Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos

Merkblatt
E-6-3
Ausgabe: 12.2023/D
Einspruchsfrist: 30.06.2024

Calculative prognosis of mould growth risk

Méthode de calcul du risque de croissance de moisissure

Deskriptoren
Schimmelpilz, Wachstum, Prognoseverfahren

Key Words
Mould, infestation, calculative prognosis

Mots-Clés
Moisissure, croissance, méthode de prévision

Inhalt

		Seite
1	Inhalt, Anwendungsbereich und Ziel des Merkblatts	4
2	Mitgeltende oder verwandte Unterlagen und Merkblätter	4
3	Physikalische und biologische Grundlagen	5
3.1	Lebenszyklus	5
3.2	Wachstumsvoraussetzungen	6
4	Grundsätzliche Anforderungen an ein Schimmel-Prognosemodell	10
5	Einfaches Isoplethenmodell	10
5.1	Isoplethensysteme	11
5.2	Einstufungen des Substrats	12
5.3	Funktionsweise des Isoplethenmodells anhand eines Anwendungsbeispiels	12
5.4	Einschränkungen des Isoplethenmodells	14
6	Biohygrothermisches Modell	14
6.1	Funktionsweise des Biohygrothermischen Modells	14
6.2	Einschränkungen des instationären Verfahrens	16
7	Anforderungen an die Eingabedaten	16
8	Praktische Anwendung des Verfahrens	16
9	Übertragung des Mould-Indexes auf das Biohygrothermische Modell	17
9.1	Beschreibung des VTT-Modells	17
9.2	Grundlegende Unterschiede der Modellansätze	18
9.3	Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index	18
9.4	Praktische Bewertung der Berechnungsergebnisse	19
10	Plausibilitätskontrolle	20
11	Praxisbeispiele	21
11.1	Einfluss der Baufeuchte auf Schimmelpilzrisiko	21
11.2	Veränderte Raumklimabedingungen nach einer Nutzungsänderung	22
11.3	Einbau dichter Fenster in unzureichend gedämmten Altbauten	23
12	Fazit und Ausblick	25
13	Literatur	26

Freiexemplar

© Copyright by Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.
Vertrieb: WTA Publications, Tel. +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Fraunhofer IRB | Verlag

Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos

Deutsche Fassung vom Dezember 2023

Referat 6 Bauphysik

Leiter des Referates
Gregor Scheffler

Leiter der Arbeitsgruppe
Martin Krus

Mitglieder der Arbeitsgruppe
Julia Bachinger
Christian Bludau
Robert Borsch-Laaks
Martin Epple
Heiko Fechner
Claudia Fülle
Robert Heinicke
Stefan Hückstädt
Martin Krus
Hartwig Künzel
Bernd Nusser
Oskar Pankratz
Ulrich Ruisinger
Gregor Scheffler
Martin Teibinger
Johannes Tieben
Benjamin Weiss
Jörg Wollnow
Daniel Zirkelbach
Markus Zumoberhaus

Erarbeitung des Merkblattes

Beginn der Arbeiten: Oktober 2004
Ende der Arbeiten: Juni 2005
Merkblattentwurf: Dezember 2005
Endgültige Fassung: Februar 2007

1. Überarbeitung
Beginn der Arbeiten: Januar 2015
Ende der Arbeiten: Juni 2023
Merkblattentwurf: Dezember 2023
Endgültige Fassung: –

ISBN (E-Book) 978-3-7388-0888-9

Freiexemplar

WTA-Merkblätter

Herausgeber
Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.

Schriftleitung
Clemens Hecht, Tobias Steiner

Vertrieb
WTA Publications
Telefon +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Die WTA ist stets bemüht in ihren Merkblättern den jeweiligen aktuellen Stand des Wissens festzuhalten. Wenn Sie vor Ablauf der Einspruchsfrist Verbesserungen, Änderungen vorschlagen möchten, wenden Sie sich bitte direkt an den Leiter der Arbeitsgruppe.

© Alle Rechte bei der WTA International e.V.. Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet.

Die Angaben in diesem Merkblatt stützen sich auf den derzeitigen Stand unserer Kenntnisse. Die WTA International e.V. kann jedoch keinerlei Haftung übernehmen. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an die Geschäftsstelle der WTA International e.V. zu richten.

Bei Streitfällen ist die deutsche Fassung gültig.

Den auftragvergebenden Architekten, Denkmalpflegeämtern und den staatlichen, kommunalen und kirchlichen Bauämtern wird nahegelegt, auf dieses und die weiteren Merkblätter der WTA zum Bautenschutz und zur Bauwerksinstandsetzung in Ausschreibungen und Aufträgen Bezug zu nehmen und deren Kenntnisnahme allen Auftragnehmern zur Auflage zu machen.

Fraunhofer IRB Verlag, 2024
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon +49 7 11 9 70-25 00
Telefax +49 7 11 9 70-25 99
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de
http://www.baufachinformation.de

Kurzfassung

Numerische Methoden zur realistischen Simulation des instationären hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen finden heute breite Anwendung. Aufgrund ihrer Realitätsnähe eignen sich derartige Verfahren zur Schadensdiagnose oder zur Beurteilung von Sanierungsverfahren. Bei all diesen Berechnungsverfahren bleibt die Interpretation der Ergebnisse die wichtigste Aufgabe des sachkundigen Anwenders. In Bezug auf die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbefalls sind mehrere Prognosemodelle entwickelt worden, die mit Hilfe derartiger Berechnungsergebnisse oder auch vor Ort ermittelter Messverläufe das Risiko von Schimmelpilzwachstum besser abschätzbar machen. Diese Prognosemodelle sind vom Ansatz her und auch in Bezug auf die erforderlichen Eingaben und Randbedingungen sowie den Einsatzbereichen sehr unterschiedlich. Im Rahmen dieses Merkblattes werden Vorgehensweise und Interpretation exemplarisch anhand eines frei verfügbaren Schimmelprognosemodells beschrieben.

Als Ausgangsinformationen werden neben der Art des Materials hygrothermische Randbedingungen, z. B. als Stundenwerte, für die Berechnungen benötigt. Diese können aus Messwerten oder hygrothermischen Rechenergebnissen stammen.

Deskriptoren: Schimmelpilz, Wachstum, Gesundheitsrisiko, Prognoseverfahren

Abstract

Numerical methods for the realistic simulation of the transient hygrothermal behaviour of building structures are widely used today. Due to their closeness to reality, such methods are suitable for diagnosing damage or assessing refurbishment procedures. With all these calculation methods, the interpretation of the results remains the most important task of the expert user. With regard to the assessment of the risk of mould infestation, several prognostic models have been developed that make it easier to estimate the risk of mould growth with the help of such calculation results or measurement curves determined on site. These prediction models are very different in terms of their approach and also with regard to the required inputs and boundary conditions as well as the areas of application. This guideline describes the procedure and interpretation using a freely available mould prognosis model as an example.

In addition to the type of material, hygrothermal boundary conditions, e.g. as hourly values, are required as initial information for the calculations. These can come from measured values or hygrothermal calculation results.

Key Words: Mould, infestation, health risk, calculative prognosis

Résumé

Les méthodes numériques de simulation réaliste du comportement hygrothermique instationnaire des structures de construction sont aujourd'hui largement utilisées. En raison de leur réalisme, ces méthodes conviennent au diagnostic des dommages ou à l'évaluation des procédures de rénovation. Pour toutes ces méthodes de calcul, l'interprétation des résultats reste la tâche la plus importante de l'utilisateur compétent. En ce qui concerne l'évaluation du risque de moisissure, plusieurs modèles de prévision ont été développés, qui permettent de mieux estimer le risque de croissance de moisissures à l'aide de tels résultats de calcul ou de mesures effectuées sur place. Ces modèles de prévision sont très différents de par leur approche, les données et les conditions marginales nécessaires ainsi que les domaines d'application. Dans le cadre de cette fiche technique, la procédure et l'interprétation sont décrites à titre d'exemple à l'aide d'un modèle de prévision des moisissures librement disponible.

Outre le type de matériau, les conditions hygrothermiques marginales, par exemple sous forme de valeurs horaires, sont nécessaires comme informations de départ pour les calculs. Celles-ci peuvent provenir de valeurs mesurées ou de résultats de calculs hygrothermiques.

Mots-Clés: Moisissure, croissance, risque pour la santé, méthode de prévision

Freiexemplar

1 Inhalt, Anwendungsbereich und Ziel des Merkblatts

In Bezug auf die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbefalls sind unterschiedliche Prognosemodelle entwickelt worden, die mit Hilfe von Berechnungsergebnissen oder auch vor Ort ermittelten Messverläufen das Risiko von Schimmelpilzwachstum abschätzbar machen. Diese sind vom Ansatz her und auch in Bezug auf die erforderlichen Eingaben, Randbedingungen und den Einsatzbereichen sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund wird die Vorgehensweise zunächst anhand eines konkreten, öffentlich zugänglichen Schimmelpilzprognosemodells dargelegt. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse werden anschließend auch auf ein weiteres Modell angewendet. Die vorgestellten Modelle sollen den Anwender unterstützen, Neubau- und Sanierungsmaßnahmen oder Schadensfälle hinsichtlich der Möglichkeit von Schimmelpilzwachstum zu beurteilen.

Eine Vielzahl von Bauschaffenden können die Prognosemodelle, eventuell in Verbindung mit weiteren Berechnungsprogrammen, für ganz unterschiedliche Fragestellungen einsetzen, wie z. B.:

Innenarchitekt/Raumausstatter/Schreiner

- Planung der Möblierung (Einbauschrank, Küchenmöbel)
- Innenraumplanung
- Wahl der Baustoffe

Planer und Fachplaner

- Qualitätssicherung zum schadensfreien Bauen
- Schwachstellenanalyse gefährdeter Bauteile bzw. Bauteilanschlüsse
- Planung und Beurteilung von Sanierungsverfahren
- Beurteilung von Trocknungserfordernissen bei Putz- und Estricharbeiten
- Auslegung von Bauteilen im Neubaufall, bei Sanierung, Umbau oder Modernisierung
- Schadensdiagnose mit Ursachenermittlung
- Auslegung von Innendämmung
- Entwicklung von Lüftungsstrategien
- Planung von Lüftungsanlagen
- Folgenabschätzung bei Nutzungsänderung (Bsp. Kellerräume in Schulen, Kulturgüter)

Handwerker und Ausführender

- Folgenbeurteilung bei Wasserschäden im Estrichbereich
- Beurteilung von Trocknungserfordernissen bei Putz- und Estricharbeiten
- Schwachstellenerkennung und -behebung gefährdeter Bauteile bzw. Bauteilanschlüsse

Freiexemplar

Für die Anwendung der Prognoseverfahren müssen geeignete Daten aus Messungen oder hygrothermischen Berechnungen vorliegen. Die Verfahren sind nur für die Beurteilung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen ausgelegt. Andere mikrobielle Organismen, wie Bakterien (z. B. Actinomyceten) oder holzzerstörende Pilze können damit nicht beurteilt werden. Diese Mikroorganismen treten jedoch meistens in Kombination mit Schimmelpilzen auf.

Die Modelle stellen den vorliegenden Stand des Wissens dar und bilden, wie alle derartigen Modelle, die Realität nicht exakt ab. Sie ersetzen in keinem Fall den erforderlichen Sachverstand und die erhaltenen Ergebnisse bedürfen immer der Überprüfung durch einen fachkundigen Anwender.

Es ist zu berücksichtigen, dass dieses Merkblatt aufgrund der Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten keine fertigen Rezepte liefern kann und soll. Vielmehr will es dem Anwender einen schematischen Einblick in das allgemeine Vorgehen und die dabei zu beachtenden Einzelfragen vermitteln.

2 Mitgeltende oder verwandte Unterlagen und Merkblätter

1. Umweltbundesamt (Hrsg.): Leitfaden – Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Berlin: Eigenverlag November 2017
2. Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen (»Schimmelpilz-Sanierungsleitfaden«), Umweltbundesamt, Berlin 2005
3. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement (überarbeitet 2004), Stuttgart 2001

4. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, Handlungsempfehlung für die Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen, Stuttgart 2006
5. DIN 4108-2 (2013-02), Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich
6. DIN-Fachbericht 4108-8 (2010-09), Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden. Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich
7. WTA-Merkblatt 6-1-01, Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen, Fraunhofer IRB Verlag, München 2001
8. WTA-Merkblatt 6-2-14, Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Fraunhofer IRB Verlag, München 2014
9. TRBA 400 (2006-06), Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und für die Unterrichtung der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen, Bundesarbeitsblatt 6-2006, 62-77
10. VDI-Richtlinie VDI 4300 Blatt 10 (2008-07), Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für die Erfassung von Schimmelpilzen im Innenraum, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich
11. VDI-Richtlinie VDI 4252 Blatt 2 (2004-06), Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft – Aktive Probenahme von Bioaerosolen – Abscheidung von luftgetragenen Schimmelpilzen auf Gelatine/Polycarbonat-Filtern, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich
12. VDI-Richtlinie VDI 4253 Blatt 2 (2004-06), Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft – Verfahren zum kulturellen Nachweis der Schimmelpilz-Konzentrationen in der Luft – Indirektes Verfahren nach Probenahme auf Gelatine/Polycarbonat-Filtern, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich

Freiexemplar

3 Physikalische und biologische Grundlagen

Fadenpilze (umgangssprachlich Schimmelpilze) gehören zu den eukaryotischen Mikroorganismen, die sich sowohl sexuell (Sporen, auch Ascosporen genannt), als auch asexuell (Konidien, auch Konidiosporen genannt) vermehren können. Fadenpilze wachsen in Form von fadenförmigen Zellsträngen, den sogenannten Hyphen. Die Gesamtheit der Hyphen bezeichnet man als Myzel. Der Begriff Fadenpilze grenzt die hyphenbildenden Pilze gegen die Hefen, die sogenannten Sprosspilze, ab. Im Weiteren wird der umgangssprachliche Begriff Schimmelpilz oder verkürzt einfach Pilz verwendet.

3.1 Lebenszyklus

Der Lebenszyklus einer Pilzkolonie lässt sich in drei Phasen aufteilen. Die ersten beiden Lebensabschnitte, Sporenkeimung und Myzelwachstum, zählen zum vegetativen Wachstum, die Sporulation zur reproduktiven Phase.

Schimmelpilzsporen sind praktisch überall zu finden (ubiquitär). Nach erfolgter Sporenauskeimung beginnt der Pilz bei günstigen Bedingungen sofort mit dem Myzelwachstum. Die Sporulation (Sporenbildung) dient der Weiterverbreitung der an einen Standort gebundenen Pilze. Das Myzel stirbt nach der Sporenbildung nicht ab, sondern wächst weiter und bildet erneut Sporen. Verschlechtern sich die Lebensbedingungen für das Weiterwachsen (Feuchte, Temperatur, Nährboden), tritt die Sporenbildung verstärkt auf. Dies ist eine wichtige Überlebensstrategie der Pilze, die sicherstellt, dass ein Lebenszyklus nicht ohne eine Weiterverbreitung abgeschlossen wird. Die Aussendung von Sporen kann somit unabhängig von den Wachstumsvoraussetzungen stattfinden.

Da Sporen ubiquitär sind, muss die Lebensphase der Sporulation bei der Entwicklung einer Vorhersagemethode oder Verhinderungsstrategie bzgl. Schimmelpilzbildung nicht berücksichtigt werden.

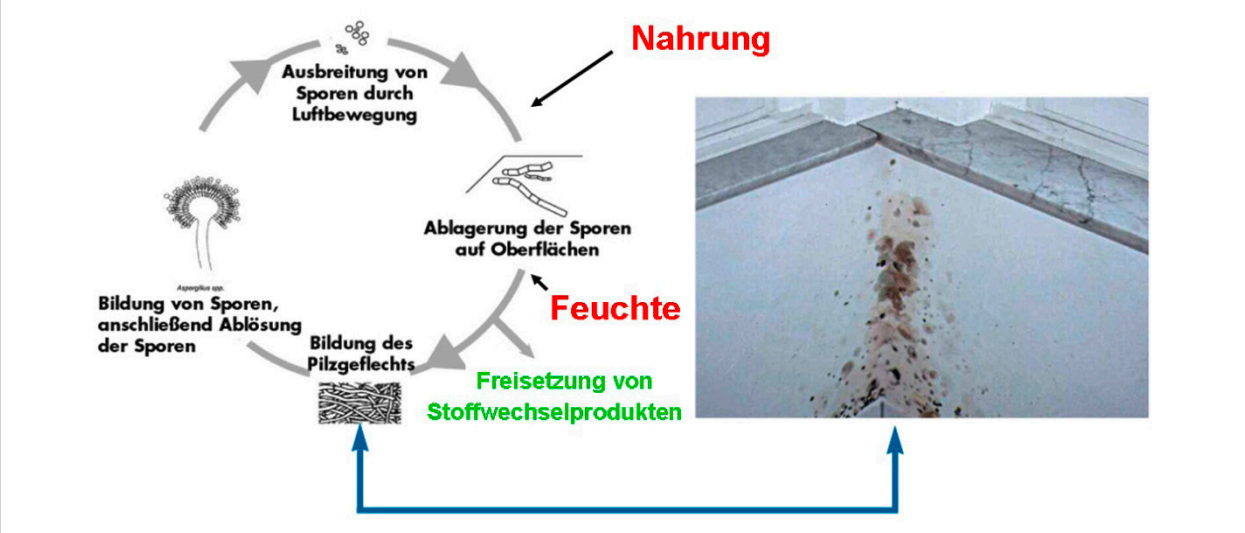


Bild 1 Lebenszyklus von Schimmelpilzen (aus Teilnehmerhandbuch des Impuls-Programms der Energieagentur NRW »Schimmelpilz im Wohnungsbau – Richtig lüften und Feuchtigkeit vermeiden«)

Im Folgenden sind die unmittelbar auf den Pilzmetabolismus einwirkenden Parameter zusammengestellt. Es werden die Grenzen aufgezeigt, in denen sich das Leben bzw. Überleben der Schimmelpilze abspielt.

3.2 Wachstumsvoraussetzungen

3.2.1 Feuchte

Als entscheidendes Kriterium für das Wachstum von Mikroorganismen gilt die dem Schimmelpilz zur Verfügung stehende Feuchte, wobei der Pilz sowohl vom Substrat als auch aus der Luft Wasser bzw. Wasserdampf entnehmen kann. Verschiedene Materialien bieten für Mikroorganismen die gleiche Verfügbarkeit von Feuchte bei unterschiedlichen Wassergehalten. Dies wird in der Biologie allgemein mit Hilfe der sogenannten Wasseraktivität (dem a_w-Wert) beschrieben, deren Wert zwischen 0 und 1 liegen kann.

Um zu verstehen, warum der gleiche Wassergehalt je nach Material in so unterschiedlichem Maße verfügbar ist, sind die Feuchtespeichervorgänge physikalisch genauer zu betrachten. Poröse Stoffe können in Abhängigkeit von ihrer Porenstruktur und inneren Oberfläche unterschiedliche Mengen an Wasser an sich binden. Das Erreichen eines Gleichgewichts bedeutet, dass der Wasserdampfdruck in den Poren des Materials der gleiche wie in der Umgebungsluft ist. Reiß [1] definiert die Wasseraktivität als Verhältnis des im Porenraum vorherrschenden Wasserdampfpartialdrucks zum der Temperatur entsprechenden Sättigungsdampfdruck. Dies stellt damit aber nichts anderes als die relative Luftfeuchte dar.

Freiexemplar

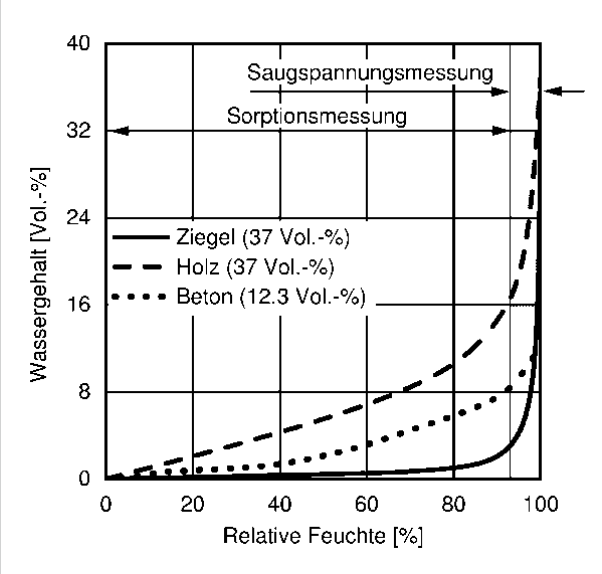


Bild 2 Typische Feuchtespeicherfunktionen für schwach (Ziegel), mäßig (Beton) und stark (Holz) hygroskopische Baustoffe. Die Feuchtespeicherfunktion kann bis 95 % r. F. über Sorptionsmessungen bestimmt werden, darüber wird sie über Saugspannungsmessungen ermittelt [2]

Bild 2 zeigt für drei unterschiedliche Materialien (Beton, Holz und Ziegel) die Sorptionsisotherme, also deren Wassergehalt in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte – oder gleichbedeutend dem a_w-Wert. Man erkennt deutlich, dass z. B. bei einem a_w-Wert bzw. einer relativen Luftfeuchte von 0,8 (bzw. 80 %) gänzlich unterschiedliche Wassergehalte vorliegen; trotzdem ist bei allen das Wasser gleich stark gebunden bzw. in gleicher Weise für Mikroorganismen verfügbar. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass der a_w-Wert eines vorliegenden feuchten Materials eine alternative Bezeichnung für die relative Luftfeuchte an deren Oberfläche darstellt. Im Folgenden wird stets die relative Feuchte als Begriff verwendet.

Für den Wachstumsparameter Feuchte schlug Snow schon im Jahr 1949 eine Grobklassifizierung der Pilze vor [3]: Als xerophil werden alle diejenigen Pilze bezeichnet, die unterhalb einer relativen Feuchte von 85 % noch wachsen können; mesophile benötigen 85 %, hydrophile hingegen gedeihen erst ab 95 %. Diese Einteilung ist bereits über 50 Jahre alt, sodass unter Berücksichtigung neuerer Untersuchungen die Grenzen um ca. 5 bis 10 % nach unten korrigiert werden müssen. Jede einzelne Pilzspezies besitzt ihren eigenen, charakteristischen Feuchtebereich, der Leben ermöglicht und u. a. die Intensität des Wachstums bestimmt. Die Feuchtegrenze, unterhalb der kein Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden auftritt, liegt bei ca. 70 % relativer Feuchte. Manche Xerophile Pilze begnügen sich zwar schon mit einer relativen Feuchte von 65 %, aber nicht alle Spezies treten in Gebäuden auf. Mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei 80 % relativer Feuchte sind die Wachstumsbedingungen für fast alle Schimmelpilzarten erreicht. Das Optimum liegt meist bei 90 % bis 95 %. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass nur wenige Schimmelpilze in flüssigem Wasser ausreichende Lebensbedingungen finden.

3.2.2 Temperatur

Da während des Wachstums und der Entwicklung eines Organismus eine große Anzahl biochemischer Umsetzungsprozesse beteiligt sind, ist eine Temperaturabhängigkeit der mikrobiologischen Vorgänge gegeben. Aus der Mykologie ist bekannt, dass Pilzwachstum vor allem in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 50 °C auftritt, mit einer optimalen Wachstumstemperatur von etwa 30 °C (siehe Bild 3).

Freiexemplar

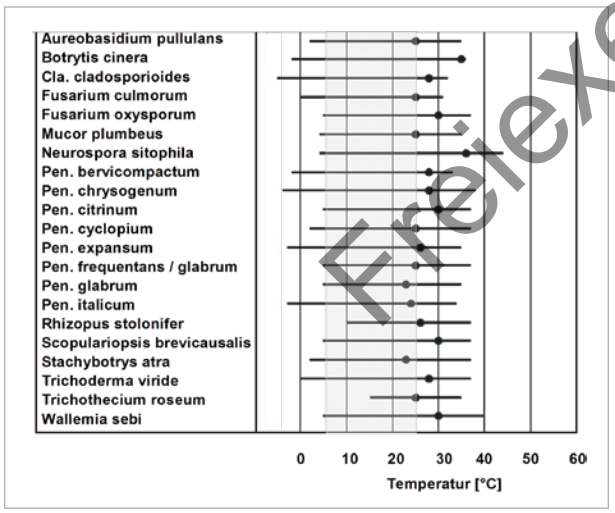


Bild 3 Darstellung des Temperaturbereichs für das Vorkommen verschiedener Schimmelpilze. Die Optima sind jeweils durch Punkte gekennzeichnet. Der grau hinterlegte Bereich stellt die typische Spanne der Innenoberflächentemperaturen beheizter Wohnbereiche dar (Abkürzungen: *Cla.: Cladosporium, Pen.: Penicillium)*

Je nach Temperatur ändert sich die Biomassenproduktion. Zum Auslösen eines Wachstumsvorganges, d. h. der Enzymaktivität von Schimmelpilzen, muss eine bestimmte Minimaltemperatur überschritten werden. Von da an ist bei weiterem Temperaturanstieg eine Beschleunigung der Wachstumsgeschwindigkeit zu beobachten. Nach Überschreitung des Optimums machen sich dann hemmende Einflüsse bemerkbar, die schließlich zur Einstellung des Wachstums führen. Hitze beispielsweise schränkt Biosynthese und Wachstumsvorgänge stark ein und kann sie zum Erliegen bzw. Absterben bringen, da die Proteine (Enzyme) denaturieren. Unterhalb 0 °C kommen die Wachstumsvorgänge auch weitestgehend zum Erliegen. In vielen Fällen kann eine kleine Temperaturdifferenz von wenigen Kelvin darüber entscheiden, ob Wachstum einer bestimmten Spezies stattfindet oder nicht.

3.2.3 Kombination von Temperatur und Feuchte

Tabelle 1 zeigt die minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstumsvoraussetzungen für einzelne Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur und relativer Feuchte. Die Wachstumsvoraussetzungen, Temperatur und Feuchte, können jedoch nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sich die Lage der minimalen

und optimalen Feuchten bei unterschiedlichen Temperaturen verschieben kann. Die minimalen Werte der relativen Luftfeuchte sind nur bei optimalen Temperaturen zu erreichen bzw. umgekehrt. Eine Überlagerung der beiden Einflüsse ergibt, in einem Diagramm aufgetragen, Linien gleichen Wachstums (Isoplethen). Werden Auskeimungszeiten bzw. Wachstumsraten in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur angegeben, spricht man von Isoplethensystemen. Die unterste Kurve kennzeichnet die Bedingungen, unter denen keine Sporenkeimung bzw. kein Wachstum mehr feststellbar ist. Ein Ansteigen des Feuchtebedarfs bei Temperaturen über etwa 30 °C begründet sich in der Temperaturabhängigkeit der Aktivität von am Stoffwechsel beteiligten Enzymen. Bild 4 zeigt beispielsweise für Aspergillus restrictus (links) und Aspergillus versicolor (rechts) entsprechende Darstellungen, die auf messtechnisch ermittelten Daten beruhen.

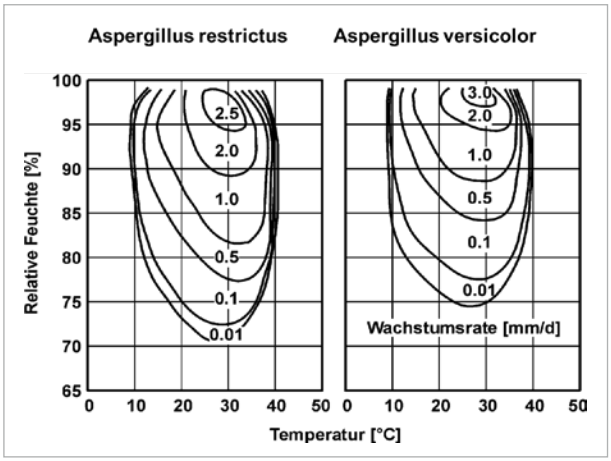


Bild 4 Isoplethensysteme für Myzelwachstum der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) auf optimalem Nährmedium (nach Smith [4]). Die Isolinien geben in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte die Wachstumsraten in mm/d an (eingetragene Zahlenwerte)

3.2.4 Substrat

Der Nährstoffgehalt des Substrats, auf dem der Pilz wächst, ist neben Temperatur und Feuchte die wichtigste Einflussgröße auf Schimmelpilzbildung. Die vorliegenden Untersuchungen zum temperatur- und feuchteabhängigen Pilzwachstum wurden überwiegend im Labor durchgeführt. Als Nährmedium wurde dort i. d. R. Vollmedium verwendet, das für Pilze ein optimales Substrat darstellt. Je nach Substrat (z. B. Baustoff oder Verschmutzung) stehen dem Pilz im Vergleich zum Vollmedium aber in Gebäuden geringere Mengen und schwerer abbaubare Nährstoffe zur Verfügung. Andererseits reichen selbst geringe organische Zusätze in Baustoffen (z. B. in Putzmörteln oder Beschichtungen) aus, um mikrobiologisches Wachstum zu ermöglichen. Das Nährstoffangebot des Substrats hat Einfluss auf die darauf wachsenden Spezies. Z. B. wächst *Stachybotrys chartarum* auf Zellulose und kaum auf rein mineralischen Untergründen.

Probeexemplar

	Temperatur [°C]						rel. Feuchte [%]			
	Sporenkeimung			Myzelwachstum			Sporenkeimung		Myzelwachstum	
Pilzspezies	**min.**	**opt.**	**max.**	**min.**	**opt.**	**max.**	**min.**	**opt.**	**min.**	**opt.**
Absidia corymbifera					35	45				
Absidia glauca				–8	30	43			70	
Altemaria alternata	3	35	37	–2	30	32	84		85	98
Asp. amstelodami	5	35	43	7	33	42	70	90	71	100
Asp. candidus	10	35	45	3	32	57	70	95	74	90
Asp. flavus	10	30	45	6	40	45	80	100	78	98
Asp. fumigatus	10	40	50	10	43	57	80	97	82	97
Asp. nidulans	10	37	50	6	40	48	75	95	78	97
Asp. niger	10	35	50	6	37	47	77	98	76	98
Asp. ochraceus					32				77	95

	Temperatur [°C]						rel. Feuchte [%]			
	Sporen-keimung			Myzel-wachstum			Sporen-keimung		Myzel-wachstum	
Pilzspezies	**min.**	**opt.**	**max.**	**min.**	**opt.**	**max.**	**min.**	**opt.**	**min.**	**opt.**
Asp. parasiticus				10	37				82	
Asp. penicillioides				5	25	37				
Asp. restrictus	10	28		10	28		73	95	71	90
Asp. ruber	5	30	42	4	27	38	70	90	71	93
Asp. terreus	14	40	50	11	40	47	75	99	77	97
Asp. versicolor	8	30	42	4	30	40	74	91	75	95
Aureobasidium pullulans				2	25	35			88	
Botrytis cinera				-3	21	36			93	
Chaetomium globosum					35					
Chrysosporium fastidium							69	93	72	92
Cla. cladosporioides				-5	28	32	85		84	96
Cla. sphaerosperum					25				82	
Eurotium herbariorum					30	40	73		75	96
Fusarium culmorum	3	25	37	0	25	31	87		90	
Fusarium oxysporum				5	30	37			90	
Fusarium solani									90	
Mucor plurnbeus				4	25	35	93		93	98
Paecilomyces lilachinus					35	60	84		84	
Pen. brevicompactum	5	25	32	-2	25	30	78		75	96
Pen. chrysogenum				-4	28	38	78		79	98
Pen. citrinum							84		80	
Pen. cyclopium	5	25	33	2	25	37	80	97	80	98
Pen. expansum	<0			-3	26	35	82		82	95
Rhizopus stolonifer	1,5	28	33	10	26	37	84		92	98
Scopulariopsis brevicausalis				5	30	37			85	94
Stachybotrys	5	25	40	2	23	37	85	97	89	98
Trichoderma viride				0	28	37				99
Trichothecium roseum	5			15	25	35	90		86	96
ülocladium sp.									89	
Wallemia sebi		30		5	30	40	69		70	

Tabelle 1 Minimale, optimale sowie maximale Wachstumsvoraussetzungen für einzelne Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur und relativer Feuchte bzgl. Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum

Freiexemplar

Neben einigen mineralischen Substanzen bzw. Spurenelementen sind kohlenstoff- und stickstoffhaltige Nährstoffe essentiell. Mit Hilfe ihrer Enzyme können Pilze Substrate abbauen und in verwertbare Stoffe umwandeln. Liegen die Nährstoffe nicht in ausreichenden Mengen vor, führt dies zu verringertem Wachstum. Zur Anfälligkeit von Baumaterialien für Schimmelpilzbefall wurden von Gertis, Erhorn und Reiß [5] umfangreiche Messungen

durchgeführt. Diese Untersuchungen ergaben für den Einfluss der Nährböden, dass auch Verschmutzungen, z. B. durch Staub, Fette, usw., das Wachstum entscheidend beeinflussen. Weitergehende Recherchen zeigen, dass für den Beginn des Myzelwachstums die Eigenschaften der Oberfläche entscheidend sind und erst durch das Eindringen des Myzels (maximal einige Millimeter) in das Baumaterial eine Beeinflussung durch den Untergrund auftritt. Dies zeigt sich gerade bei Anstrichen und Tapeten. Das bedeutet, dass Verunreinigungen durch Staub, Fingerabdrücke und Luftverschmutzung (Küche, Rückstände beim Duschen, usw.) oder Ausdünstungen des Menschen ausreichen, um auch auf »sterilen« Medien eine dünne, aber doch relativ substratreiche Schicht zu bilden, auf der es, wenn auch etwas verzögert, zur Sporenauskeimung und erstem Myzelwachstum kommen kann.

Die Einführung von Bewertungskriterien zur Beurteilung verschiedener Nährstoffe auf und in Bauprodukten als Wachstumsvoraussetzung von Schimmelpilzen ist unumgänglich. Ansonsten würden sich sämtliche Aussagen zur Pilzentwicklung auf Vollmedien beziehen und eine realitätsnahe Vorhersage einer möglichen Schimmelpilzbildung in Gebäuden wäre nicht möglich.

3.2.5 Zeit

Die meisten Versuche zur Bestimmung der Auskeimungszeit bzw. der Wachstumsgeschwindigkeit wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Das mag für einige Industriezweige genügen (z. B. Konservierung von Lebensmitteln). Im Bauwesen unterliegen Temperatur und relative Luftfeuchte aber regelmäßigen Schwankungen. Aus bauphysikalischer Sicht ist es daher erforderlich, angeben zu können, welche Feuchtezustände wie lang und wie häufig auf ein Bauteil (z. B. eine Wandinnenoberfläche) einwirken müssen, bevor eine Schimmelpilzbildung auftritt. Dies bedeutet, dass das Rechenverfahren zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung neben dem Einfluss verschiedener Substrate von Baustoffen und Verschmutzungen auch instationäre Randbedingungen berücksichtigen muss.

3.2.6 Sonstige Einflussgrößen (pH-Wert, Licht)

Der pH-Wert stellt für die Beurteilung der Qualität von Nährböden ein weiteres Kriterium der Schimmelpilzbildung dar. Während der optimale Wachstumsbereich bei pH-Werten zwischen 5 und 7 liegt, werden insgesamt pH-Werte zwischen 2 und 11 von bestimmten Pilzarten toleriert. Die meisten Spezies wachsen in einem Bereich zwischen 3 und 9. Tapeten und Anstriche weisen beispielsweise einen pH-Wert zwischen 5 (z. B. Raufasertapete) und 8 (z. B. Kunstharz-Dispersionsanstrich) auf. Andererseits können kalkhaltige Baustoffe, wie zum Beispiel Putzmörtel oder Beton, pH-Werte von mehr als 12 besitzen. Trotzdem kann Schimmelpilzwachstum auf diesen Materialien nicht ausgeschlossen werden, da es nur auf den pH-Wert des zur Verfügung stehenden Nährbodens ankommt. Dieser Nährboden ist aufgrund von Staubablagerungen in ausreichender Menge auf fast allen Bauteiloberflächen vorhanden.

Licht ist für das Wachstum der Schimmelpilze nicht erforderlich. Zu hohe Einstrahlung von Sonnenlicht wirkt vor allem aufgrund seines UV-Anteils eher wachstumsbeeinträchtigend. Einige Pilze wirken dem durch Einlagerung von Pigmenten wirksam entgegen.

Freiexemplar

4 Grundsätzliche Anforderungen an ein Schimmel-Prognosemodell

Das Prognosemodell zur Beurteilung des Schimmelpilzrisikos muss für eine breite Anwendung und eine sichere Interpretierbarkeit der Ergebnisse alle wesentlichen baupraktischen Anforderungen erfüllen. Von besonderer Bedeutung sind dabei:

- Berücksichtigung realer instationärer Feuchte- und Temperaturverhältnisse
- Berücksichtigung des Einflusses des Untergrundes (Substrateinfluss). Da beliebig viele Innenoberflächenmaterialien existieren, kann dies nur in pauschalierter Weise z. B. über die Definition von Substratklassen erfolgen
- Da alle Schimmelpilzspezies zumindest ein Allergierisiko darstellen, sollte das Prognosemodell alle innenraumrelevanten Spezies berücksichtigen
- Das Prognosemodell sollte die unterschiedlichen Wachstumsvoraussetzungen für Keimung und Myzelwachstum berücksichtigen
- Das Ergebnis sollte stets »auf der sicheren Seite« liegen

5 Einfaches Isoplethenmodell

Es hat sich gezeigt, dass die drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen »Feuchte, Temperatur und Substrat« über eine bestimmte Zeitperiode simultan vorhanden sein müssen, damit Schimmelpilzsporen keimen

und anschließend das Myzel wachsen kann. Das Isoplethenmodell ermöglicht auf der Basis von Isoplethensystemen die Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums, wobei auch der Substrateinfluss bei der Beurteilung der Schimmelpilzbildung berücksichtigt wird [6].

5.1 Isoplethensysteme

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich bei den Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemein gültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten. Für diese etwa 200 Spezies sind quantitative Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte zusammengestellt worden. Die in Bild 5 gezeigten Isoplethensysteme berücksichtigen die Wachstumsvoraussetzungen aller dieser Pilze, für die ausreichende Literaturdaten zur Verfügung standen. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen möglicher Pilzaktivität werden LIM (**L**owest **I**sopleth for **M**ould) genannt. Die links dargestellten Isoplethensysteme zeigen die Wachstumsvoraussetzungen für optimalen Nährboden. Um neben optimalem Nährboden den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für zwei weitere Substratgruppen vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden. Dazu erfolgte eine Definition von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden. Diese Definition ist vergleichsweise einfach und sicherer anzuwenden. Sind genauere oder produktspezifische Daten verfügbar, könnten diese verwendet werden.

Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z. B. Vollmedien); diese Isoplethensysteme besitzen die anspruchslosesten Wachstumsvoraussetzungen, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die absolute untere Wachstumsgrenze, sind aber für die meisten Bauteiloberflächen nicht relevant.

Substratgruppe I: Baustoffe mit biologisch gut verwertbaren Substraten, wie z. B. Tapeten, Gipskarton, manche Holzwerkstoffe, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material.

Substratgruppe II: Baustoffe mit schlecht verwertbaren Substraten, wie z. B. Putze, mineralische Baustoffe sowie manche Hölzer, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

Für jede Substratgruppe werden eigene Isoplethensysteme erstellt. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets die Substratgruppe I zugrunde gelegt werden.

Freiexemplar

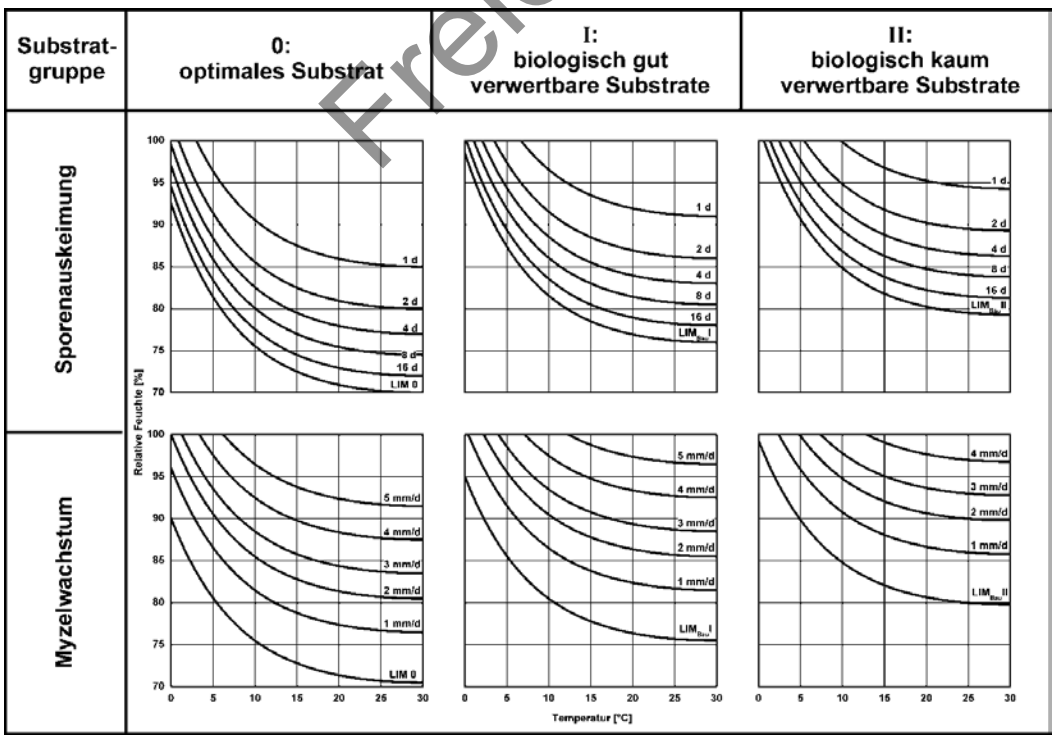


Bild 5 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten), das für alle am Bau auftretenden Pilze gilt. Die im Bild dargestellten Diagramme gelten links für optimales Substrat, in der Mitte für Substratgruppe I und rechts für Substratgruppe II

5.2 Einstufungen des Substrats

Im Allgemeinen ist es ausreichend, wenn man die in Kapitel 5.1 beschriebenen Substratgruppen zugrunde legt. Substratgruppe II sollte dabei nur für unverschmutzte Baustoffe mit schlecht verwertbaren Substraten verwendet werden, ansonsten gilt meist Substratgruppe I.

Bei dieser Einteilung handelt es sich um eine vereinfachte grobe Unterteilung der Baustoffe hinsichtlich ihrer Schimmelpilzanfälligkeit. Es gibt aber auch Baustoffe, die besonders wenig schimmelpilzanfällig sind. Um auch solche Baustoffe realitätsnah beurteilen zu können, wurde ein in [7] beschriebener Prüfstand entwickelt. Er erlaubt mikrobiologische Untersuchungen zur Ermittlung der Schimmelpilzresistenz unter definierten Randbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) mit im Vergleich zur kompletten Bestimmung eines Isoplethensystems deutlich geringerem Aufwand. Die Ergebnisse können in ein Isoplethenmodell zur Berechnung des Schimmelpilzwachstumsrisikos unter realen instationären Randbedingungen überführt werden.

Z. B. werden als kapillaraktiver Dämmstoff zur Innendämmung häufig Kalziumsilikatplatten eingesetzt, die als besonders schimmelpilzwidrig gelten. Zur Klärung wurde deshalb speziell an diesem Material die Schimmelpilzanfälligkeit getestet. Für die Untersuchung werden Prüfkörper aus älteren Kalziumsilikatplatten hergestellt, um eine anfängliche fungizide Wirkung eines neuen Materials (z. B. durch anfänglich hohem pH-Wert) auszuschließen. Das in Bild 6 dargestellte Ergebnis zeigt die hohe Schimmelpilzresistenz der untersuchten Kalziumsilikatplatten. Erst oberhalb einer Ausgleichsfeuchte entsprechend 90 % kann Schimmelpilzbildung auftreten. Hierbei muss natürlich angemerkt werden, dass dies nur für das untersuchte Material gilt und nicht für zum Teil stark in seinen Eigenschaften unterschiedliche Kalziumsilikatplatten anderer Hersteller oder verschmutztes Material.

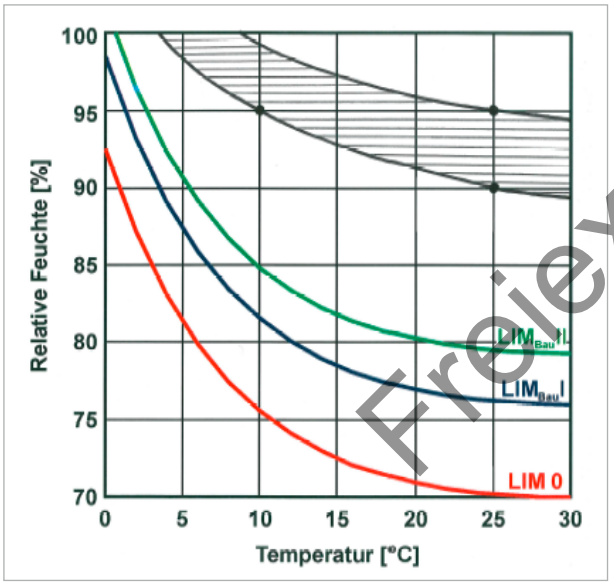


Bild 6 Integration der Versuchsergebnisse für die Kalziumsilikatplatte in ein Isoplethenmodell. Die Grenzisoplethe für das geprüfte Material liegt innerhalb der schraffierten Fläche. Unterhalb der schraffierten Fläche ist während der gesamten Versuchsdauer keinerlei Schimmelpilzwachstum aufgetreten und daher auch im Realeinsatz nicht zu erwarten.

Freiexemplar

5.3 Funktionsweise des Isoplethenmodells anhand eines Anwendungsbeispiels

Um einen Vergleich der biologischen Wachstumsvoraussetzungen mit den errechneten hygrothermischen Bedingungen zu ermöglichen, müssen auf Basis des Isoplethenmodells die ermittelten instationären Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte auf der Bauteiloberfläche mit den Angaben der Sporenauskeimungszeiten bzw. des Myzelwachstums in den entsprechenden Isoplethensystemen verglichen werden. Die Wachstumsbedingungen, welche durch die zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte charakterisiert werden, dienen als Eingangsdaten. Man trägt diese Mikroklima-Randbedingungen als Stundenwerte in die Isoplethensysteme ein. Liegen die Wachstumsbedingungen für eine bestimmte Zeitdauer oberhalb der entsprechenden LIM-Kurve, kann es je nach Substratgruppe zu Schimmelpilzaktivität kommen. In der Regel treten aber instationäre Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf. Um diese Verläufe mithilfe des Isoplethenmodells bewerten zu können, werden auf Basis der entsprechenden Isoplethensysteme für Sporenauskeimung die zeitlichen Beiträge, die einzelne hygrothermische Zustände zur Sporenauskeimung liefern, aufsummiert. Das bedeutet, es wird mithilfe der einzelnen Isolinien (z. B. 4 Tage) angegeben, welchen Beitrag ein Stundenwert, der beispielsweise auf dieser Isolinie liegt, zur Sporenauskeimung liefert, nämlich 1 Stunde / (4 Tage × 24 Stunden/Tag) = 0,01. Diese Werte werden addiert und als zeitlicher Verlauf aufgetragen. Erreicht der Summenwert 1, so wird davon ausgegangen, dass die Sporenauskeimung erreicht ist

und der Pilz zu wachsen beginnt. Dadurch ergibt sich eine einfache Bewertungsmöglichkeit. Es kann damit angegeben werden, ob es in einem bestimmten Zeitraum zu Sporenauskeimung kommt. Zwischenwerte werden interpoliert.

In einem in [8] beschriebenen Schadensfall wurde im Schlafzimmer einer Wohnung im 1. Obergeschoss an der nordöstlichen Außenwand eines im Jahr 1955 gebauten und 1993/94 sanierten Gebäudes Schimmelpilzbefall hinter einem Einbauschrank festgestellt. Die innere und äußere Oberflächen- sowie Lufttemperatur wurde während einer kalten Periode über eine längere Zeitspanne gemessen und ausgewertet. Des Weiteren war die relative Feuchte im Schlafraum messtechnisch erfasst worden. Für den dort vorhandenen Kalkputz mit Verschmutzung wurde Substratgruppe I (Bild 5 Mitte oben für die Keimung und nach erfolgter Keimung Bild 5 Mitte unten für Myzelwachstum) zugrunde gelegt. In Bild 7 unten sind auf Basis dieser Messwerte die ermittelten Ergebnisse für den Verlauf der Sporenauskeimung an der Wandinnenoberfläche in Wandmitte, in der Raumecke und hinter einer Möblierung an der Außenwand dargestellt. Nur hinter der Möblierung ergibt sich eine rasche Sporenauskeimung. In der Raumecke wird die Sporenauskeimung erst nach wesentlich längerer Zeit erreicht.

Analog kann nach vollständiger Keimung mithilfe der substratspezifischen Isoplethensysteme für Myzelwachstum angegeben werden, wie die Pilze weiterwachsen. Das Myzelwachstum wird dazu in analoger Weise auf Basis der entsprechenden Isoplethensysteme ermittelt. Liegt ein Stundenwert im Isoplethensystem beispielsweise im Bereich von 6 mm Wachstum pro Tag, so bedeutet dies, dass der Pilz im betrachteten Stundenzeitraum um 6 mm pro 24 Stunden, also um 0,25 mm pro Stunde wächst. Es erfolgt auch hierbei wieder die Bildung eines Summenwertes, der, für den Beispielfall eines Pilzbefalls im Innenraum, in der oberen Graphik in Bild 7 dargestellt wird. In der Raumecke wird durch kurzzeitig vorhandene gute Wachstumsbedingungen die Sporenauskeimung erreicht; es kommt allerdings zu keinem nennenswerten Myzelwachstum. Dies ist hinter einer Möblierung anders. Dort wird ein großflächiger Pilzbefall prognostiziert, was auch in der Realität beobachtet werden konnte

Freiexemplar

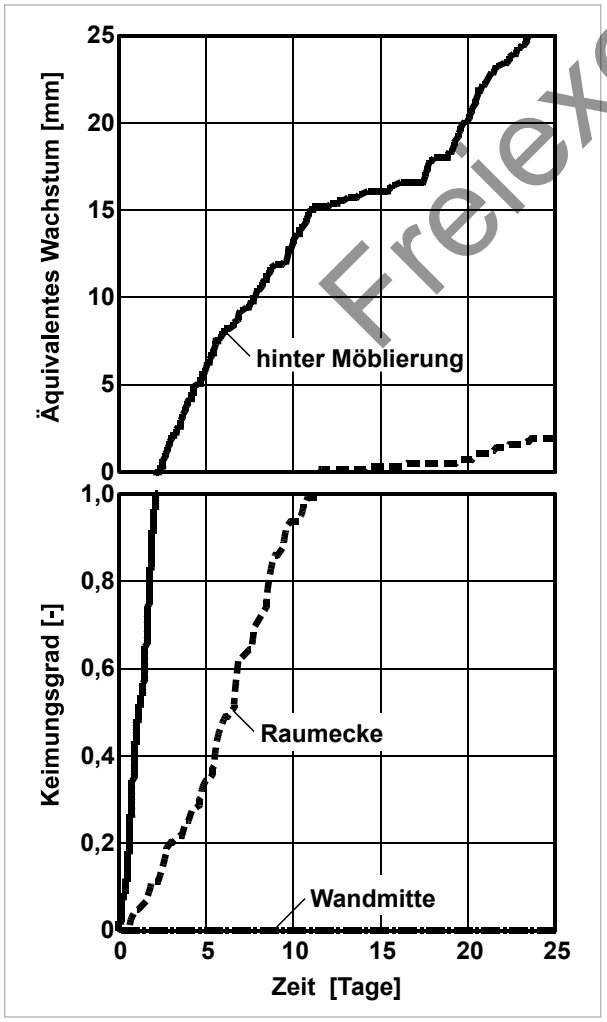


Bild 7 Mit dem Isoplethenmodell ermittelte Zeitverläufe von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für drei verschiedene Stellen (Wandmitte, Ecke und hinter Möblierung). Zugrunde gelegt sind gemessene Oberflächentemperaturen und -feuchten eines im Jahr 1955 gebauten Gebäudes.

5.4 Einschränkungen des Isoplethenmodells

Das vorgestellte Isoplethenmodell kann eine durch Trockenperioden auftretende Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen. Aus diesem Grund sollte dieses Verfahren nie über größere Zeiträume wie z. B. mehr als eine Heizperiode angewendet werden, weil beispielsweise bei kurzzeitigen hohen Feuchten (wie durch Duschen, Kochen etc.) damit bei hinreichend langem Betrachtungszeitraum (über mehrere Jahre) eine Schimmelpilzbildung immer »erreicht werden kann«, da es sich hier um ein rein additives Verfahren handelt. Es bietet aber dennoch eine einfach handhabbare Abschätzung möglicher Schimmelpilzbildung. Um auch Austrocknungseffekte von Pilzsporen beschreiben zu können, wurde ein auf dem Isoplethenmodell aufbauendes biohygrothermisches Verfahren entwickelt, auf das im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

6 Biohygrothermisches Modell

Um Schimmelpilzbildung in Gebäuden zu verhindern, muss es gelingen, die Sporenauskeimung zu unterbinden. Dies bedeutet aber, die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, quantitativ beschreiben zu können.

6.1 Funktionsweise des Biohygrothermischen Modells

Der Berechnungsansatz des hier vorgestellten Verfahrens beruht darauf, den Feuchtehaushalt einer Modell-Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen zu berechnen.

Gemäß der Modellvorstellung nimmt die Pilzspore bei hygrothermisch günstigen Umgebungsbedingungen während der Anlaufphase, unabhängig vom Nährboden, Feuchte mittels Diffusion auf. Der Wassergehalt einer Spore wird dabei auch durch biologische Vorgänge gesteuert, für die allerdings der momentane Kenntnisstand nicht ausreichend ist, um sie zu modellieren. Beim derzeitigen Modell wird davon ausgegangen, dass in einer Spore erst ab einem so genannten Grenzwassergehalt biologische Stoffwechselvorgänge beginnen und die Keimung in Gang setzen. Bis dahin kann die Spore vereinfacht als Material betrachtet werden, dessen Eigenschaften mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden können.

Das Biohygrothermische Modell betrachtet die Entwicklung der Spore bis zum Abschluss der Auskeimung. Die Spore kann aufgrund der kleinen Abmessungen isotherm betrachtet werden. Flüssigtransportvorgänge (z. B. kapillares Saugen) können zur Vereinfachung der Diffusion zugeschlagen werden. Unter diesen Annahmen sind für die Berechnung des Feuchtehaushalts einer Spore als Materialkennwerte nur die Feuchtespeicherfunktion und der feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstand der Sporenwand erforderlich.

Bild 8 zeigt schematisch einen Wandaufbau mit einer an der Innenoberfläche anhaftenden, stark vergrößerten Spore. Die berechneten oder gemessenen Klimaverläufe der Bauteiloberfläche werden als Randbedingung für die biohygrothermische Berechnung der »Modellspore« angesetzt. Wird der Grenzwassergehalt in der Spore erreicht oder überschritten, ist mit Schimmelwachstum zu rechnen.

Freiexemplar

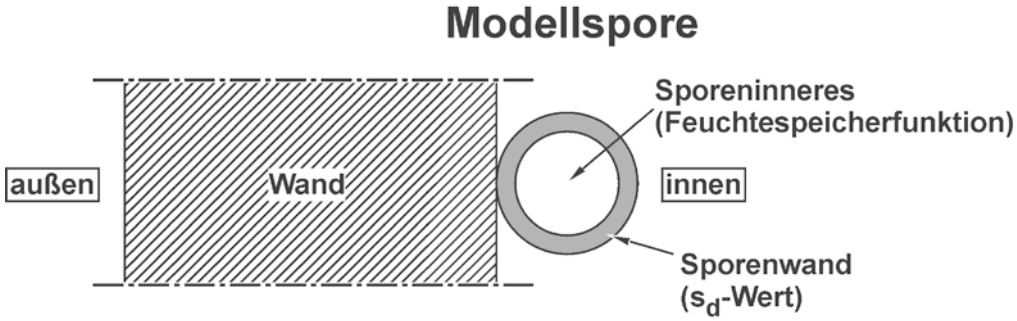


Bild 8 Schematisierte Darstellung einer stark vergrößerten Spore auf einer Wand

Das instationäre biohygrothermische Verfahren zur Vorhersage der Sporenauskeimung beruht auf dem Grundgedanken, dass eine Pilzspore aufgrund der in ihr vorhandenen Stoffe ein gewisses osmotisches Potenzial besitzt, mit dessen Hilfe Wasser aus der Umgebung – sowohl aus Materialien als auch aus der Luft – aufgenommen wird. Dieses Potenzial kann mithilfe einer Feuchtespeicherfunktion beschrieben werden (Bild 9 rechts). Der Diffusionswiderstand der Sporenwand wird durch einen feuchteabhängigen s_d-Wert berücksichtigt. Der Zeitabschnitt zwischen dem Beginn des Stoffwechsels und dem ersten sichtbaren Pilzwachstum

auf optimalem Nährboden wird dadurch berücksichtigt, dass die s_d-Werte der Sporenwand so angepasst werden, dass die unter stationären Bedingungen mit dem Biohygrothermischen Modell ermittelten Sporenauskeimungszeiten denjenigen in den Isoplethen entsprechen. Zur Berücksichtigung möglicher Substrateinflüsse erfolgt diese Anpassung anhand der LIM-Kurven in den entsprechenden Isoplethen der Substratgruppen 0, Bau I und Bau II. Durch dieses Anpassen der s_d-Werte der Sporenwand konnte eine Modellierung der Sporen erreicht werden, die für alle 3 Substratgruppen Gültigkeit besitzt. Die mit dieser Methode festgelegte feuchteabhängige s_d-Kurve zeigt Bild 9 links.

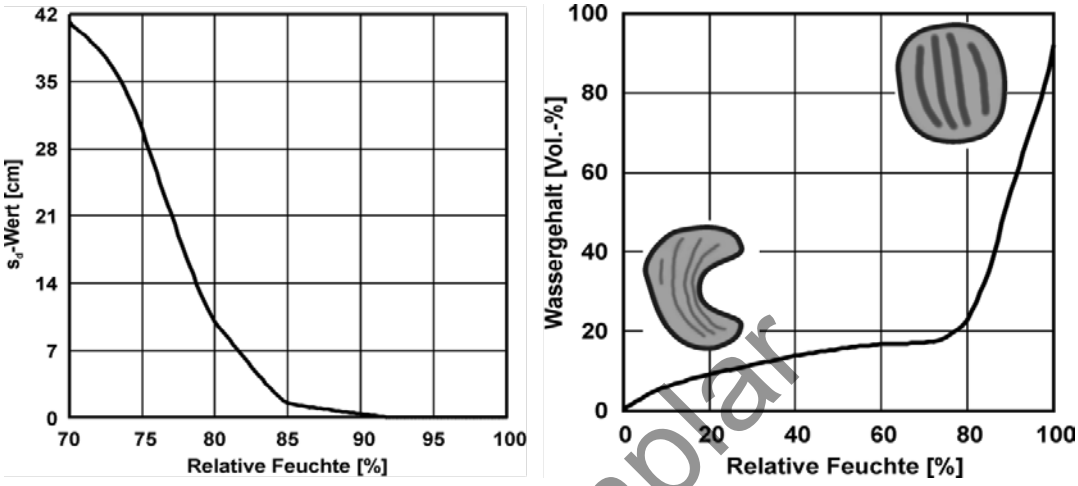


Bild 9 Materialeigenschaften« der Modellspore: rechts die Feuchtespeicherfunktion des Sporeninneren, links die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (sd-Wert) der Modellsporenwand

Der Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethen für Sporenauskeimung wie folgt festgelegt: Temperaturabhängig kann aus den entsprechenden LIM-Kurven der Isoplethen entsprechend der gewählten Substratklasse die tiefste relative Feuchte abgelesen werden, bei der Sporenauskeimung stattfindet (Bild 10 links). Beispielsweise ergibt sich bei einer Temperatur von 10 °C für Substratklasse II eine minimale Luftfeuchte, bei der Schimmelpilze wachsen können, von 85 % (rote Pfeile im Bild links). Mithilfe der Feuchtespeicherfunktion für das Sporeninnere (Bild 10 rechts) lässt sich dann der Grenzwassergehalt errechnen, indem der zu dieser Luftfeuchte gehörende Sporenwassergehalt abgelesen wird. Der Grenzwassergehalt beträgt in diesem Falle 35 Vol.-% (rote Pfeile im Bild rechts).

Freiexemplar

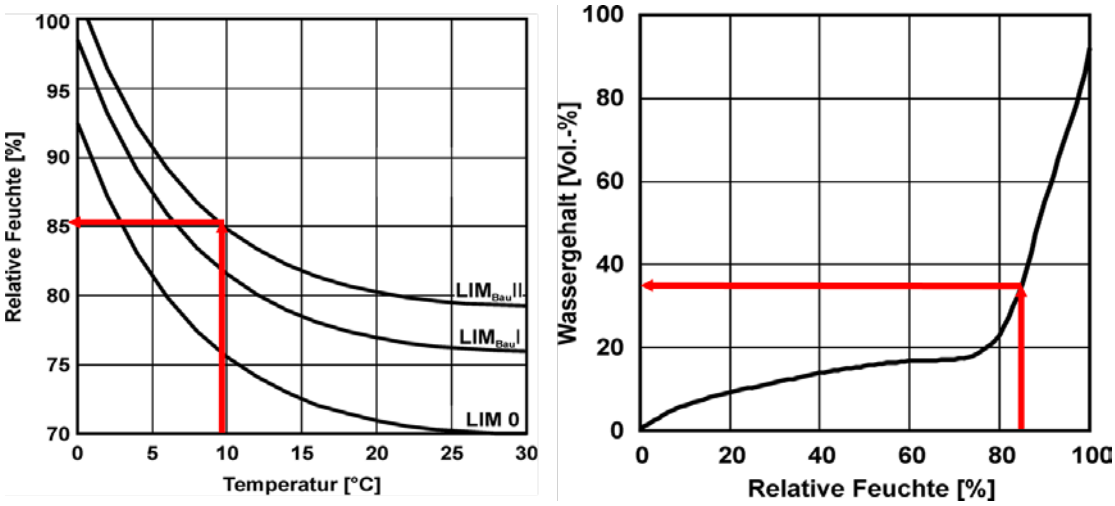


Bild 10 Bestimmung des Grenzwassergehaltes. Links: Ermittlung der minimalen temperaturabhängigen Luftfeuchte anhand der zur Substratklasse gehörenden LIM-Kurve. Rechts: Ermittlung des zu dieser Luftfeuchte gehörenden Grenzwassergehaltes aus der Feuchtespeicherfunktion.

6.2 Einschränkungen des instationären Verfahrens

Das instationäre Verfahren wurde für die Prognose von Schimmelwachstum im Innenraum entwickelt. Auch wenn damit bereits erfolgreich Aussagen über Schimmelpilzwachstum an Außenfassaden gemacht werden konnten, müssen derartige Berechnungsergebnisse aus zwei Gründen mit besonderer Vorsicht überprüft werden. Zum einen liegen dem Isoplethensystem ausschließlich Schimmelpilzspezies zugrunde, die auf Innenraumoberflächen vorgefunden wurden. Auf den Außenfassaden wachsen dagegen häufig andere Spezies. Zum anderen spielen auf der Außenfassade andere Wachstumseinflüsse eine wesentliche Rolle. Hier ist vor allem das Sonnenlicht von Bedeutung, das an den Fassaden in einer für Schimmelpilze gefährlich hohen Strahlung auftritt. Dies führt dazu, dass sich die Pilze durch Einlagerung von Pigmenten vor dieser Strahlung schützen müssen.

Das Prognosemodell ist nicht für die Berechnung des Wachstums von holzzerstörenden Pilzen einsetzbar und ist auch nicht Ziel dieses Prognosemodells. Holzzerstörende Pilze treten erst bei deutlich höheren Feuchtebedingungen auf als das Schimmelwachstum, siehe auch WTA-Merkblatt 6-8.

7 Anforderungen an die Eingabedaten

Die Anwendung des Prognosemodells benötigt instationäre Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte für die Stellen einer Baukonstruktion, an denen eine Schimmelpilzbildung untersucht werden soll. Dazu stehen im Wesentlichen drei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Datensätze aus Messungen an bestehenden Bauteilaufbauten werden eingelesen.
2. Daten aus instationären thermischen Berechnungen werden verwendet. Dabei muss beachtet werden, dass hygrische Einflüsse wie Sorption oder Baufeuchte nicht berücksichtigt werden. Bei Verwendung von dreidimensional rechnenden Programmen können dafür ggf. komplizierte Konstruktionen wie Wand-Decken-Anschlüsse, Raumecken oder Fensterkonstruktionen detaillierter abgebildet werden.
3. Daten aus instationären hygrothermischen Berechnungen auf Grundlage von WTA-Merkblatt 6-2 werden verwendet. Auf diesem Wege können ein- oder mehrdimensionale Konstruktionen modelliert und beliebige Klimarandbedingungen eingelesen werden.

Bei Verwendung dieser Daten muss berücksichtigt werden, dass nur bei Kenntnis der kritischsten Stelle des Baukörpers (meist die Außenwandecken und Bauteilanschlüsse) aussagekräftige Ergebnisse erhalten werden. Messungen müssen kontinuierlich (mindestens stündlich) über einen ausreichend großen Zeitraum (z. B. für Wärmebrücken in der Heizperiode, für unbeheizte Keller im Sommer) durchgeführt werden. Befinden sich die Sensoren nicht unmittelbar an den gefährdeten Stellen, sind die Messungen wenig aussagekräftig.

Soll das Lüftungsverhalten des Nutzers mit erfasst werden, ist eine längere Messperiode zu empfehlen, da erfahrungsgemäß die Installation von Messtechnik das Nutzerverhalten unter Umständen zunächst beeinflusst. Daher ist eine möglichst unauffällige Messtechnik zu empfehlen. Bei der Bewertung der Ergebnisse müssen die klimatischen Randbedingungen (aus Messungen oder anhand näherer Messstationen) mit einbezogen werden. Weitere grundsätzliche Hinweise zur Erfassung repräsentativer Zustandsgrößen sind im WTA-Merkblatt 4-5 »Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik« gegeben.

8 Praktische Anwendung des Verfahrens

Als Beispiel einer Berechnungssoftware dient das frei und kostenlos verfügbare Biohygrothermische Modell (WUFI®-Bio). Eingangsgrößen sind die für den Winter und das anschließende Frühjahr an der kritischsten Stelle eines Konstruktionsdetails ermittelten zeitlichen Verläufe der Oberflächenluftfeuchte und -temperatur, die als ASCII-file abgelegt werden. Die Daten müssen in drei Spalten vorliegen, wobei die erste Spalte den Zeitverlauf in Stunden, die zweite Spalte und dritte Spalte vorzugsweise den Verlauf der Oberflächenfeuchte und der -temperatur enthalten. Diese Klimadatei kann in das Biohygrothermische Modell eingelesen werden. Zu beachten ist bei der Verwendung des Modells, dass nicht zu hohe Startwerte für die Anfangsfeuchte eingesetzt werden. Andernfalls setzt das Schimmelpilzwachstum unrealistisch früh ein.

Bild 11 zeigt ein beispielhaftes Berechnungsergebnis bei Auswahl der Substratgruppe II. Man erkennt, dass der Wassergehalt der Spore (blaue Linie) stets unter dem Grenzwassergehalt (rote Linie) liegt. Folgerichtig wird kein Schimmelpilzwachstum angezeigt (grüne Linie). Liegt dagegen – zum Beispiel mit einer Tapete als Untergrund – Substratgruppe I vor, ist, wie aus Bild 12 ersichtlich, Schimmelpilzbildung zu erwarten, da nach etwas mehr als einem Monat der Grenzwassergehalt überschritten wird. Erst nach etwa 5 Wochen wird der Grenzwassergehalt wieder unterschritten und das weitere Wachstum ist beendet.

Freiexemplar

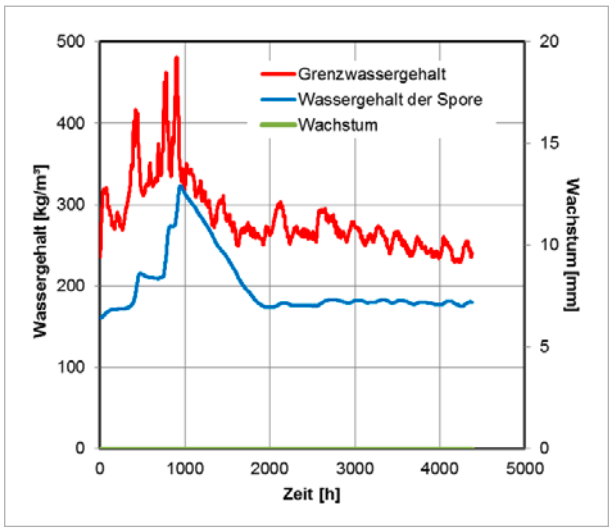


Bild 11 Ergebnisse der Berechnung für Substratgruppe II

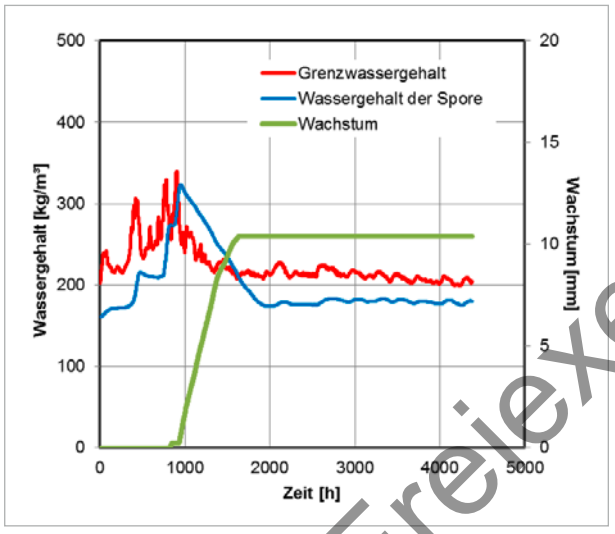


Bild 12 Ergebnisse der Berechnung für Substratgruppe I

Freiexemplar

9 Übertragung des Mould-Indexes auf das Biohygrothermische Modell

Das Biohygrothermische Modell ist ein Berechnungsverfahren, um für instationäre Randbedingungen das Wachstumsrisiko von Schimmelpilzen auf Innenraumoberflächen zu beurteilen. Das Ergebnis ist ein allerdings wenig anschauliches Schimmelpilzwachstum in mm. Im skandinavischen Bereich hat sich ein sechsstufiges Bewertungsmodell etabliert: der von Viitanen eingeführte VTT (Technical Research Centre of Finland)-Mould-Index, der auf einer prozentualen Flächenbelegung, ergänzt um eine verbale Beschreibung, beruht. Im Folgenden erfolgt eine Übertragung des Wachstums in mm in den VTT-Mould-Index.

9.1 Beschreibung des VTT-Modells

Das VTT-Modell wurde am Technical Research Center of Finland (VTT) und der Tampere University of Technology, zu Beginn basierend auf Messungen von Viitanen & Ritschkoff [11] entwickelt. Auf Basis von praktischen Versuchen beschreiben die empirisch ermittelten Regressions-Modelle Auskeimung und Wachstum von Schimmelpilzen und werden in [12] und [13] nachvollziehbar erläutert.

Ähnlich dem bereits vorgestellten Modell wird zwischen zwei Phasen unterschieden: der Zeit bis Schimmelpilzwachstum bzw. bis ein bestimmter Schaden eintritt, wobei für jede Stunde eine kritische Luftfeuchte berechnet wird. Die Feuchtespeicher- und Feuchtetransporteigenschaften von der Oberfläche und dem darunterliegenden Material werden dabei getrennt berücksichtigt. Auch wechselnde Klimabedingungen werden mit einbezogen, bis hin zur Inaktivität und zum Rückgang des Befalls bei »ungünstigen«, im Modell allerdings nur bei zu kalten Bedingungen. Die Bewertung erfolgt in Form des so genannten Schimmelpilzindexes (Mould-Index):

Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form des Mould-Indexes:

0 = kein Wachstum

1 = mikroskopisch sichtbares, beginnendes Wachstum,

2 = mikroskopisch sichtbares Wachstum, Bildung von Hyphen-Kolonien,

3 = makroskopisch sichtbares Wachstum mit Bedeckung <10 %
ODER mikroskopische Bedeckung <50 %, beginnende Sporenproduktion

4 = makroskopisch sichtbares Wachstum mit Bedeckung <50 %
ODER mikroskopische Bedeckung >50 %

5 = Sichtbare Myzel-Bedeckung >50 %

6 = sehr dichte Bedeckung um 100 %

Mit Hilfe von entsprechenden Koeffizienten wurde das ursprünglich nur für Holz entwickelte Modell um einige weitere, repräsentative Baumaterialien erweitert. In den Untersuchungen waren allerdings die Abweichungen zwischen Messungen und Modell zum Teil sehr groß, besonders bei kleinen Schimmelindizes. Um das Auftreten von Schimmelpilzwachstum weder zu über- noch zu unterschätzen, verwendet das VTT-Modell Durchschnittswerte. Der Rückgang von Schimmelpilzbefall wurde anhand weniger Messreihen modelliert und wird deshalb nur als eine (erste) Näherung angesehen.

9.2 Grundlegende Unterschiede der Modellansätze

Die Unterschiede zwischen dem Biohygrothermischen Modell und dem VTT Modell sind in den jeweils gewählten Ansätzen begründet. Das VTT-Modell ist ein rein empirisches Modell, vor allem auf Laboruntersuchungen basierend, zum Teil wurden aber auch Feldversuche einbezogen. Dem Biohygrothermischen Modell liegt dagegen ein physikalisch begründetes Modell zugrunde. Bei diesem Modell stehen verschiedene Substratgruppen zur Auswahl, die auch um spezielle gemessene Materialsubstratgruppen erweitert werden können. Im Gegensatz zum Biohygrothermischen Modell kann beim Viitanen-Modell unter ungünstigen Bedingungen das berechnete Wachstum abnehmen. Beim Biohygrothermischen Modell ergibt sich zu diesen Zeiten ein Wachstumsstillstand. Im Viitanen-Modell steigt je nach Klimarandbedingung das prognostizierte Schimmelpilzwachstum nicht über einen Grenzwert, während beim biohygrothermischen Verfahren das Wachstum zunimmt, so lange es die Randbedingungen zulassen.

Freiexemplar

9.3 Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index

Die Übertragung erfolgt auf Basis rechnerisch bestimmter Randbedingungen. Damit werden reale instationäre, an Innenoberflächen auftretende Randbedingungen zugrunde gelegt. Dies erlaubt vielfältige Parametervariationen. Die Berechnungen wurden mit dem einem hygrothermischen Raummodell durchgeführt [14]. Die damit berechneten Oberflächenbedingungen dienen als Eingangsgröße für das Biohygrothermische Modell und das VTT-Modell. In [15] ist detailliert dargestellt, wie mit Hilfe vieler Parametervariationen eine Umrechnungsfunktion für das mit dem Biohygrothermische Modell berechnete Wachstum (in mm) in den VTT-Mould-Index ermittelt wurde (siehe Bild 13).

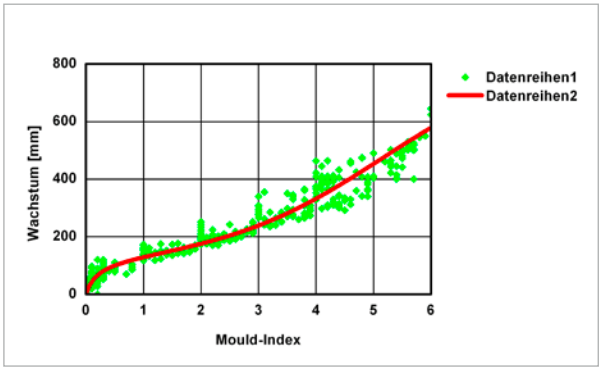


Bild 13 Funktion zur Übertragung des mit dem biohygrothermischen Verfahren berechneten Wachstums in mm in den VTT-Mould-Index

In Bild 14 wird beispielhaft für eine Berechnung (oben) die wahlweise Ergebnisausgabe in mm Wachstum (links unten) oder in Form des VTT-Mould-Indexes (rechts unten) dargestellt.

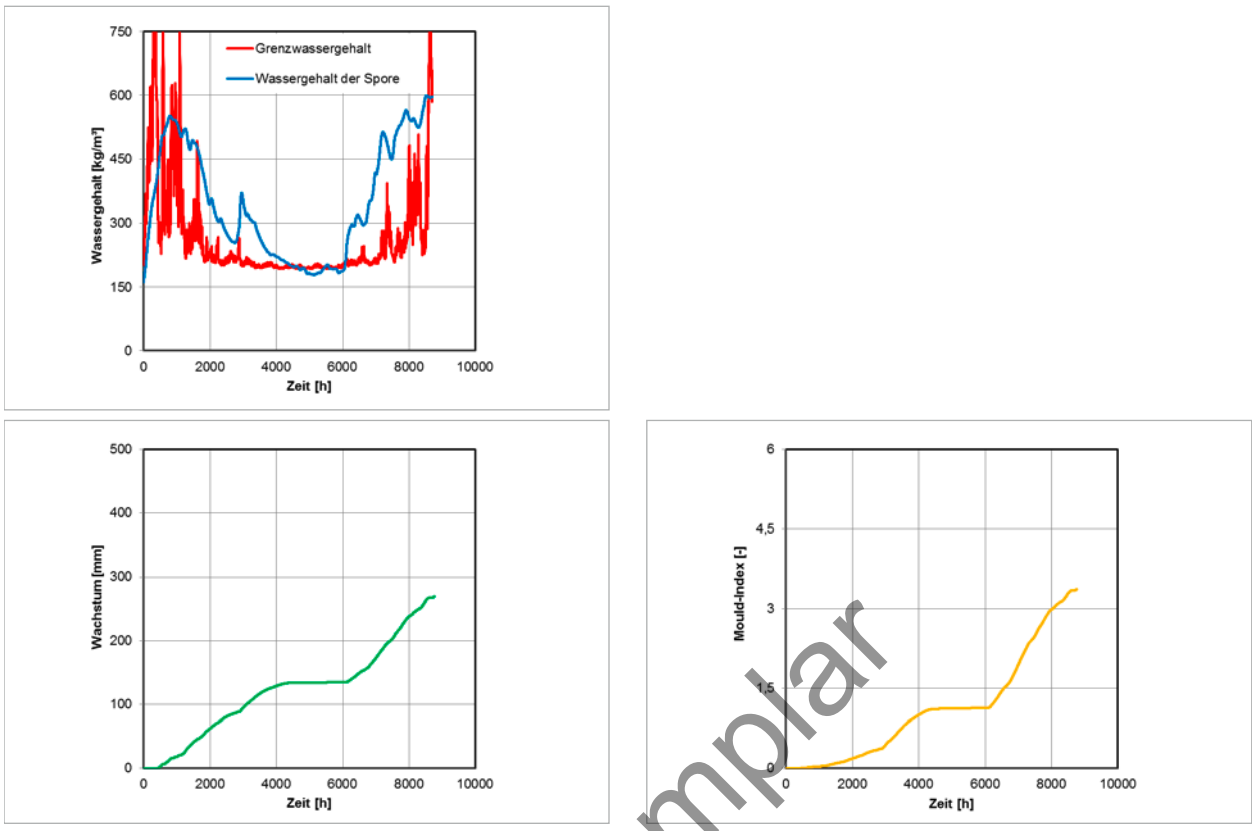


Bild 14 Ergebnisausgabe in mm Wachstum (links) oder in Form des VTT-Mould-Indexes (rechts).

Freiexemplar

9.4 Praktische Bewertung der Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse aus den Prognosemodellen können anhand eines Ampel-Schemas für die jeweilige Exposition der untersuchten Position auf oder in der Konstruktion bewertet werden. In [20] wurde dazu ein entsprechendes Schema entwickelt, das sich am Mould-Index orientiert und sowohl auf das Biohygrothermische als auch auf das VTT-Modell angewendet werden kann. Dabei werden unterschiedliche Stadien des prognostizierten, gerade beginnenden Schimmelpilzwachstums noch als allgemein akzeptabel (grüne Ampel) angesehen: dies betrifft v. a. den Bereich von der Auskeimung bis zum nur mikroskopisch sichtbaren Wachstum. Stärkeres Wachstum kann je nach Position und Nutzung des Gebäudes im Einzelfall noch akzeptiert werden (gelbe Ampel), während mit bloßem Auge sichtbares Wachstum in der Regel immer ausgeschlossen werden sollte (rote Ampel).

Hintergrund dieser Beurteilung ist, dass Schimmelwachstum im Außenbereich überall und auch im Innenraum an vielen Positionen, wie z. B. auf der feuchten Erde von Zimmerpflanzen, Lebensmitteln wie Obst und Gemüse, vorkommt. D. h. eine gewisse Grundlast von Sporen liegt sowohl im Innen- wie im Außenbereich immer vor. Und auch auf Bauteilen stellt nicht jedes minimale, temporäre und weder sichtbar werdende noch Sporen bildende Wachstum von Schimmelpilzen bereits ein Problem dar und muss dementsprechend unbedingt vermieden werden. Dies gilt insbesondere bei der Sanierung von Gebäuden, bei denen aus verschiedenen Gründen nicht immer jede Schwachstelle vollständig eliminiert werden kann.

Bei der Bewertung ist zunächst zu unterscheiden, ob die zu untersuchende Position in direktem Kontakt mit dem Innenraumklima und damit mit dem Nutzer steht oder ob es sich um eine Position außerhalb der Luftdichtheitsebene oder noch weiter außen handelt, bei der ein Kontakt mit dem Nutzer unwahrscheinlich ist und nicht oder nur selten und kurzfristig möglich ist. Als dritte Möglichkeit kommen auch noch Positionen in Betracht, die innerhalb von dauerhaft luftdicht abgeschotteten Bereichen liegen, so dass ein Kontakt allenfalls bei Abriss oder starker Beschädigung des Gebäudes möglich ist – in diesem Fall kann im Zweifel auch starkes Schimmelwachstum toleriert werden. Daraus ergeben sich folgende Expositionsklassen:

1. Innenoberfläche oder Position mit Raumluftkontakt
2. Oberflächen im Bauteilinneren ohne Raumluftkontakt
3. Kein Kontakt zum Nutzer

Im zweiten Schritt ist die Anfälligkeit des Untergrundmaterials für Schimmelpilzbildung anzugeben. Beim Biohygrothermischen Modell erfolgt dies wie bereits oben beschrieben über die Auswahl aus den Substratgruppen LIM 0 oder LIM Bau I oder II. Beim VTT-Modell können verschiedene Parameter wie Empfindlichkeit des Materials, Rauigkeit sowie Verschmutzungsgrad der Oberfläche, Abklingverhalten usw. gewählt oder einfach exemplarisch vordefinierte Materialien aus den hinterlegten Listen zugewiesen werden. Auf dieser Basis und den an der zu untersuchenden Position vorhandenen Verläufen von Temperatur und relativer Feuchte wird das Schimmelpilzwachstum mit einem der Modellansätze prognostiziert und im Mould-Index-Wert quantifiziert.

Abschließend erfolgt die Bewertung des Risikos in Form des in Bild 15 dargestellten Ampelschemas je nach Exposition der bewerteten Position im Bauteil. Eine Bewertung mit grün kann dabei als allgemein akzeptabel angesehen werden. Gelb bedeutet, dass sich das Wachstumsrisiko im Grenzbereich befindet und vom Planer individuell zu bewerten ist. Je nach Nutzung und Anspruch an das Bauteil kann dieses Ergebnis als noch akzeptabel oder bereits als kritisch angesehen werden. Rot ist dagegen in der Regel nicht mehr akzeptabel. Für Innenoberflächen und Positionen mit Raumluftkontakt ist dies spätestens erreicht, wenn der Schimmel mit bloßem Auge erkennbar wird.

Innenoberfläche oder Position mit Raumluftkontakt	Oberflächen im Bauteilinneren ohne Raumluftkontakt	Kein Kontakt zum Nutzer
Bewertungszeitraum kürzer als ein Jahr ⇨ Keine Bewertung möglich bzw. sinnvoll		
MI < 1: kein oder gerade startender Bewuchs auch in Wohnräumen normal und akzeptabel (z.B. Pflanzen)	MI < 2: kein oder nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	MI < 3: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs
1 ≤ MI < 2: nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	2 ≤ MI < 3: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI ≥ 3: mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs
MI ≥ 2: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI ≥ 3: mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs mit geringer Ausbreitung	Beurteilung im Einzelfall – aktuell nicht definiert

Bild 15 Ampelschema zur praktischen Bewertung der Ergebnisse in Mould-Index MI auf Basis des Biohygrothermischen Modells oder des VTT-Modells nach [20].

Freiexemplar

10 Plausibilitätskontrolle

Um eventuelle Fehler zu erkennen und Fehlinterpretationen zu vermeiden, sollten die Ergebnisse des Schimmelpilzprognosemodells stets einer kritischen Prüfung unterzogen werden. Die Qualität der Ergebnisse ist in hohem Maße von den Eingabedaten abhängig. Deshalb erfordert schon die Ermittlung dieser Daten hohe Anforderungen an den Wissensstand, an die Erfahrung und an die Sorgfalt des Benutzers.

Zu beachten ist, dass Prognosemodelle auf vereinfachten Annahmen beruhen, die auf der sicheren Seite liegen. Deshalb kann es vorkommen, dass für einen realen Fall Schimmelwachstum prognostiziert wird, obwohl während eines Messzeitraums keine Schimmelbildung festgestellt werden konnte. Dies kann allerdings auch andere Ursachen haben, z. B. eine falsche Wahl der Substratgruppe, nicht sorgfältig ausgeführte Messungen oder fehlerbehaftete Annahmen in Simulationsberechnungen. Ein Ausbleiben des Schimmelpilzwachstums kann z. B. auch in dem (noch) zu hohen pH-Wert des Untergrundes (Putz, Beton, Anstrich, …) begründet sein. Anwender dieser Modelle sollten über ausreichend Sachverstand verfügen, um diese Einflüsse ausschließen oder zumindest abschätzen zu können. Wird andererseits kein Schimmelpilzwachstum prognostiziert, kann bei korrekten Eingangsdaten für die Berechnung das Auftreten von Schimmelpilzen ausgeschlossen werden.

Schimmelpilzprognosemodelle dienen nicht der Simulation des realen Verhaltens bestimmter Pilzarten, sondern sind als zusätzliche Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung von bestehenden Konstruktionen und geplanten Maßnahmen zu verwenden! Bei der Anwendung der Modelle müssen immer auch die z. B. in Kapitel 6.2 genannten Einschränkungen in Bezug auf den Anwendungsbereich beachtet werden.

11 Praxisbeispiele

11.1 Einfluss der Baufeuchte auf Schimmelpilzrisiko

Bei der Bauwerkserstellung werden außer im Trockenbau meist große Mengen an Wasser in den Rohbau eingebracht (Baufeuchte). Durch rechnerische Untersuchungen kann der Einfluss der Baufeuchte auf das Innenklima und mit Hilfe des Prognosemodells der zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Lüftungsmehrbedarf abgeschätzt werden. Den Berechnungen wurde als Modell ein 2-geschossiges Haus aus einschaligem Porenbeton mit vier Dreizimmerwohnungen zugrunde gelegt, das in [16] genauer beschrieben ist. Die Feuchteproduktion im Gebäude wird zeitabhängig entsprechend einer geringen Feuchtelast, wie z. B. in Wohnungen von tagsüber Berufstätigen, angesetzt. Das bedeutet eine tägliche Feuchteproduktion von etwa 5 Litern pro Wohnung. Für den langfristigen Zustand (ohne Baufeuchte) wird bei allen Bauteilen zunächst von einem praktischen Feuchtegehalt über dem gesamten Querschnitt ausgegangen, d. h. von einem Sorptionswassergehalt bei 80 % relativer Luftfeuchte. Im baufeuchten Zustand wird der Anfangswassergehalt in den Wänden auf 200 kg/m³ (20 Vol.-%) gesetzt. Dies entspricht der Produktionsfeuchte von Porenbeton und damit in der Regel auch der Feuchte des Porenbeton-Mauerwerks zu Baubeginn. Vergleichbare Anfangswassergehalte können sich auch bei anderen Wandbildnern wie z. B. Beton oder Ziegel ergeben.

In Bild 16 links ist der errechnete Verlauf der Raumluftfeuchte für beide Fälle abgebildet. Die baufeuchten Außenwände geben ihre Anfangsfeuchte nicht nur an die Außenluft ab, sondern in erheblichem Maße auch an den Innenraum. Dies zeigt sich deutlich, wenn man die berechneten relativen Feuchten im Raum miteinander vergleicht. Bei der gewählten Luftwechselrate von konstant 0,3 h^{-1} liegt während der ersten Monate die Raumluftfeuchte mit Baufeuchte zeitweise um mehr als 15 % relativer Feuchte höher als im ausgetrockneten Zustand. Erst am Ende des Beobachtungszeitraumes sind die Feuchteeinträge in das Gebäude soweit zurückgegangen bzw. laufen so langsam ab, dass sich die beiden errechneten Verläufe annähern.

Freiexemplar

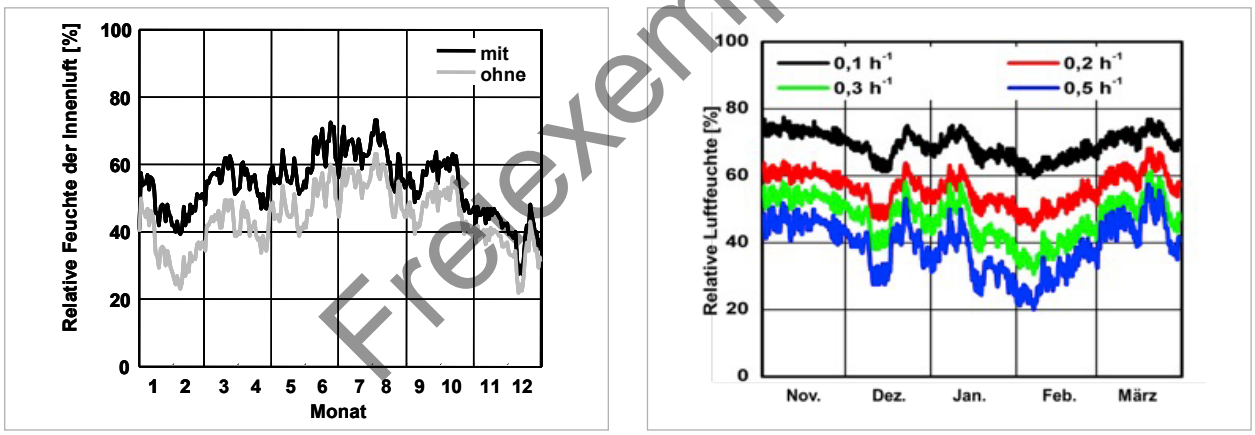


Bild 16 Links: Auswirkung der Baufeuchte des Porenbetons auf die zeitliche Entwicklung der relativen Feuchte der Raumluft bei einer Luftwechselrate von 0,3 h^{-1} für einen Jahreszeitraum. Rechts: Mit dem hygrothermischen Raummodell für die ersten Monate ermittelte Zeitverläufe der Raumluftfeuchte mit Baufeuchte für verschiedene Luftwechselraten.

Die in Bild 16 rechts für unterschiedliche Luftwechsel dargestellten Verläufe der Raumluftfeuchte dienen als Eingangsgröße für die Bewertung des Schimmelpilzrisikos mit dem Isoplethenmodell. Zur Berechnung der Temperaturen an den Innenoberflächen von Außenwänden hinter Schränken oder Gardinen werden typische Wärmeübergangswiderstände in den Ecken und für die Möblierung verwendet. Bild 16 zeigt die auf die beschriebene Weise ermittelten Ergebnisse für unterschiedliche Luftwechselraten. Trotz Baufeuchte wird weder bei einem Luftwechsel von 0,5 h^{-1} noch bei einem verringerten Luftwechsel von 0,3 h^{-1} ein Schimmelpilzwachstum prognostiziert (beide Fälle nicht dargestellt). Wird die Luftwechselrate dagegen auf 0,2 h^{-1} reduziert, kommt es in der Ecke hinter dem Schrank rasch zur vollständigen Auskeimung (Bild 17 links). Während in der freien Wandecke nur ein geringfügiges Myzelwachstum zu erwarten ist, wird in der Ecke hinter dem Schrank ein deutliches Wachstum berechnet. Wird der Luftwechsel weiter reduziert ($n = 0{,}1\ h^{-1}$), kommt es in der Ecke in kürzester Zeit zur Auskeimung, gefolgt von starkem Myzelwachstum (Bild 17 rechts). In diesem Fall ist sogar auf der ungestörten Wand mit Schimmelbildung zu rechnen.

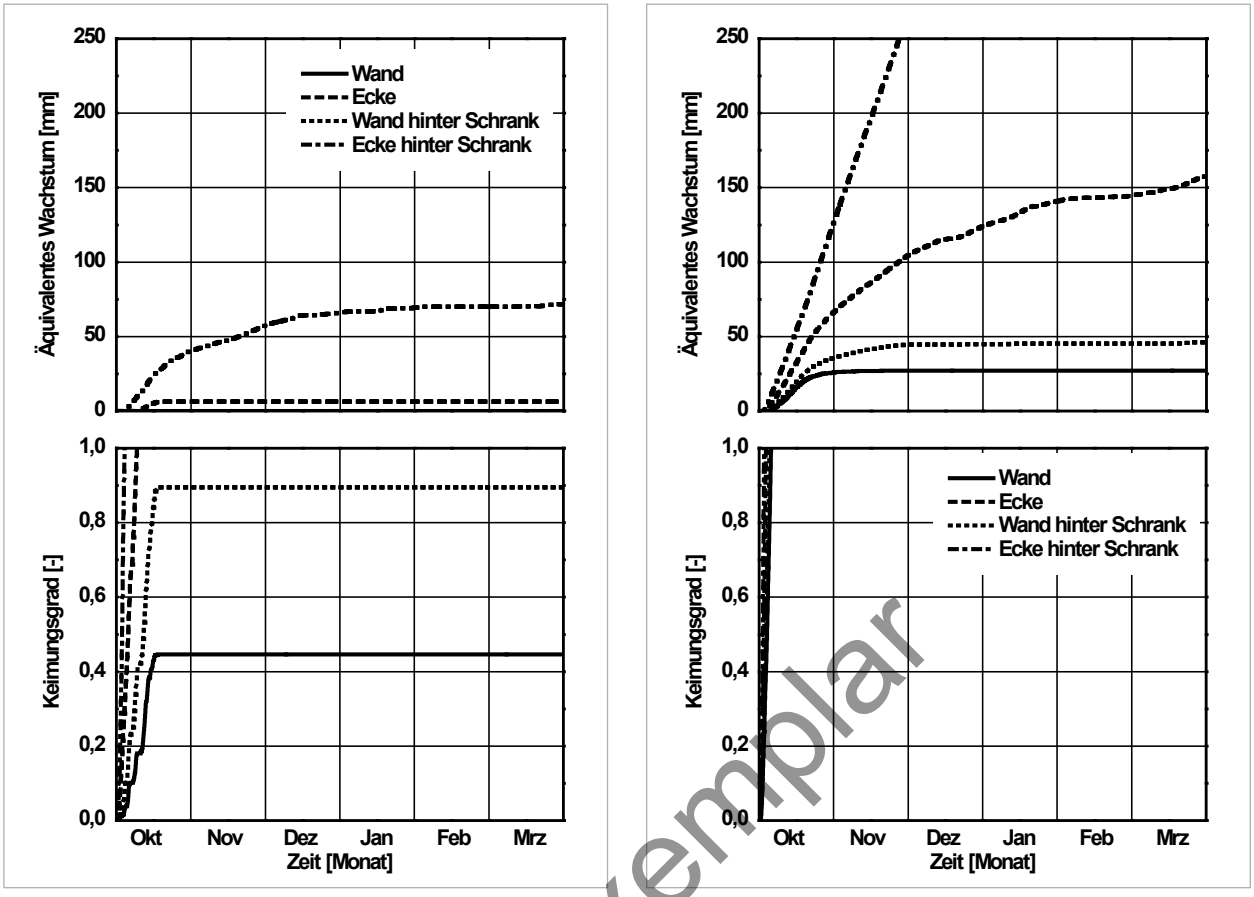


Bild 17 Mit dem Isoplethenmodell ermittelte Zeitverläufe von Sporenkeimung (unten) und Myzelwachstum (oben) für verschiedene Stellen an der Wand bei geringer Luftwechselrate von 0,2 h^{-1} (links) und von 0,1 h^{-1} (rechts)

Freiexemplar

Die Ergebnisse zeigen, dass im ersten Jahr in Neubauwohnungen mit einer etwas erhöhten Luftwechselrate – nämlich im Mittel 0,6 h^{-1} statt eines mit 0,3 h^{-1} angenommenen Durchschnittswertes für ein gut gedämmtes Haus – die Baufeuchte ausreichend abgeführt werden kann. Bei stärkerer Belüftung ist nur in den ersten Monaten mit einem besseren Trocknungseffekt zu rechnen, jedoch steigt der Heizwärmebedarf. Bei der heute geforderten Wärmedämmung von Außenwänden ist auch bei erhöhter Baufeuchte im ersten Jahr, unter durchschnittlichen Wohnbedingungen somit nur mit Schimmelpilzbildung an Außenwänden zu rechnen, wenn äußerst »sparsam« gelüftet wird.

11.2 Veränderte Raumklimabedingungen nach einer Nutzungsänderung

Eine Nutzungsänderung von Räumen, Geschossen oder ganzen Gebäuden führt häufig zu veränderten raumklimatischen Bedingungen. Dies ist zwangsweise der Fall, wenn mit einer Nutzungsänderung eine Klimatisierung verbunden ist.

Schon während der Planungsphase umfangreicher Sanierungsmaßnahmen in einem Museum war abzusehen, dass erhebliche Änderungen der raumklimatischen Bedingungen zu erwarten waren, auch bedingt durch die Umsetzung eines neuen Nutzungskonzepts [17]. Unter anderem wurde geplant, die Klimatisierung ehemaliger Lagerräume an die Erfordernisse der ausgestellten Exponate anzupassen, was Luftfeuchten von bis zu 60 % bedeutete. Weiterhin sollten im Zuge der Sanierungsarbeiten die historischen Einscheibenglas-Fenster durch modernere Isolierglasscheiben ersetzt werden. Die verbesserte Wärmedämmung der Fenster bedeutet allerdings auch, dass die Temperaturen auf den Fensteroberflächen häufig die der ungedämmten Wandoberflächen übersteigen würden, sodass die Taupunkttemperatur zuerst auf der Wandoberfläche unterschritten würde. Dabei war schon bei der vorhandenen Konstruktion zuweilen Oberflächenkondensat festgestellt worden.

Insgesamt waren nach der Umsetzung aller geplanten Maßnahmen ungünstigere Luftfeuchten und Temperaturen im Raum und an den Außenwandoberflächen zu erwarten. Da besonders das geplante Innenklima eine höhere Belastung im Vergleich zur vorherigen Situation darstellte, wurden durch Simulationsrechnungen kri-

tische konstruktive Details hinsichtlich der Möglichkeit von Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbildung untersucht. Wenn die Simulationsergebnisse zu hohe relative Luftfeuchten prognostizierten, wurde eine diffusionsoffene Innendämmung aus Calciumsilikat vorgesehen, da die Fassade des Museums aus Gründen des Denkmalschutzes nicht mit einer Außendämmung versehen werden konnte. Die diffusionsoffene Struktur ermöglicht eine Austrocknung der bestehenden, stark schlagregenbeanspruchten Wandkonstruktion auch zum Innenraum, eventuell entstehendes Kondensat wird durch die hohe kapillare Leitfähigkeit des Materials verteilt.

Beispielhaft sollen die Ergebnisse im Laibungsbereich eines Fensters sowie an einem Wandaufbau vorgestellt werden, jeweils ungedämmt und mit 40 mm Dämmung. Bei dem Wandaufbau wurden die hygrothermischen Verhältnisse hinter Gemälden untersucht. Sitzt der Holzrahmen eines Gemäldes nahezu vollflächig auf der Wandoberfläche auf, fungiert die annähernd ruhende Luftschicht zwischen Gemälderückseite und Wand quasi als Wärmedämmung. Einen Abstand zwischen Bilderrahmen und Wand zu belassen, war von der Museumsleitung zunächst abgelehnt worden. 40 mm dicke Calciumsilikatplatten konnten den Maximalwert der berechneten Luftfeuchte von 97 % auf immerhin 87 % senken (Bild 18).

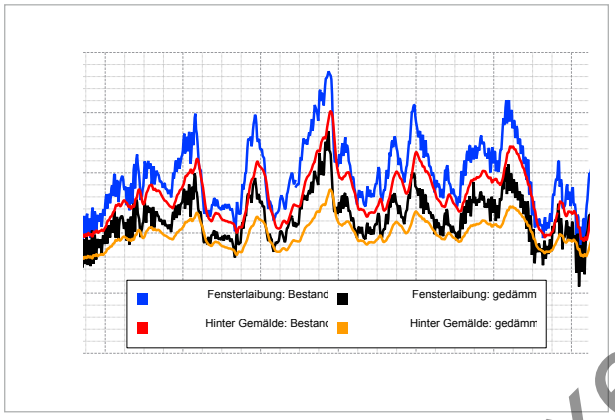


Bild 18 Verlauf der relativen Luftfeuchte während eines Winters hinter einem auf der Wand aufgehängten Bild und im Laibungsbereich eines Fensters im Bestand und mit 40 mm Dämmung.

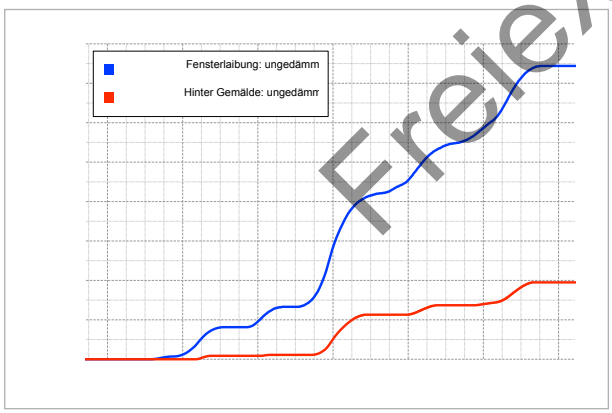


Bild 19 Prognostiziertes Schimmelpilzwachstum hinter einem auf der Wand aufgehängten Bild und im Laibungsbereich eines Fensters

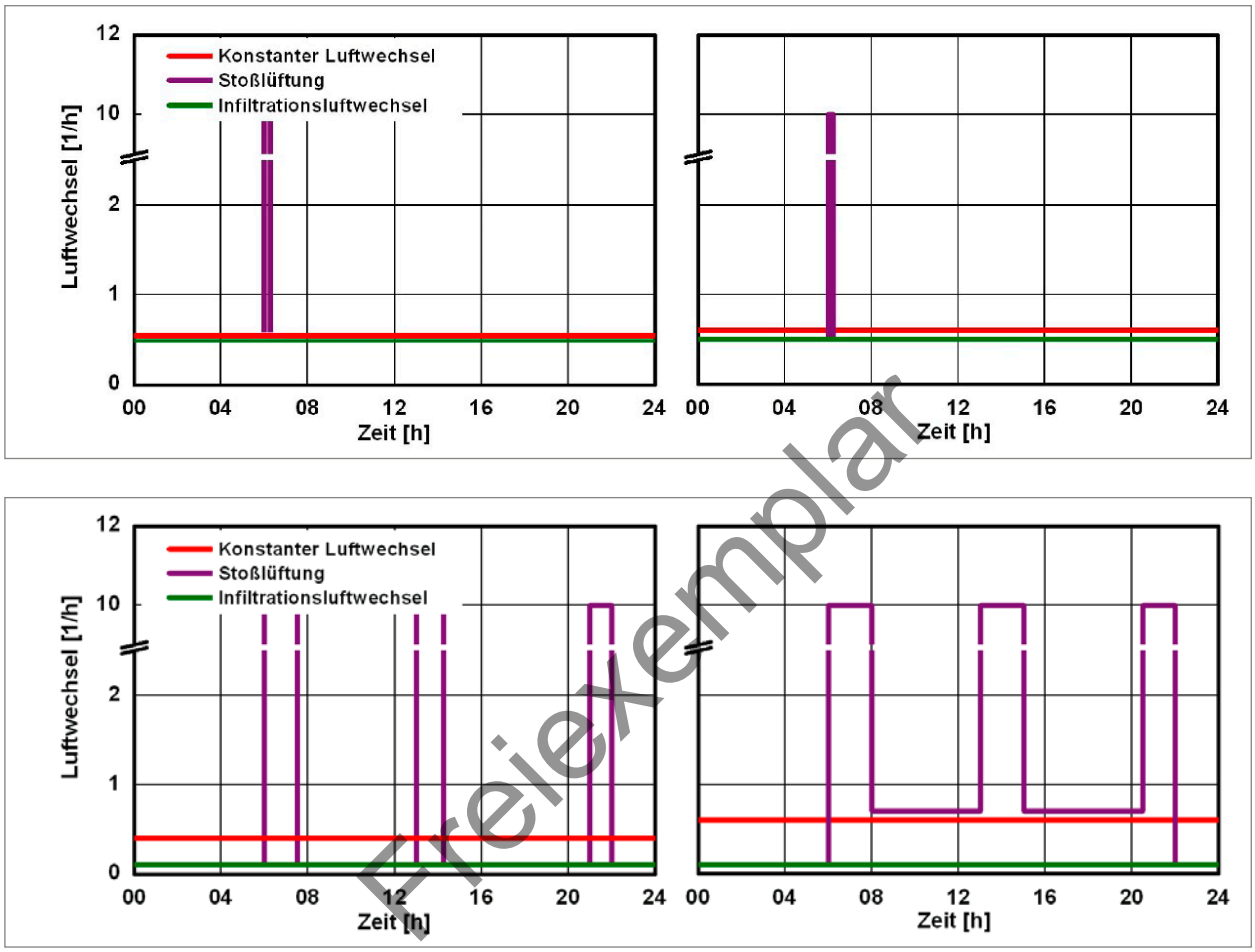
Freiexemplar

Durch die Dämmung wird die relative Luftfeuchte im Winter hinter Gemälden um bis zu 15 % reduziert. Dies zeigt sich auch nach einer Analyse mit dem Schimmelpilzprognosemodell (Bild 19). Während bei den gedämmten Konstruktionen kein Pilzwachstum zu verzeichnen ist, müsste bei Beibehaltung der bestehenden Konstruktion, vor allem hinter den Bildern, damit gerechnet werden.

11.3 Einbau dichter Fenster in unzureichend gedämmten Altbauten

Mit Hilfe eines Raumklimamodells [18] kann der Einfluss unterschiedlicher Lüftungsvarianten auf das Raumklima berechnet werden. Durch gekoppelte Anwendung mit dem Biohygrothermischen Modell kann unter Verwendung der berechneten Oberflächentemperaturen und -feuchten das Schimmelpilzrisiko in den gefährdeten Raumecken abgeschätzt werden. Für gegebene Randbedingungen wird die notwendige Lüftung durch iterative Anwendung beider Verfahren ermittelt. In [19] wurde der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien (Dauerlüftung oder Stoßlüftung) auf den zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen mittleren Luftwechsel dargelegt. Als Beispiel diente eine typische 3-Zimmerwohnung. Berechnet wurden dabei als Beispiel für einen Altbau ein Ziegelmauerwerk mit bauzeitlichem Mindestwärmeschutz (U-Wert 1,4 W/m^{2}K) mit alten

und neuen, dichten Fenstern. In dieser Untersuchung wird die Feuchteproduktion nicht verallgemeinert über die Wohnung gemittelt angenommen, sondern Raum für Raum getrennt mit der Nutzung entsprechender typischer Feuchteproduktion betrachtet. Der Normalfall beinhaltet die Feuchteproduktion durch Bewohner, Pflanzen, Körperreinigung und Kochvorgänge. In der worst-case Betrachtung wird das Feuchteprofil zusätzlich durch trocknende Wäsche erhöht. Mit einbezogen wurden auch unterschiedliche Lüftungsarten (Stoßlüftung; Dauerlüftung) sowie ein entsprechender Infiltrationsluftwechsel.



Freiexemplar

Bild 20 Ermittelte, zur Schimmelpilzvermeidung notwendige konstante Luftwechsel bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer einer Altbauwohnung vor (oben) und nach Einbau dichter Fenster (unten), ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum. Mit dargestellt ist der im konstanten Luftwechsel beinhaltete Infiltrationsluftwechsel.

Als Beispiel zeigt Bild 20 den zeitlichen Verlauf der zur Schimmelpilzvermeidung resultierenden Lüftungserfordernisse im Falle der Dauerlüftung bzw. der Stoßlüftung für ein Schlafzimmer der Modellwohnung ohne und mit Wäschetrocknung. Bei dem dargestellten konstanten Mindestluftwechsel (rote Linie) bzw. dem Mindeststoßluftwechsel (lila Linie) ergeben sich in den Außenraumecken Oberflächenfeuchten, die gemäß den Berechnungen mit dem Biohygrothermischen Modell gerade unterhalb den für Schimmelpilzbildung erforderlichen Wachstumsvoraussetzungen liegen. Als grüne Linie ist die dabei angesetzte und im konstanten Mindestluftwechsel enthaltene Infiltrationsluftwechselrate mit angegeben (0,5 h^{-1} beim Altbau mit alten Fenstern, sonst 0,1 h^{-1}). Der Einfluss der erhöhten Feuchtelast durch Wäschetrocknen ist deutlich zu erkennen. Bei einem Altbau ist trotz des niedrigeren Dämmstandards, der das Schimmelpilzrisiko aufgrund der abgesenkten Oberflächentemperaturen grundsätzlich erhöht, aufgrund des deutlich höheren Infiltrationsluftwechsels (grüne Linie) eine einmalige kurze morgendliche Stoßlüftung ausreichend. Selbst im Falle der Wäschetrocknung (rechte Abbildung) kommt man hierbei ohne weitere Stoßlüftung aus. Bei Dauerlüftung genügt ein geringer zusätzlicher Luftaustausch. Allerdings muss die bei diesen Berechnungen als Infiltrationsluftwechsel dauerhaft angesetzte Luftwechselrate von 0,5 h^{-1} im Falle ungünstiger Witterungsbedingungen (z. B. bei Windstille) durch entsprechende Lüftungsmaßnahmen sichergestellt werden.

Ein ganz anderes Bild ergibt sich, wenn beim Altbau ohne zusätzliche Dämmmaßnahmen dichte Fenster eingesetzt werden. Hier müssen aufgrund des deutlich reduzierten Infiltrationsluftwechsels mindestens dreimal täglich die Fenster mehr als eine Stunde lang geöffnet werden. Im Falle der Wäschetrocknung (rechts) ist eine Schimmelpilzvermeidung durch Stoßlüftung kaum mehr praktikabel. In diesem Fall dürften sich auch die durch den Einbau dichter Fenster erhofften Energieeinsparungen bei Vermeidung von Schimmelbewuchs nicht einstellen.

In einem weiteren Schritt könnte für diesen Fall, analog zu dem Beispiel in Kapitel 11.2 berechnet werden, wie dick eine Wärmedämmung ausgeführt werden müsste, um bei praktikablem Lüftungsregime Schimmel zu vermeiden.

Die Berechnungen bestätigen, 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 abhängt. Bei gut gedämmten Außenwänden ergeben sich in Bezug auf die Energieverluste nur geringfügige Unterschiede zwischen kontinuierlicher Lüftung und Stoßlüftung (siehe [19]), wobei eine richtig ausgewählte Stoßlüftung wesentlich ist. Vor allem lässt sich erkennen, dass neben der Stoßlüftung stets eine kontinuierliche Lüftung vorhanden sein sollte, die permanent eingebrachte Feuchte abführt. Je schlechter der Wärmestandard, desto höher muss bei gleicher Feuchtelast die durch Dauerlüftung erzielte Luftwechselrate sein. Dies zeigt sich vor allem bei den Ergebnissen des Altbaus mit unterschiedlicher Fensterdichtheit. Bei Einbau dichter Fenster mit der Folge einer Absenkung des Infiltrationsluftwechsels auf 0,1 h^{-1} kann die Restfeuchte nicht mehr sinnvoll über Stoßlüftung abgeführt werden. Dies bedeutet aber nichts anderes, als dass über zusätzliche Öffnungen wieder eine mittlere Luftwechselrate von 0,5 h^{-1} erreicht werden muss bzw. die Fenster wieder »undichter« gemacht werden müssen oder durch sonstige Maßnahmen erreicht werden muss, dass der kontinuierliche Luftaustausch zunimmt.

12 Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Vorhersagemethoden überprüfen, ob bei bestimmten hygrothermischen Randbedingungen Schimmelpilzbildung auftreten kann. Sie bestehen im Wesentlichen aus drei unterschiedlichen Teilen:

1. Als Ausgangsinformationen werden neben der Art des Materials hygrothermische Randbedingungen, z. B. als Stundenwerte, für die Berechnungen benötigt. Diese können aus Messwerten oder hygrothermischen Rechenergebnissen stammen.
2. Die überschlägige Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung kann auf Basis des reinen Isoplethenverfahrens erfolgen. Dabei wird zwischen Sporenauskeimung und Myzelwachstum unterschieden. Es stehen dazu Isoplethensysteme für verschiedene Materialsubstrate zur Verfügung. Eine differenziertere Zuordnung weiterer Materialien zu Isoplethen-Klassen ist mit vorhandener Messtechnik möglich.
3. Stark instationäre Randbedingungen können mit dem Isoplethenverfahren allein nicht ausreichend berücksichtigt werden. Das Isoplethenmodell kann eine durch Trockenperioden auftretende Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen, da es sich um ein rein additives Verfahren handelt. Es bietet aber dennoch eine einfach handhabbare Abschätzung möglicher Schimmelpilzbildung. Um auch Austrocknungseffekte von Pilzsporen beschreiben zu können, wurde ein auf dem Isoplethenmodell aufbauendes biohygrothermisches Verfahren entwickelt, das sich der technischen Beschreibung einer Schimmelpilzspore auf Basis einer Feuchtespeicherfunktion und einer feuchtabhängigen s_d-Wert-Kurve bedient. Auch wenn das Modell nicht in der Lage ist, die natürlichen Gegebenheiten exakt zu beschreiben, ist das Verfahren geeignet, eine zutreffende Beurteilung des Risikos einer Schimmelpilzbildung zu ermöglichen.

Das biohygrothermische Verfahren ist für Innenräume entwickelt worden. Für eine Erweiterung in Bezug auf die Situation an der Oberfläche von Außenfassaden ist die Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren wie z. B. die solare Einstrahlung erforderlich. Eine weitere Ergänzung zur Berücksichtigung anderer Mikroorganismen wie Algen, Flechten, Bakterien, Holz zerstörende Pilze ist denkbar. Für Holz zerstörende Pilze und Organismen sind entsprechende Ansätze bereits in WTA-Merkblatt 6-8 dokumentiert.

Freiexemplar

13 Literatur

[1] Reiß, J.: Schimmelpilze – Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (1988).

[2] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart (1995).

[3] Snow, D.: The germination of mould spores at controlled humidities. Ann. App. Biol. Vol. 36(1949), H. 1, S. 1–13.

[4] Smith, S. L.; Hill, S. T.: Influence of temperature and water activity on germination and growth of Aspergillus restrictus and Aspergillus versicolor. Transactions of the British Mycological Society Vol. 79 (1982), H. 3, S. 558–560.

[5] Gertis, K.; Erhom, H.; Reiß, J.: Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden. Proceedings Bauphysik-Kongreß in Berlin (1999), S. 241–253.

[6] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).

[7] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Tschaikner, A.; Krus, M.; Sedlbauer, K.: Schoch, T. (2005): Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen – materialspezifische Wachstumsisoplethen. IBP-Mitteilung 32, Nr. 457.

[8] Reiß, J.; Erhorn, H.: Beurteilung von Feuchteschäden. IBP-Bericht WG 47/1997 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, Stuttgart (1997).

[9] https://wufi.de/de/2017/03/31/wufi-bio/

[10] Krus, M.; Sedlbauer, K.: Brauchen wir Gefährdungsklassen für Schimmelpilze zur Beurteilung von Baukonstruktionen? Tagungsbeitrag für das 11. Bauklimatische Symposium der TU Dresden. 27. Sept. 2002, S. 790–802.

[11] Viitanen, H.; Ritschkoff, A.: Mould growth in pine and spruce sapewood in relation to air humidity and temperature. Uppsala :Swedish University of Agriculture Scienses, Department of Forrest Products, 1991.

[12] Ojanen, T.; Viitanen, H.; Peuhkuri, R.; Lähdesmäki, K.; Vinha, J.; Salminen, K.: Mould Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials, Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Xi International Conference 2010.

[13] Viitanen, H.: Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures, in: Nakajima, H: Mass Transfer – Advanced Aspects, Publisher: Intech 2011, S. 579–594.

[14] Künzel, H. M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.

[15] Seidler, C. M.: Neue Bewertung der Berechnungsergebnisse des Biohygrothermischen Modells mit dem Mould-Index. Masterarbeit Universität Stuttgart, Master online Bauphysik, 2009.

[16] Krus, M.; Sedlbauer, K.; Holm, A.; Künzel, H. M.: Rechnerische Simulation zu Feuchtelast, Luftwechsel und Schimmelpilzbildung in Wohnungen. Teil 4: Mehrbedarf an Lüftung und Heizenergie bei vorhandener Baufeuchte. Im Buch »Fensterlüftung und Raumklima«, Hrsg. Künzel, H., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 220–226, 2006, ISBN 3-8167-6796-6.

[17] Grunewald, J.; Ruisinger, U.; Häupl, P.: The Rijksmuseum Amsterdam – Hygrothermal analysis and dimensioning of thermal insulation, 3rd International Building Physics/ Science Conference, Montreal 2006, Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, S. 345–352

Freiexemplar

[18] 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.

[19] Krus, M.; Holm, A.; Sedlbauer, K.; Kainz, E.: Rechnerische Simulation zu Feuchtelast, Luftwechsel und Schimmelpilzbildung in Wohnungen. Teil 3: Rechnerische Beurteilung der Lüftungserfordernisse zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum in Ecken. Im Buch »Fensterlüftung und Raumklima«, Hrsg. Künzel, H., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 208–219, 2006, ISBN 3-8167-6796-6.

[20] Viitanen, H.; Krus, M.; Ojanen, T.; Eitner, V.; Zirkelbach, D.: Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models. In: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165

Freiexemplar