

Übertragung des Mould-Indexes auf das Biohygrothermische Modell zur Schimmelpilzvorhersage

M. Krus, C. M. Seidler, K. Sedlbauer

1. Hintergrund

Zahlreiche Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden sind direkt oder indirekt auf die Einwirkung von Feuchte zurückzuführen. Bei der Sanierung von Altbauten sollte neben eventuell zu beseitigenden Schäden auch eine Verbesserung der energetischen Verhältnisse angestrebt werden. Dies kann zur Verminderung von vorher vorhandenen Feuchteproblemen - wie z.B. Schimmelpilzbildung durch zu niedrige Temperaturen an der Innenoberfläche - führen, unter Umständen jedoch auch neue Feuchteprobleme verursachen. Schimmelpilzbefall, insbesondere an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen, hat deshalb in letzter Zeit vermehrt von sich reden gemacht. Seine Beseitigung bzw. Vermeidung führt nicht nur zu erheblichen Kosten. Schimmelpilz kann auch die Gesundheit der Bewohner gefährden [1]. Bei jedem Schadensfall mit diesen Mikroorganismen steht die Frage im Vordergrund, ob die Baukonstruktion, also letztlich der Eigentümer, verantwortlich ist oder ob falsches Nutzerverhalten im Sinne einer ungenügenden Lüftung vorliegt. Zur Klärung dieser Fragen werden Messungen sowie moderne hygrothermische Berechnungsverfahren eingesetzt, die Auskunft über die vorliegenden instationären Feuchtesituationen geben und für die Beurteilung der Schimmelpilzgefahr genutzt werden können.

Das in [2] beschriebene biohygrothermische Modell ist ein neuartiges Berechnungsverfahren, das es gestattet, für instationäre Randbedingungen eine Aussage über das Wachstumsrisiko von Schimmelpilzen auf Innenraumoberflächen zu machen. Es beruht auf gemessenen Keimungs- und Wachstumsisoplethen und der Berechnung des instationären Wassergehaltes einer Modellspore. Das Ergebnis ist ein Schimmelpilzwachstum in mm, das allerdings wenig anschaulich ist. Vor allem im skandinavischen Bereich hat sich inzwischen ein sechstufiges Bewertungsmodell etabliert, der so genannte Mould-Index, der von Viitanen eingeführt wurde und auf einer prozentualen Flächenbelegung, ergänzt um eine verbale Beschreibung, beruht. Da der Mould-Index wesentlich anschaulicher ist, erfolgt, wie im Folgenden beschrieben, eine Übertragung des vom Biohygrothermischen Modell berechneten Wachstums in mm in den Viitanen'schen Mould-Index.

2. Beschreibung der beiden Modelle

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 auf das

Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung eine Aussage zur Sporenauskeimung und zum Myzelwachstum für Schimmelpilze abgeleitet werden. Isoplethensysteme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenauskeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und –feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Verunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, wurden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen (Grenzkurve LIMBau) vorgeschlagen: 0 = optimaler Nährboden, I = biologisch gut verwertbar, II = biologisch kaum verwertbare Substrate.

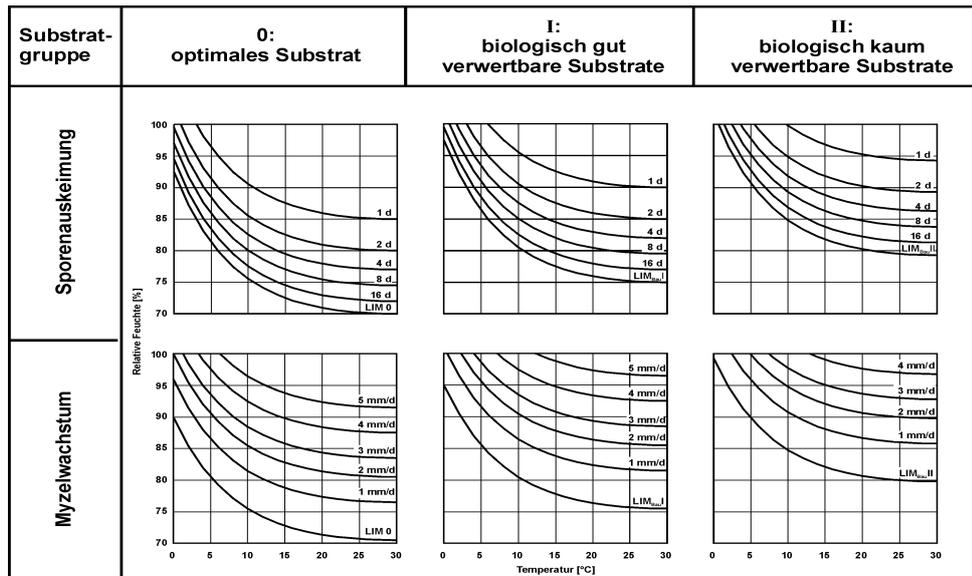


Bild 1 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten) nach [2], das für alle im Bau auftretenden Schimmelpilze gilt. Die im Bild dargestellten Diagramme gelten links für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und rechts für Substratgruppe II.

Um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, physikalisch möglichst korrekt 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 2 zeigt schematisch die dem Biohygrothermischen Verfahren WUFI®-Bio zugrunde liegende Modellspore.

Modellspore

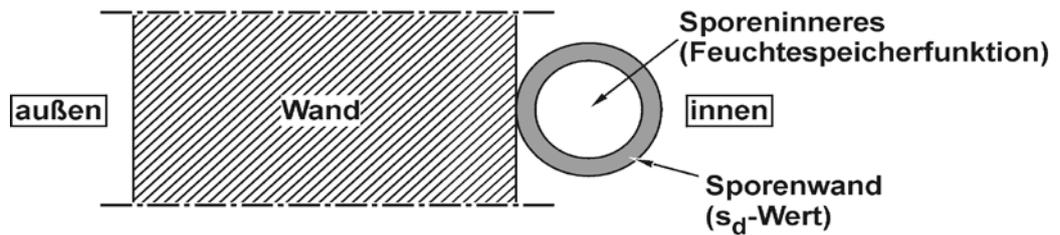


Bild 2 Schematisierte Darstellung einer Spore auf einer Wand. Das reale Verhältnis zwischen Sporendurchmesser zur Wanddicke (30 cm) beträgt rund 1:100.000.

Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporenninneren erreicht, kann die Sporenceimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenceimung festgelegt. Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [3] enthalten. Bild 3 zeigt eine typische Ergebnisdarstellung dieses Programms.

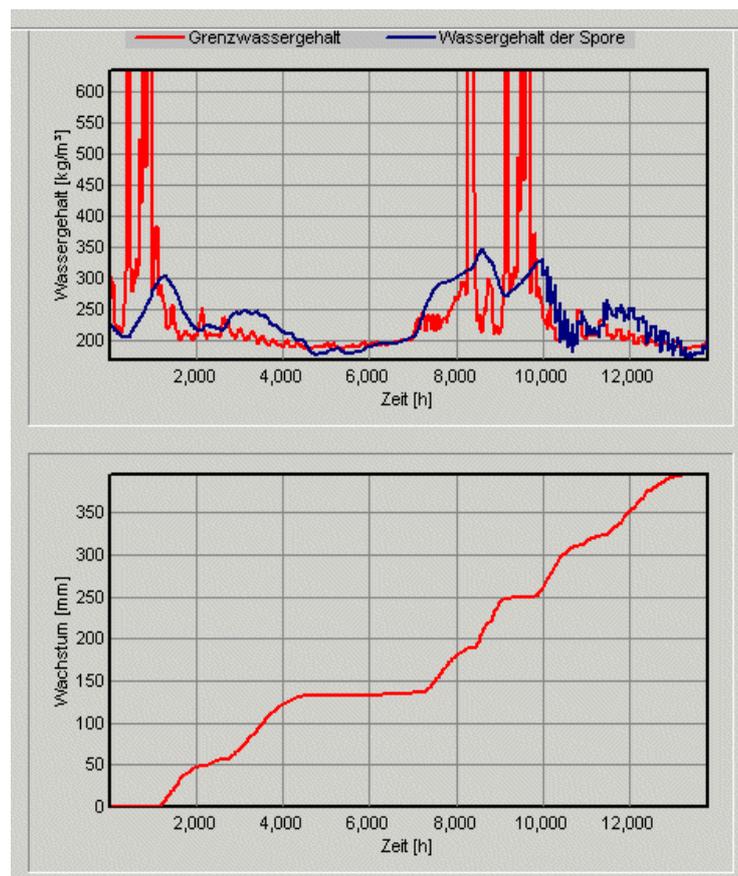


Bild 3 Ergebnis einer Berechnung mit dem derzeitigen Biohygrothermischen Modell.

Viitanen-Modell (VTT-model)

Die Grundlagen des Mould-Growth-Models wurden von Viitanen und Ritschkoff in [4] unter Laborbedingungen entwickelt. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die Auskeimzeiten und das Wachstum von Schimmelpilz auf Kiefern- und Fichtenholz sowie die Randbedingungen für eine Holzzerstörung unter vorgegeben Feuchten und Temperaturen zu bestimmen sowie mathematisch zu modellieren. Auf Basis von zahlreichen Laborexperimenten unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen sind mathematische Modelle entwickelt worden, mit denen die Auskeimzeiten und des Wachstumsgeschwindigkeiten von Schimmelpilzen nachvollzogen werden können. Die Studien dazu wurden ausschließlich im Labor durchgeführt, weil das Zusammenspiel von Oberflächenfeuchtigkeit, Materialfeuchtegehalt, Temperatur, Zeit und mikrobiellen Befall in Gebäuden nur schwer nachzustellen und zu analysieren war. Diese derart entwickelten mathematischen Modelle werden zur Einschätzung des Risikos von Schimmelpilzbildung eingesetzt. Dabei sind sowohl die Klimabedingungen als auch die Holzart und deren Oberflächenqualitäten als Randbedingung auswählbar. Dieses Modell wurde ebenfalls kontinuierlich weiterentwickelt (siehe z.B. [5, 6, 7]), und dabei die Verzögerung des Schimmelwachstums durch schwankende Feuchtebedingungen und sowie die Einbeziehung mineralischer Materialien implementiert. Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form des im Folgenden beschriebenen Mould-Indexes.

Mould-Index (Wood based material / Materialien auf Holzbasis)

0 = no growth / kein Wachstum

1 = some growth (microscopy) / ein wenig Wachstum (mikroskopisch)

2 = moderate growth (microscopy) coverage > 10% / mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10%

3 = some visually detected growth (thin hyphae found under microscopy) / ein wenig sichtbares Wachstum (dünne Hyphen sind zusätzlich mikroskopisch erkennbar)

4 = visual coverage > 10% (growth found under microscopy) / sichtbares Wachstum (Wachstum ebenfalls mikroskopisch erkennbar)

5 = coverage > 50% / Bedeckung > 50%

6 = tight coverage 100% / dichte Bedeckung 100%

Die Ergebnisausgabe für mineralische Materialien erfolgt nach [7] im neuesten VTT-Modell mit einer eigenen Definition des Mould-Index. Somit bedeutet der gleiche Mould-Index je nach Untergrundmaterial ein ganz unterschiedliches Wachstum.

Mould-Index (Stone based material / mineralische Materialien)

0 = no growth / kein Wachstum

1 = some growth / mäßiges Wachstum

2 = moderate growth (coverage > 10%) / mäßiges Wachstum (Bedeckung > 10%)

3 = coverage > 50% / Bedeckung > 50%

4 = coverage < 100% / Bedeckung < 100%

5 = coverage 100% / Bedeckung 100%

Eine unterschiedliche Wachstumsintensität bei gleichem Mould-Index (je nach Wahl des Substrats) ist aber kaum praxisgerecht und anschaulich. Bei der Entwicklung einer Übertragungsfunktion wird deshalb ausschließlich der von Viitanen für Holz definierte Mould-Index zugrunde gelegt.

Grundlegende Unterschiede beider Modellansätze

Die Unterschiede zwischen dem Biohygrothermischen Modell und dem VTT- Modell liegen in den jeweilig gewählten Ansätzen begründet. Das VTT- Modell ist ein rein empirisches Modell, ausschließlich basierend auf Laboruntersuchungen. Dem instationären Biohygrothermische Verfahren liegt dagegen ein physikalisch begründetes Modell zugrunde. Beim Biohygrothermischen Modell stehen verschiedene Substratgruppen zur Auswahl, die auch um spezielle gemessene Materialsubstratgruppen erweitert werden können. Beim Viitanen-Modell kann nur zwischen zwei Holzarten oder mineralischem Substrat unterschieden werden.

Im Gegensatz zum Biohygrothermischen Modell kann beim Viitanen Modell unter für das Schimmelwachstum ungünstigen Bedingungen das berechnete Wachstum abnehmen. Beim Biohygrothermischen Modell ergibt sich zu diesen Zeiten ein Wachstumsstillstand. Bei Temperaturen unter 0°C ist, anders als im Viitanen-Modell, im Biohygrothermischen Modell noch immer leichtes Schimmelwachstum gegeben.

Ein ganz wesentlicher Unterschied aber besteht darin, dass im Viitanen-Modell je nach Klimarandbedingung das prognostizierte Schimmelpilzwachstum nicht über einen davon abhängigen Grenzwert steigt, während beim WUFI-Bio®, so lange es die Randbedingungen zulassen, das Wachstum zunimmt.

3. Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index

Die zusammengetragenen Ergebnisse der Laboruntersuchungen von Viitanen, auf deren Grundlage alle seine Berechnungen beruhen, führen nicht zum Ziel, vor allem weil die Randbedingungen nicht ausreichend bekannt sind. Aus diesem Grund erfolgt die Übertragung auf Basis zahlreicher Berechnungen mit beiden Modellen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass damit zum Einen reale, instationäre, an Innenoberflächen auftretende, Randbedingungen zugrunde gelegt werden können und zum Anderen darin, dass dies vielfältige Parametervariationen erlaubt. Die Berechnungen werden mit dem am IBP entwickelten und vielfach validierten, für die Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen entwickelten, eindimensionalen hygrothermischen Simulationsverfahren WUFI® durchgeführt [8-12]. Die damit berechneten Oberflächenbedingungen dienen als Eingangsgröße für das Biohygrothermische Modell und das VTT-Modell, das von Herrn Viitanen für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde

Parametervariationen

Für die Untersuchungen werden der Standort, die Baukonstruktion sowie das Innenklima und damit auch die Feuchtelast variiert. Bei der Standortwahl wird besonderen Wert auf eine große Bandbreite gelegt. Neben Standorten mit sehr strengen Wintern in Nordeuropa, Nordamerika und aus dem Alpenraum, werden auch Standorte mit starker Schlagregenbeanspruchung an Nord- und Ostsee ausgewählt.

Ebenso werden Standorte mit kontinentalem Klima in Osteuropa und gemäßigttem Klima in Mitteleuropa aber auch mediterranes Klima in Norditalien und Spanien berücksichtigt, womit sich insgesamt 32 unterschiedliche Standorte ergeben.

Es werden sowohl aus dem Außenklima in Abhängigkeit von der Nutzung bzw. Feuchtelast nach DIN EN 13771 oder ASHRAE berechnete Innenklimata als auch sinusförmige Jahresgänge zugrunde gelegt. Hier werden neben Ansätzen mit leicht erhöhten auch welche mit stark erhöhten Feuchtelasten gewählt. Ebenso werden bei den angesetzten Innentemperaturen mehrere unterschiedliche Varianten von $19\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ bis $24\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ berechnet. Diese große Vielfalt von insgesamt 14 Innenklimavarianten soll möglichst viele Nutzergewohnheiten abbilden, bewusst auch im negativen Sinne. Es kommt hauptsächlich dort zu mikrobiellem Wachstum, wo der Nutzer entsprechendes Fehlverhalten bezüglich Heizen und Lüften an den Tag legt oder Nutzer Außenwandbereiche mit Möbeln und Vorhängen abdecken.

Bei den gewählten Außenwandkonstruktionen werden Varianten mit einem U-Wert von 0,3 bis 1,9 W/(m²K) eingesetzt. Dabei finden schlecht dämmende Außenwände überproportional Berücksichtigung, da gerade die schlecht gedämmten Außenwände besonders anfällig für mikrobiellen Befall sind. Mit den extrem hohen U-Werten sollen auch Wärmebrückenbereiche abgebildet werden. Es werden sowohl monolithische Konstruktionen aus unterschiedlichen Materialien als auch Leichtbaukonstruktionen berücksichtigt.

Entwicklung der Umrechnungsfunktion

Insgesamt werden auf diese Weise ca. 350 Berechnungen durchgeführt, die als Grundlage für die Entwicklung der Umrechnungsfunktion dienen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt durch Vergleich der jeweiligen Maximalwerte (Mould-Index und mm-Wachstum) im Verlauf der 365-tägigen Laufzeit. Die Berechnungen werden sowohl mit Jahresbeginn als auch in Jahresmitte gestartet. Es wird bewusst kein Stichtag gewählt, da beide Verfahren unter bestimmten Klimarandbedingungen unterschiedliche Intensitäten im Schimmelwachstum zu verschiedenen Zeitpunkten aufweisen. Bild 4 zeigt das Ergebnis dieser Vorgehensweise. In das Diagramm ist als rote Linie eine Anpassung mit einer Polynomfunktion eingezeichnet.

Mit diesem Verfahren ergibt sich bereits ein akzeptables Ergebnis. Allerdings fällt auf, dass vor allem im Bereich des Mould-Index 6 eine hohe Variationsbreite gegeben ist. Bei niedrigerem Mould-Index finden vor allem einzelne Abweichungen nach oben statt, aber fast keine nach unten. Diese Abweichungen sind in spezifischen Unterschieden beider Modelle begründet. Während beim VTT-Modell ein Maximalwert (MI 6) existiert, können beim Biohygrothermischen Modell bei günstigen Wachstumsbedingungen extrem hohe Werte resultieren. Die Abweichungen nach oben bei niedrigerem Mould-Index treten immer dann auf, wenn es bei Perioden ungünstiger Randbedingungen im Viitanen-Modell zu einem Wachstumsrückgang kommt, der beim Biohygrothermischen Modell nicht auftreten kann.

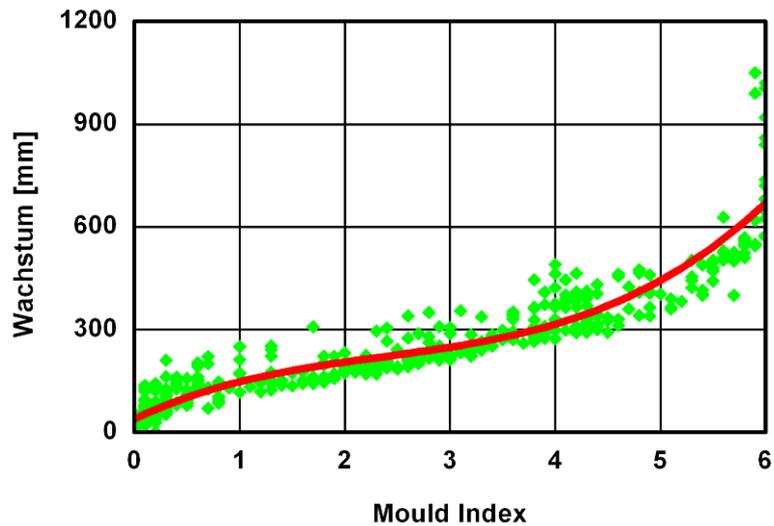


Bild 4 Gegenüberstellung der mit beiden Modellen für die unterschiedlichen Varianten für einen Zeitraum von einem Jahr berechneten Ergebnisse. Als rote Linie ist eine Anpassung mit einer Polynomfunktion mit eingezeichnet.

Um dies zu berücksichtigen, werden zwei Modifikationen durchgeführt. Ergibt sich beim Viitanen-Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt der MI 6, wird bei dem Biohygrothermischen Modell die Berechnung nur bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführt. Außerdem wird bei allen Varianten, bei denen es nach dem VTT-Modell zu Wachstumsrückgängen kommt, das Ergebnis dadurch angepasst, dass die Summe der Rückgänge auf das Ergebnis aufaddiert wird. Trägt man nun die Ergebnisse beider Modelle in ein Diagramm auf (Bild 4), ergibt sich vor allem im unteren Bereich eine noch bessere Korrelation. Als Anpassungsfunktion wird hier eine BET-Adsorptionskurve zugrunde gelegt, da die Kurven ähnlich einer typischen Sorptionskurve sind.

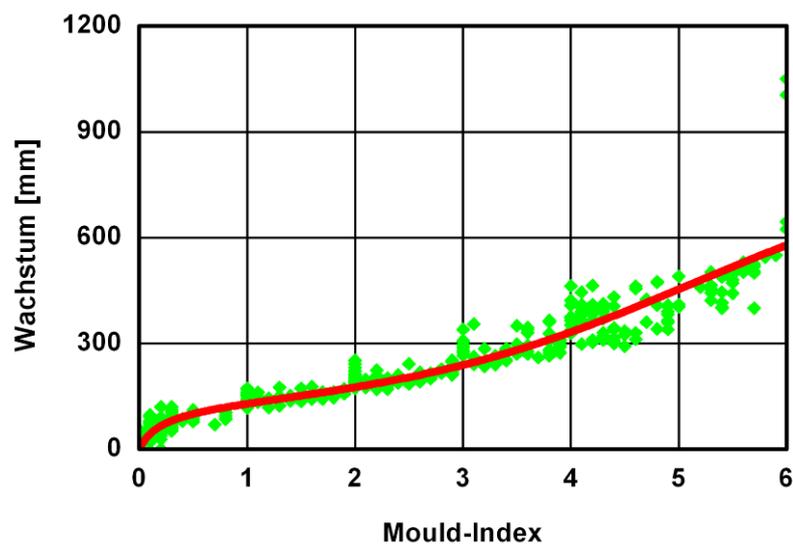


Bild 4: Gegenüberstellung der mit beiden Modellen für die unterschiedlichen Varianten nach Modifikation der Auswertung berechneten Ergebnisse. Als rote Linie ist eine Anpassung mit einer BET-Funktion mit eingezeichnet.

Die als rote Linie eingezeichnete Funktion korreliert über dem ganzen Bereich gut mit den Ergebnissen, sodass diese eine geeignete Übertragungsfunktion darstellt.

4. Zusammenfassung

Obgleich sich in den letzten Jahrzehnten der energetische Standard von Häusern erheblich verbessert hat, gibt es immer wieder Berichte über Bauschäden durch Schimmelpilze. Die Gefährdung für den Bewohner besteht dabei in einer Besiedelung durch krankmachende Mikroorganismen. Der Einsatz von Bioziden bringt, vor allem im Innenraum, zusätzliche Gesundheitsrisiken mit sich und kann Schimmelpilzbildung meist nur über eine begrenzte Zeit verhindern. Die gesundheitlichen Gefahren, die von Schimmelpilzen auf Bauteiloberflächen ausgehen, erfordern daher konsequente Maßnahmen zu deren Vermeidung. Dabei muss eine bauphysikalische Verhinderungsstrategie im Vordergrund stehen, die von den Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen, d.h. den Randbedingungen, unter denen mit Pilzwachstum gerechnet werden muss, ausgeht und die instationären Vorgänge in Gebäuden berücksichtigt.

Einen ganz wesentlichen Beitrag zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum oder zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen können rechnerische Modelle zur Prognose des Schimmelpilzwachstums liefern. Vor allem zwei Modelle sind inzwischen allgemein bekannt und verbreitet, das VTT-Modell und WUFI-BIO®. Während das VTT-Modell ein rein empirisches Modell ist, ausschließlich basierend auf Laboruntersuchungen, liegt dem instationären Biohygrothermische Verfahren ein physikalisch begründetes Modell zugrunde. Das Ergebnis von WUFI-BIO® ist ein Schimmelpilzwachstum in mm, das allerdings wenig anschaulich ist. Vor allem im skandinavischen Bereich hat sich inzwischen ein deutlich anschaulicheres sechsstufiges Bewertungsmodell etabliert, der so genannte Mould-Index, der im VTT-Modell implementiert ist und auf einer prozentualen Flächenbelegung, ergänzt um eine verbale Beschreibung, beruht.

Durch die Verknüpfung der Ergebnisse des Biohygrothermischen Modells mit dem Mould-Index des Viitanen-Modells wird erreicht, dass ein inzwischen anerkanntes und vor allem anschauliches Bewertungsmaß auch bei WUFI-Bio® genutzt werden kann. Es ist eine Umrechnungsfunktion entwickelt worden, mit der mit sehr guter Korrelation das berechnete Wachstum in den Mould-Index überführt werden kann. Diese Umrechnungsfunktion und die entsprechende grafische Darstellung wird in Kürze in das Berechnungstool implementiert werden. Da beide Prognoseverfahren (VTT-Modell und Biohygrothermisches Modell) inzwischen weit verbreitet sind und aufgrund ihrer jeweiligen Vorteile und Einschränkungen auch in Zukunft parallel existieren werden, ist es aus wissenschaftlicher Sicht vorteilhaft, dass mit der Umrechnungsfunktion die Ergebnisse beider Verfahren direkt vergleichbar werden. Dies wird die Weiterentwicklung beider Verfahren begünstigen und möglicherweise zu einer verstärkten Zusammenarbeit beider Forschungsstätten führen.

5. Literatur

- [1] Mücke, W.; Lemmen, C. (1999): Schimmelpilze. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech.
- [2] Sedlbauer, K. (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart.
- [3] Sedlbauer, K., Krus, M. (2003): Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. Berlin : Ernst und Sohn Verlag S. 435-531, Bauphysik-Kalender 2003.
- [4] Viitanen H., Ritschkoff A. (1991): Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala : Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forrest Products.
- [5] Viitanen, H. und Ojanen, T. Improved Model Predict Mould Growth in Building Materials. Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2007.
- [6] Viitanen, H. Mathematical modelling of moisture behaviour and mould growth in building envelopes. Espoo Finnland : VTT/TTY, 2005-2009.
- [7] Viitanen, H.: Mathematical modelling of moisture behaviour and mould growth in building envelopes. Espoo Finnland : VTT/TTY, 2005-2009.
- [8] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K. (1996): Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart.
- [9] Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, S. 5-19.
- [10] Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, S. 267-279.
- [11] Künzel, H.M. und Kießl, K. (1998): Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau.
- [12] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.