sich in den Raumecken Oberflächenfeuchten, die gemäß den Berechnungen mit WUFI®-Bio gerade unterhalb der für Schimmelpilzbildung erforderlichen Wachstumsvoraussetzungen

Abbildung 4

Oben: Zeitverlauf der angenommenen Feuchteproduktion im Schlafzimmer einer gut gedämmten Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.

Unten: Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung. Mit dargestellt ist der Infiltrationsluftwechsel.

Grafik: Fraunhofer IBP



liegen. Als grüne Linie ist der dabei angesetzte und im konstanten Mindestluftwechsel enthaltene Infiltrationsluftwechsel angegeben. Der Einfluss der erhöhten Feuchtebelastung durch Wäschetrocknen ist deutlich zu erkennen. Mit Wäschetrocknung reicht eine morgendliche Stoßlüftung nicht mehr aus, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden; hier müssen dreimal täglich die Fenster geöffnet werden.

## Fazit

Mit der vorgestellten Kombination von Raumklima- und Schimmelpilzprognosemodell besteht die Möglichkeit, erforderliche Luftwechsel zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung auf Bauteiloberflächen zu quantifizieren. Damit können Vorgaben für einzustellende Luftmengen in Lüftungstechnischen Anlagen bzw. Sollwerte der relativen Raumluftfeuchte bei bedarfsgeführten Systemen ermittelt werden. Für die freie Lüftung (Fensterlüftung) können Empfehlungen hinsichtlich der Lüftungsstrategie ausgesprochen werden; die sinnvolle Umsetzung durch den Nutzer muss dabei vorausgesetzt werden.

## Literatur

- [1] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [2] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001.
- [3] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007.
- [4] 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.
- [5] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [6] Richter, W.; Hartmann, Th.: Mindestluftwechsel zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnungen. VDI-Berichte Nr. 1603, (2001), S. 121–130.