

Schimmelpilze an Wohngebäuden. - Altes Thema, neue Lösungen -

K. Sedlbauer und Dr. M. Krus
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

Zusammenfassung:

Die bisher üblichen Bewertungsmethoden für Schimmelpilzbefall gehen in der Regel von stationären Randbedingungen aus. Während in den gängigen Angaben in Deutschland meist nur die relative Feuchte als Kriterium genannt wird, werden international mittlerweile immer häufiger biologisch gemessene Isoplethensysteme für die Bewertung zugrunde gelegt. Dabei sind temperaturabhängig relative Feuchten genannt, bei deren Überschreitung Schimmelpilzbefall auftreten kann. Sämtliche angegebenen Wachstumskurven wurden unter stationären Bedingungen ermittelt, obwohl in der Realität stets instationäre Wachstumsbedingungen auftreten. Ein biohygrothermische Modell ermöglicht erstmals die Berücksichtigung von sich ändernden Temperaturen und relativen Feuchten, indem das hygrothermische Verhalten einer Schimmelpilzspore beschrieben wird. Obgleich hinsichtlich der dafür erforderlichen Kennwerte wie feuchteabhängiger Diffusionswiderstand der Sporenwand und Feuchtespeicherfunktion im Sporennieren noch ein enormer Forschungsbedarf besteht, kann anhand der dargestellten Anwendungsbeispiele eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des Modells zur Klärung der Schimmelwachstumsgefahr demonstriert werden. Damit ist eine Basis geschaffen, Schimmelpilzbildung instationär zu beschreiben.

1. Einleitung

Ohne Pilze, Bakterien und anderen Mikroorganismen wäre ein Leben auf der Erde nicht vorstellbar. Bei für Schimmelpilze günstigen Wachstumsbedingungen kann es allerdings auch zu einem Befall in Gebäuden kommen. Obgleich in den letzten Jahrzehnten der energetische Standard von Häusern erheblich verbessert hat, häufen sich Berichte über Bauschäden durch Schimmelpilze. Die Gefährdung für den Bewohner besteht dabei in einer Besiedelung durch krankmachende Mikroorganismen. 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 ausgeht und die komplexen instationären Vorgänge berücksichtigt. Der Einsatz von Bioziden bringt, vor allem im Innenraum, zusätzliche Gesundheitsrisiken mit sich und kann Schimmelpilzbildung meist nur über eine begrenzte Zeit verhindern. Voraussetzung für eine biozidfreie Verhinderung von Schimmelpilzen ist die genaue Kenntnis der Randbedingungen, unter denen mit Pilzwachstum gerechnet werden muß. Daher war es Ziel in [1], eine neuartige Methode zu entwickeln, die eine Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis eines Vergleichs der Wachstumsvoraussetzungen mit den im Bau auftretenden hygrothermischen Wachstumsbedingungen ermöglicht.

2. Neue Ansätze zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung

Es hat sich gezeigt [1], daß die drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen „Temperatur, Feuchte und Substrat“ über eine bestimmte Zeitperiode simultan vorhanden sein müssen, um Schimmelpilzbildung zu ermöglichen. Die derzeit üblichen Bewertungsmethoden für Schimmelpilzbildung erlauben keine oder eine nur indirekte Berücksichtigung instationärer Randbedingungen. In der mikrobiologischen Literatur wurde zunächst meist nur die relative Feuchte als einziges Kriterium genannt. Mittlerweile gibt es auch Angaben über kritische Grenzfeuchtebedingungen in Abhängigkeit von der Temperatur, bei deren Überschreitung Schimmelpilzbildung auftreten kann (Bild 1). Diese Kennlinien erlauben in der Regel aber keine Differenzierung des Einflusses von Substrat, d.h. Baustoff oder der Verschmutzung.

In [1] wurde daher ein biohygrothermisches Verfahren entwickelt, das die Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis aller drei genannten biologischen Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen bei instationären Randbedingungen ermöglicht. Das neue Verfahren besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Vorhersagemodellen, nämlich dem Isoplethenmodell und dem instationären biohygrothermischen Modell. Das Isoplethenmodell ermöglicht u.a. die Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten, wobei auch der Substrateinfluß bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung berücksichtigt wird. Das in Bild 1 gezeigte Isoplethensystem beschreibt die hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen eines Pilzes und besteht

aus einem von der Temperatur und der relativen Feuchte abhängigen Kurvensystem, den sog. „Isoplethen“, die Sporenauskeimungszeiten kennzeichnen.

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemein gültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten und gesundheitsbeeinträchtigend sind. Für diese etwas mehr als 150 Spezies, die beide Merkmale erfüllen, werden quantitative Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte zusammengestellt. Die Isoplethensysteme wurden zur Beurteilung der Sporenauskeimung entwickelt, basieren auf meßtechnisch erfaßten biologischen Daten und berücksichtigen die Wachstumsvoraussetzung aller Pilze. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen möglicher Pilzaktivität werden LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt. Um den Einfluß des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für zwei Substratgruppen (Grenzkurve LIM_{Bau}) vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet werden können. Dazu erfolgt eine Definition von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

- Substratgruppe I: biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Material für dauerelastische Fugen,
- Substratgruppe II: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen,
- Substratgruppe III: Baustoffe, die weder abgebaut werden können noch Nährstoffe enthalten.

Ein eigenes Isoplethensystem wird nur für die mit I und II bezeichneten Gruppen erstellt, wie Bild 2 zeigt. Für die Substratgruppe III wird kein Isoplethensystem angegeben, da davon ausgegangen werden kann, daß ohne Verschmutzung Schimmelpilzbildung nicht auftreten kann. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets die Substratgruppe I zugrunde gelegt werden. Grundprinzip der neuen Methode und der Festlegung der Substratgruppen ist es, immer vom ungünstigsten Fall auszugehen, also mit der Vorhersage im Hinblick auf eine Vermeidung von Schimmelpilzen stets auf der sicheren Seite zu liegen.

Mithilfe dieser Isoplethensysteme können für Angaben der Temperatur und relativen Feuchte die Sporenauskeimungszeiten ermittelt werden. Die Beurteilung der Sporenauskeimung nach dem Isoplethenmodell hat aber den Nachteil, daß man instationäre

Mikroklima-Randbedingungen, z.B. ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen, nicht berücksichtigen kann. Daher wird dieses häufiger Sporenauskeimung vorhersagen als das biohygrothermische Modell.

Um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflußgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, bauphysikalisch beschreiben zu können, wurde ein neuartiges biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen. Das instationäre biohygrothermische Verfahren beruht auf dem Grundgedanken, daß eine Pilzspore wegen der in ihr vorhandenen Stoffe ein gewisses osmotisches Potential besitzt, mit dessen Hilfe Wasser aus der Umgebung aufgenommen werden kann. Dieses Potential wird rechnerisch mit Hilfe einer Feuchtespeicherfunktion beschrieben. Die Feuchteaufnahme der Spore durch die Sporenwand hindurch wird im Modell mittels eines Diffusionsansatzes erfaßt. Diese Vereinfachung ist gerechtfertigt, da die Feuchteaufnahme aufgrund der geringen geometrischen Größe der Schimmelpilzspore stets isotherm abläuft. Die Sporenwand erhält dabei einen feuchteabhängigen s_d -Wert, der durch Vergleich der berechneten mit den in den vorliegenden Isoplethensystemen (Bild 2) fixierten Sporenauskeimungszeiten iterativ angepaßt wird. Ist ein bestimmter Wassergehalt im Sporennieren vorhanden, der den Beginn des Stoffwechsels zuläßt, kann der Pilz unabhängig von äußeren Bedingungen seinen Stoffwechsel selbst regulieren und zu wachsen beginnen. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt, indem temperaturabhängig aus den entsprechenden LIM-Kurven die tiefste relative Feuchte ablesbar ist, bei der Sporenauskeimung stattfindet. Mithilfe der für das Sporenniere zugrunde gelegten Feuchtespeicherfunktion kann der in der Spore sich einstellende Wassergehalt errechnet und dann mit dem Grenzwassergehalt verglichen werden. Eine Überschreitung des Grenzwassergehalts zeigt also Schimmelpilzbildung an. Zur Berücksichtigung möglicher Substrateinflüsse sind die s_d -Werte der Sporenwand so angepaßt, daß die unter stationären Bedingungen mit dem biohygrothermischen Modell ermittelten Sporenauskeimungszeiten denjenigen in den Isoplethensystemen der Substratgruppen I und II (Bild 2) entsprechen. Durch dieses Anpassen der s_d -Werte der Sporenwand kann eine Modellspore definiert werden, die für beide Substratgruppen Gültigkeit besitzt. Ferner sind bei der Festlegung der substratabhängigen Grenzwassergehalte die LIM-Kurven in den Isoplethensystemen der entsprechenden Substratgruppen zu verwenden.

Die im Bau auftretenden instationären Bedingungen für Temperatur und relative Feuchte können mit dem Programm WUFI [2] für ein- und zweidimensionale Baukonstruktionsgeometrien gewonnen werden. Die Beurteilung der Sporenauskeimung erfolgt auf Basis des an der Oberfläche auftretenden

Mikroklimas. Die an den entsprechenden Stellen auf oder in Bauteilen ermittelten instationären hygrothermischen Bedingungen dienen als Eingabeparameter für das biohygrothermische Modell.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Innenwandoberflächen

An einer in [3] beschriebenen monolithischen Außenwand aus Mauerwerk mit innenseitigem Kalkzementputz eines Altbaus soll die Gefahr einer Schimmelpilzbildung an der nach Norden ausgerichteten Innenoberfläche beurteilt werden. Es werden unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der 36,5 cm dicken Wand sowie verschiedene Feuchtelasten als Klimarandbedingungen im Wohnraum zugrunde gelegt. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Untersuchungsparameter sowie das Ergebnis der Schimmelpilzbewertung für die Fälle A bis G. Als Außenklima werden gemessene Klimadatenätze als Stundenmittelwerte verwendet. Sämtliche Materialdaten sind der WUFI-Datenbank entnommen. Für die in Tabelle 1 genannten 7 Fälle sind unter Berücksichtigung der verschiedenen Innenklimate mit dem Programm WUFI die sich einstellenden Mikroklima-Randbedingungen an der Putzoberfläche ermittelt worden. Mithilfe des biohygrothermischen Modells wurden, jeweils für Substratgruppe II, zu der Putz zählt, die Wassergehalte in den Modellsporen berechnet und mit den Grenzwassergehalten verglichen.

In den Fällen A und B wird für eine mittlere Feuchtelast das Dämmniveau variiert. Die bei den Berechnungen angenommenen Wärmeleitfähigkeiten betragen dabei im trockenen Zustand $0,2 \text{ W}/(\text{m K})$ im Fall A bzw. $0,6 \text{ W}/(\text{m K})$ im Fall B. Wie Bild 3 (gestrichelte Linien) zeigt, entsteht in Wandmitte bei einem Wärmedurchgangskoeffizienten des Mauerwerks bei A von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bzw. $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (Fall B) keine Schimmelpilzbildung. Die Wassergehalte der Sporen liegen unter den Grenzwassergehalten. Dies war zu erwarten, da die relative Feuchte an der Wand bei guter Dämmung (Fall A) nur 62 % im Sommer und nur 43 % im Winter erreicht und bei verringertem Dämmwert (Fall B), wie die Berechnung zeigt, auf nur maximal 69 % steigt.

Ein vor der Wand stehendes Möbelstück behindert die konvektive Luftströmung im Bereich der dahinterliegenden Putzoberfläche. Dies kann bauphysikalisch mit einem verringerten Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben werden. Daher ist in den Fällen C und D jeweils gemäß dem Vorschlag [4] ein Wert von $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für freistehende Schränke angenommen worden. Nur bei einer Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks von $0,6 \text{ W}/(\text{m K})$ im Fall D entsteht Schimmelpilzbildung. Bereits Ende Oktober liegt, wie Bild 3 zeigt, der Wassergehalt in der Spore (gestrichelte dünne Linie) erheblich über dem Grenzwassergehalt (durchgezogene dünne Linie). Vor allem in den beiden kalten Perioden des verwendeten Klimadatenatzes im Dezember und Februar ergeben sich kritische Zustände. Bei besserer Dämmung (Fall C) kann

Pilzbildung hingegen ausgeschlossen werden. Im Fall E wird eine hohe Feuchtelast den WUFI-Berechnungen zugrunde gelegt. Es zeigt sich, bedingt durch die gute Dämmung, keine Schimmelpilzbildung. In den Fällen A bis C sowie E unterscheiden sich die Wassergehalte in den Sporen zwar geringfügig, dennoch wird der Übersichtlichkeit halber nur eine Linie in Bild 3 dargestellt. Analoges gilt für den Grenzwassergehalt.

Um zusätzlich die Auswirkungen einer Sanierung des Gebäudes abschätzen zu können, wird im Fall F angenommen, daß eine Erneuerung der Fenster unter Beibehaltung des bisherigen Dämmstandards der Außenwände stattfindet. Die neuen dichten Fenster bedingen erhöhte Feuchtelasten im Raum, was in diesem Fall durch Zugrundelegung einer hohen Feuchtelast in die Berechnung eingeht. Für Wandmitte (nicht in Bild 4 dargestellt) ergibt sich zwar keine Pilzbildung. Wird hingegen, wie Bild 4 oben zeigt, ein verringerter innerer Wärmeübergangskoeffizient von $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, beispielsweise für Putzbereiche hinter Gardinen, zugrunde gelegt, kommt es im Fall F zu mikrobieller Aktivität. Die Bewertung des Einflusses eines Möbelstücks an einer schlecht gedämmten Außenwand bei geringer Feuchtelast wird in Fall G vorgenommen. Wie in Bild 4 unten dargestellt, ergeben sich hierbei nur im Dezember kritische Zustände. Es kommt zu Pilzbildung. Im Februar wird bei geringer Feuchtelast im Raum kein erhöhter Wassergehalt in den Sporen mehr erreicht. Zusammenfassend können die Ergebnisse so interpretiert werden, daß als hauptsächliche Maßnahme zur Verhinderung einer Schimmelpilzbildung eine gute Dämmung, als zweite eine vor allem bei tiefen Außenlufttemperaturen ausreichende Lüftung und nur für schlecht gedämmte Baukonstruktionen (z.B. im Altbau) darüber hinaus das Wegrücken der Schränke von den Außenwänden sicherzustellen sind.

4.2 Wohnanlage mit außenseitigem Schimmelbefall

An den Außenfassaden einer Wohnanlage, die im Sommer bis Herbst fertiggestellt wurden, zeigte sich nach kurzer Zeit ein sichtbarer biologischer Bewuchs. Wie in [5] beschrieben, war vor allem im Bereich des Fenstersturzes ein flächiger Schimmelpilzbefall zu erkennen (deutliche Verfärbung). Die Fensterstürze sind, nicht wie im übrigen Wandbereich, mit Polystyrol-Hartschaum, sondern mit Mineralwolle gedämmt worden. In den Wandflächen in Wandmitte treten vorwiegend kreisförmige Befallsmuster auf. An diesen Stellen wurden Bohrkernproben gezogen. Dabei zeigte sich, daß die Dämmstoffplatten aus Polystyrol-Hartschaum nicht auf Stoß verlegt wurden, sondern daß zwischen ihnen ein Spalt von etwa drei Millimetern vorhanden ist. Dieser Spalt ist durchgängig bis auf den darunterliegenden Beton. Der kreisförmige Pilzbefall befindet sich etwa im Bereich des Stoßkreuzes von vier Dämmstoffplatten. In diesem Fall wird ein Befeuchtungsmechanismus wirksam, der im Zusammenhang mit der Frostschadensgefahr bereits analysiert und dokumentiert wurde („Diffusionsbefeuchtung“ [6]). Diese Diffusionsbefeuchtung hängt unmittelbar mit der hohen Wasserdampfdurchlässigkeit der Mineralwolledämmung bzw. mit den

Fehlstellen (Luftspalte zwischen den Dämmplatten) zusammen. Da der Feuchtetransport vom Raum nach außen bei feuchtem Mauerwerk bzw. Beton in der kalten Jahreszeit ständig erfolgt, nicht nur zeitweilig wie bei nächtlicher Tauwasserbildung oder infolge Beregnung, ist es verständlich, daß der biologische Aufwuchs relativ frühzeitig in Erscheinung getreten ist. Um den zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung wesentlichen Feuchtehaushalt im Bereich der Fensterstürze sowie des Luftspaltes zwischen den Dämmplatten näher zu untersuchen, werden mit dem Programm WUFI zweidimensionale hygrothermische Berechnungen durchgeführt.

In Bild 5 ist für das erste Jahr der Verlauf der Temperatur (oben) und der relativen Feuchte im Außenputz (Mitte) an der Stelle des Plattenstoßes (gestrichelte Linie) und des Fenstersturzes (gepunktete Linie) im Vergleich zum Putz im ungestörten Bereich, also in Wandmitte (punkt-gestrichelte Linie) dargestellt. Außer im Zeitraum von Ende November bis Mitte Januar unterscheiden sich die Verläufe in den beiden unterschiedlichen Stellen wesentlich. Während am Putz (Substratklasse II) die relative Feuchte in Wandmitte ab diesem Zeitpunkt aufgrund der steigenden Außenluft- und damit der Putztemperaturen (Bild oben) sinkt, bleibt sie an der Fehlstelle (Plattenstoß) bis etwa Mitte Juli bei annähernd 90 %. Im Bereich des Fenstersturzes ergeben sich noch höhere Feuchten [5]. Nimmt man diese Klimadaten als Randbedingungen für Berechnungen mit dem biohygrothermischen Modell, so ist in Bild 5 unten zu erkennen, daß die Wassergehalte in den sich auf dem Putz befindlichen Modellsporen im Zeitraum von Mitte November bis Mitte Januar ebenfalls etwa gleich verlaufen, sich sonst aber in Wandmitte geringere Werte ergeben. Die starken Schwankungen im Verlauf des Grenzwassergehalts liegen an den großen Temperaturänderungen an einer Außenfassade. Die Maxima der Grenzwassergehalte bei Temperaturen etwa 0 °C entsprechen der „freien Wassersättigung“ der Spore und liegen temperaturunabhängig bei etwa 92 Vol.-%.

Der Wassergehalt in den Sporen in Wandmitte liegt, abgesehen von den Anfangswerten der ersten zwei Wochen nach Fertigstellung, stets unter dem Grenzwassergehalt. Das bedeutet, daß in Wandmitte kein Pilzwachstum auftreten sollte, was auch mit den Beobachtungen am Objekt und Erfahrungen aus der Praxis übereinstimmt. Anders bei den Putzen im Bereich des Fenstersturzes und bei den Fehlstellen an den Plattenstoßen. Im Bereich des Fenstersturzes wird der Grenzwassergehalt in den ersten sechs Wochen nach Baufertigstellung und ab April überschritten. Wie auch am Objekt beobachtet, ergibt sich bereits im Frühjahr ein großflächiger Pilzbewuchs. Beim Plattenstoß ergeben sich etwas geringere Überschreitungen des Grenzwassergehaltes, was zu einem etwas geringeren Befall führt.

Um festzustellen, nach welchem Zeitraum die hygrothermischen Verhältnisse keine Pilzbildung mehr zulassen, soll mit dem biohygrothermischen Modell auch ermittelt werden, wie sich die Austrocknung der Baufeuchte auf die mikrobielle Aktivität

auswirkt. Dazu werden die Temperatur- und Feuchteverläufe über einen Zeitraum von 8 Jahren berechnet. Das Testreferenzjahr wird dabei mehrfach durchlaufen. Im zweiten Jahr trocknet die Feuchte im Bereich des Fenstersturzes gegen Ende des Sommers aus, so daß dann auch dort mit keinem Pilzbefall mehr gerechnet werden muß (Bild 6 oben). Der über den Plattenstoß hinweggezogene Putz benötigt für den gleichen Austrocknungsprozeß etwa 8 Jahre, wie Bild 6 unten zeigt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, daß sich im ungestörten Bereich (ohne Plattenstöße) nach spätestens einem Jahr keine biohygrothermisch kritischen Zustände auf der Fassade einstellen. Dies bedeutet, daß ggf. ein Biozid so ausgelegt werden kann, daß es nur im ersten Jahr wirksam sein muß. Relativierend sei darauf hingewiesen, daß der Einfluß langwelliger Abstrahlung, welcher bei Wärmedämmverbundsystemen zu nächtlicher Unterkühlung und ggf. zu mikrobiellem Wachstum führen kann, bei diesen Berechnungen nicht berücksichtigt wurde und später untersucht werden sollte.

4. Literatur

- [1] Sedlbauer, K.: *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Wird demnächst veröffentlicht.
- [2] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Universität Stuttgart. (1994).
- [3] Krus, M., Künzel, H.M.: *Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden*. Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- [4] Rudolphi, A.; Kirchner, D.: *Ökologische und gesundheitsorientierte Baustoff- und Konstruktionsauswahl*. Moriske, H.-J.; Turouski, E. (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (2000), 3. Erg. Lfg., Kap. IV-7.1, S. 12 - 24.
- [5] Krus, M.: *Bauphysikalische Untersuchungen zum biologischen Befall der Wohnanlage McNair, Berlin-Steglitz*. IBP-Bericht HTB-04/2001 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (2001).
- [6] Künzel, H. M.: *Austrocknung von Wandkonstruktionen mit Wärmedämm-Verbundsystemen*. Bauphysik 20 (1998), H.1, S. 18-23.
- [7] 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.

Tabelle 1 Fall-Varianten zur Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung an einer verputzten monolithischen Außenwand aus Mauerwerk.

Fall	Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks ¹⁾	Feuchtelast ²⁾	Situation	Wärmeübergangskoeffizient	Schimmelpilzbildung
	W/(m K)			W/(m ² K)	
A	0,2	normal (40 % - 60 %)	unverstellte Wand	8	nein
B	0,6				
C	0,2		Schränk	2	
D	0,6				
E	0,2	hoch (50 - 60 %)	unverstellte Wand	8	nein
F	0,6		Gardine	4	ja
G			gering (30 - 60 %)	Schränk	

1) Angegeben wird die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand.

2) Die Angabe in Klammern benennt den Mittelwert und die Schwankung der relativen Feuchte im Jahresverlauf.

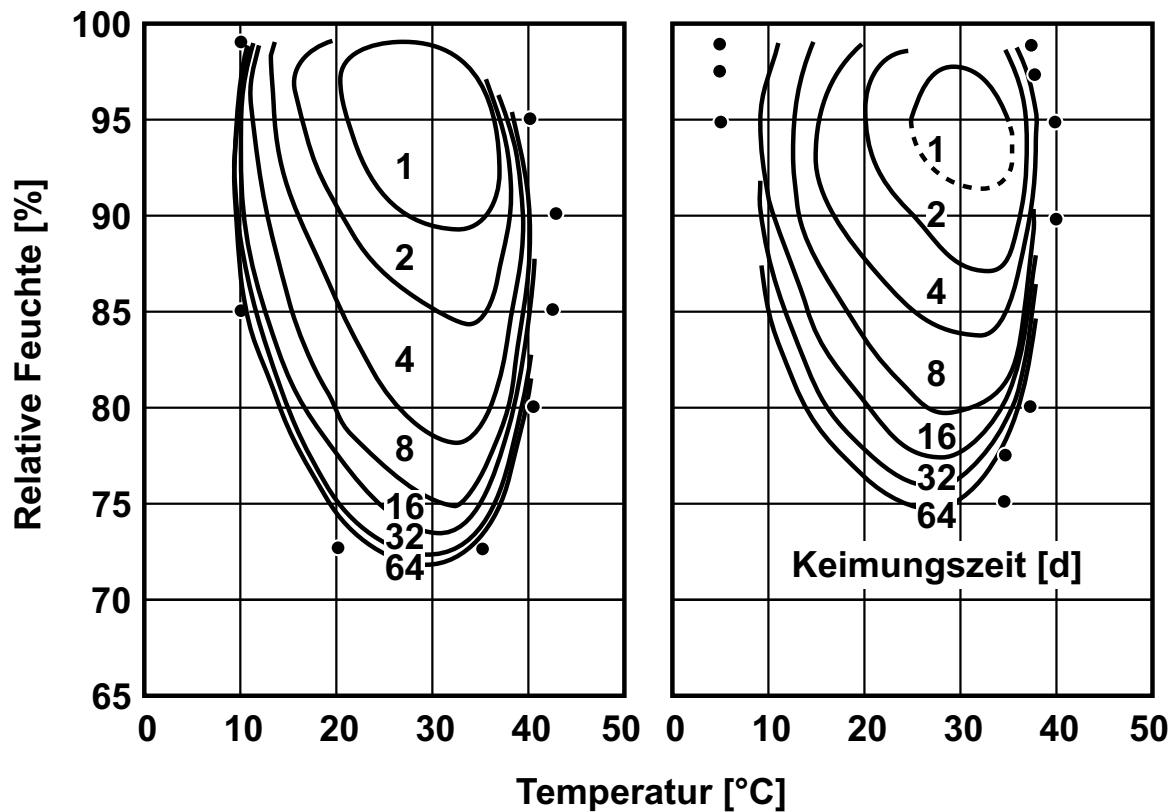


Bild 1 Isoplethensysteme für Sporenauskeimung der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) nach Smith [7].

Die Isolinien geben in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte die Keimungszeiten in Tagen an (eingetragene Zahlenwerte). Die Punkte zeigen Bedingungen, bei denen nach 95 Tagen noch keine Keimung stattgefunden hatte.

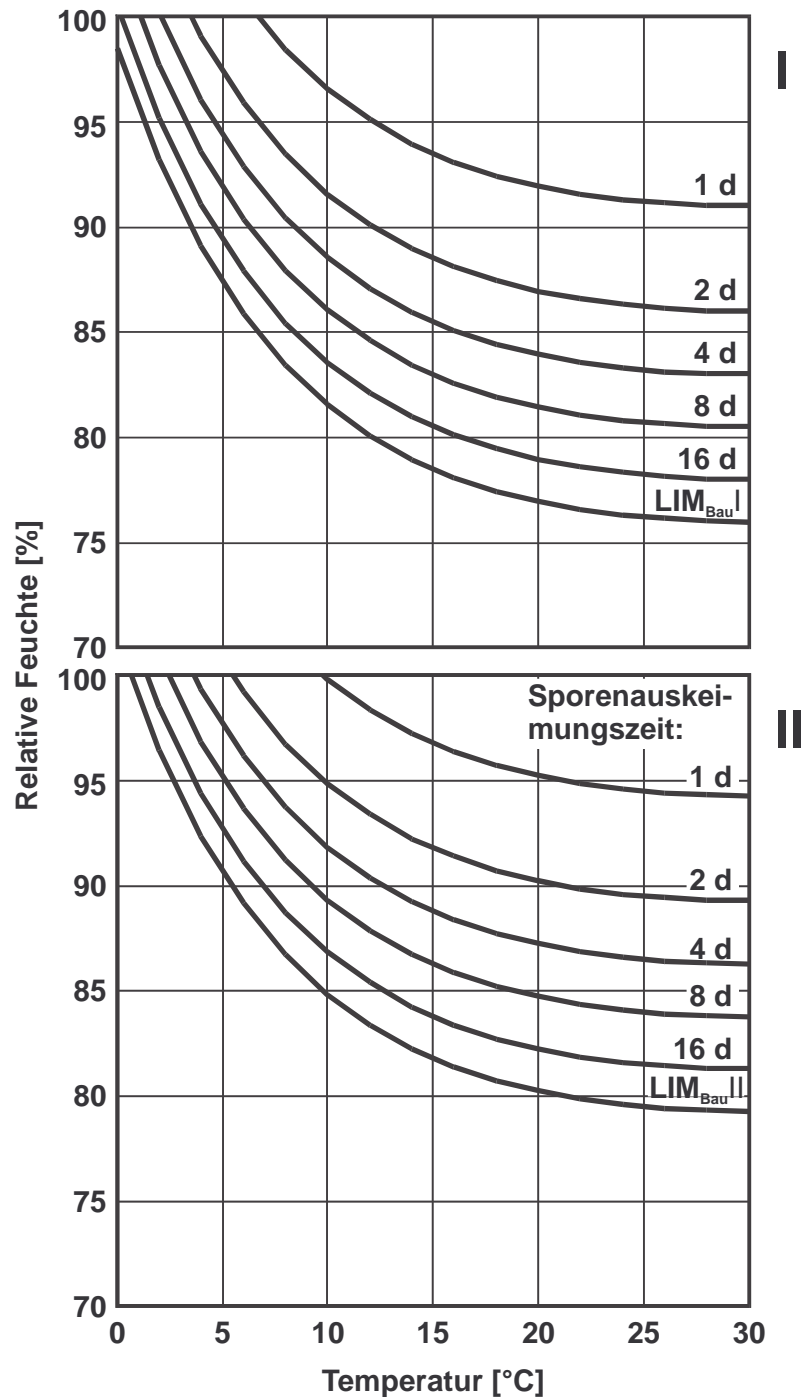


Bild 2 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung, das für alle Pilze der Substratgruppe I (Bild oben) und II (Bild unten) gilt.

Die Angaben in Tagen bedeuten Sporenauskeimungszeiten. Unterhalb des LIM_{Bau} ist auf Baustoffen der entsprechenden Gruppe mit keiner biologischen Aktivität zu rechnen.

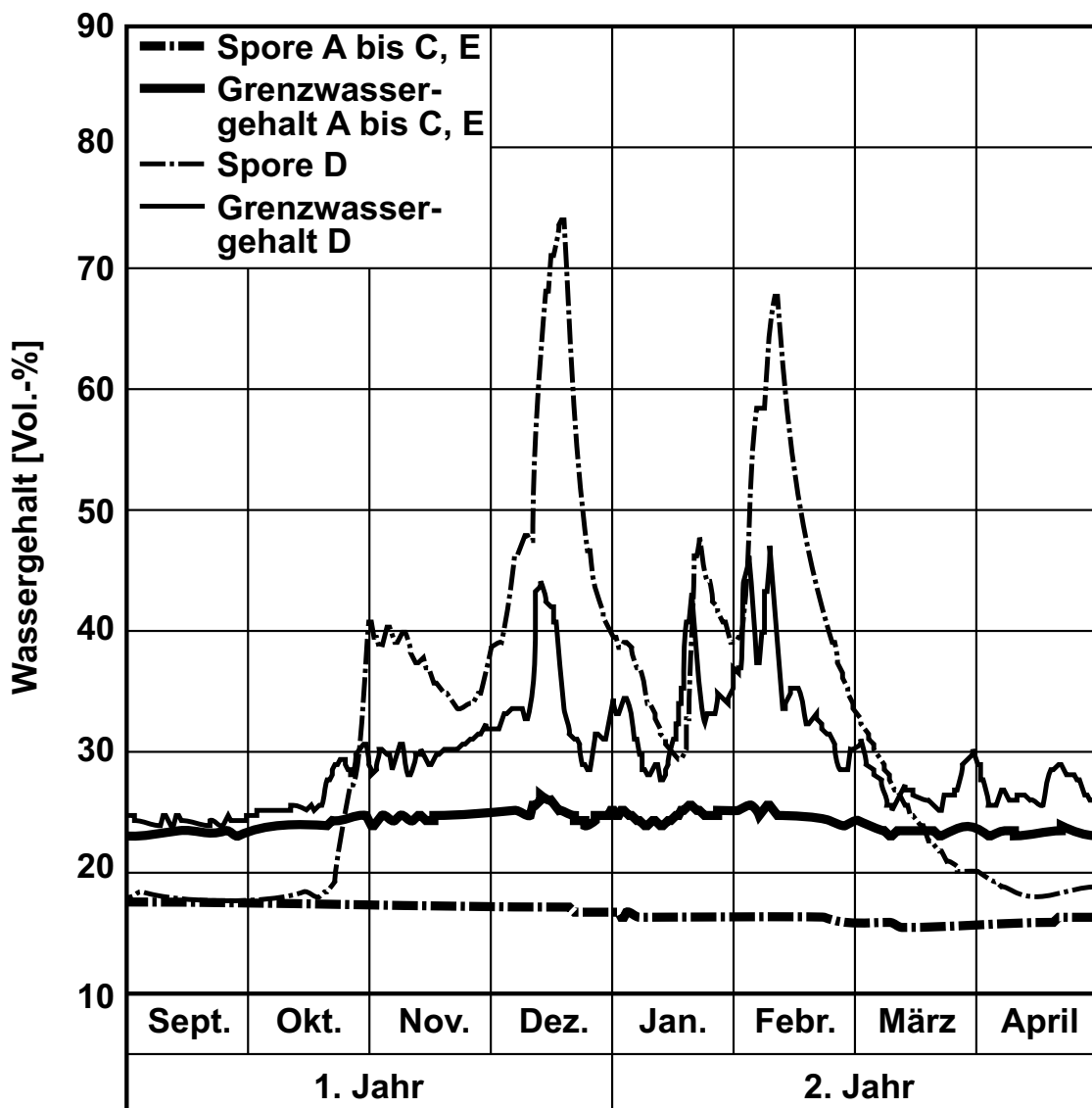


Bild 3 Zeitliche Verläufe der Wassergehalte in den Sporen.

Dargestellt sind die mit dem biohygrothermischen Modell berechneten Wassergehalte der sich auf den Wandoberflächen aus Putz befindlichen Sporen für die Fälle A bis E aus Tabelle 1. Die Verläufe des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, sind jeweils mit durchgezogenen Linien dargestellt.

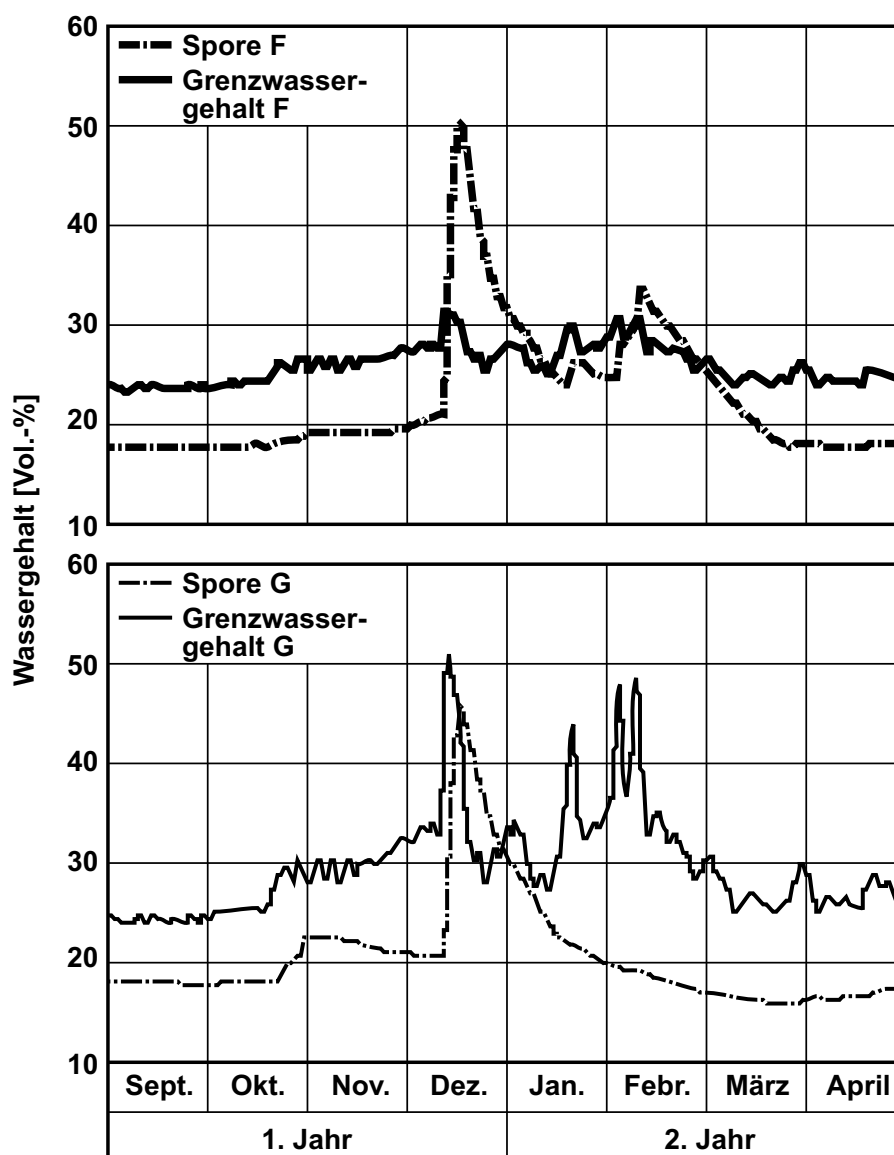


Bild 4 Zeitliche Verläufe der Wassergehalte in den Sporen für die Fälle F (oben) und G (unten).

Dargestellt sind die mit dem biohygrothermischen Modell berechneten Wassergehalte der sich auf den Wandoberflächen aus Putz befindlichen Sporen für die Fälle F (oben) und G (unten) aus Tabelle 1. Die Verläufe des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, sind jeweils mit durchgezogenen Linien dargestellt.

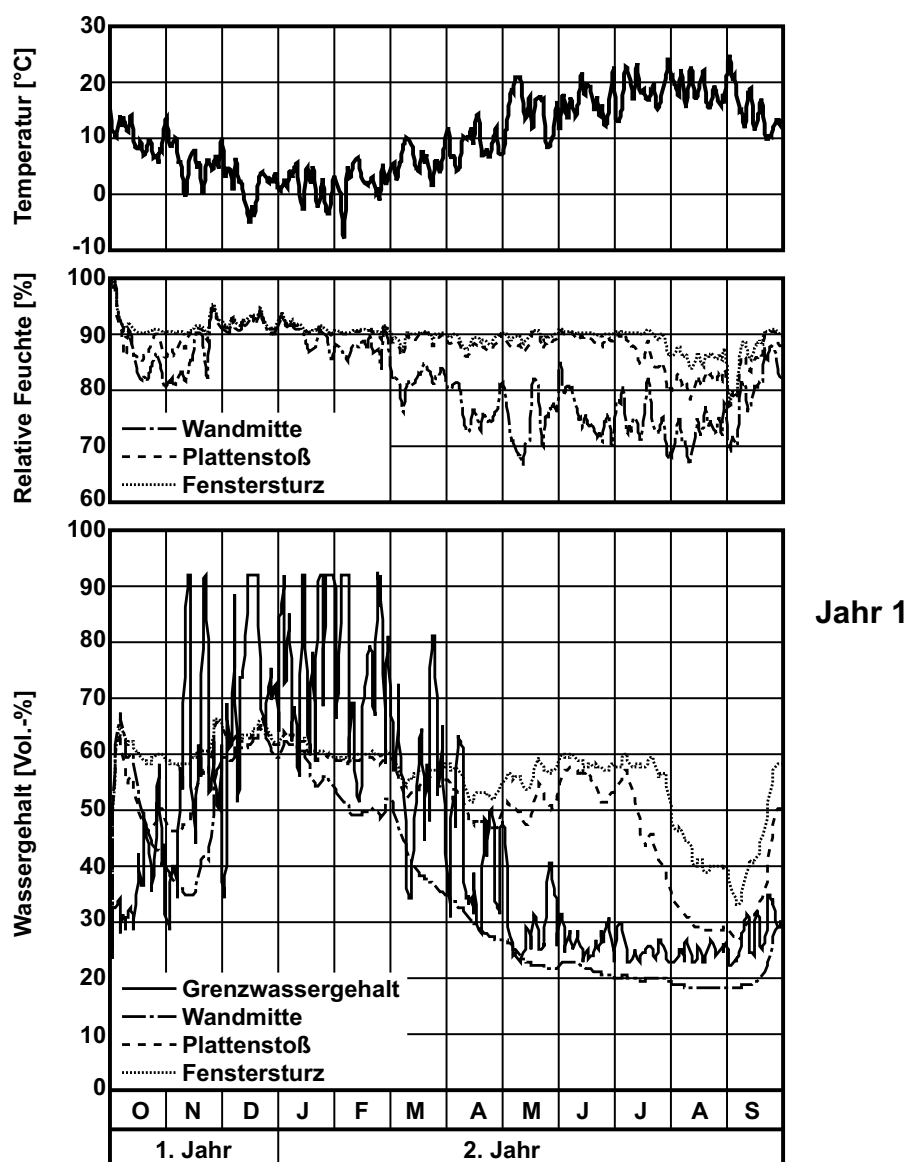


Bild 5 Berechnete Zeitverläufe von Temperatur (oben) und relativer Feuchte (Mitte) sowie des Sporen-Wassergehaltes (unten) an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.

Wandaufbau: WDVS auf Beton als Wandbildner

Untersuchte Stellen:

Ungestörter Bereich: kein Schimmelpilzbefall

Plattenstoß (WDVS): Schimmelpilzbefall

Fenstersturz: Schimmelpilzbefall.

Im unteren Bild ist der Verlauf des Grenzwassergehaltes mit eingezeichnet; er gilt für alle Wandstellen und zeigt, ab wann Sporenkeimung einsetzt.

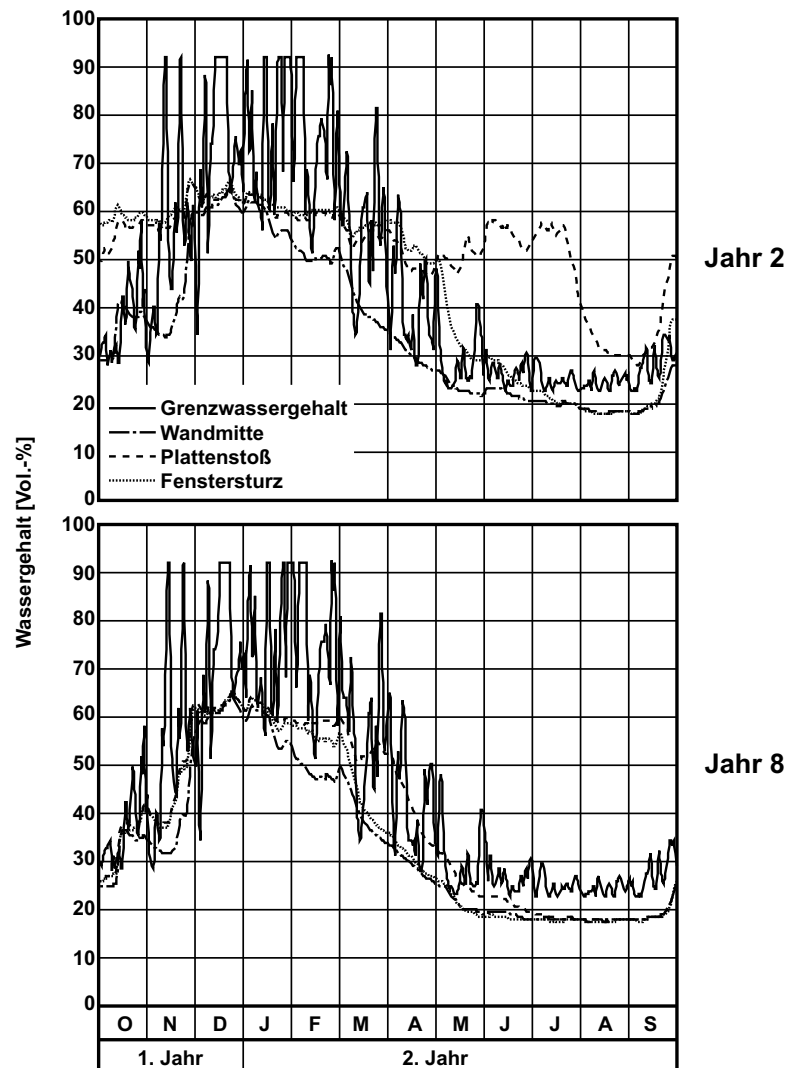


Bild 6 Berechnete Zeitverläufe des Sporen-Wassergehaltes an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.

Oben: 2. Untersuchungsjahr.

Unten: 8. Untersuchungsjahr.

Wandaufbau: WDVS auf Beton als Wandbildner

Untersuchte Stellen:

- Ungestörter Bereich
- Plattenstoß (WDVS)
- Fenstersturz.

Im unteren Bild ist der Verlauf des Grenzwassergehaltes mit eingezeichnet; er gilt für alle Wandstellen und zeigt, ab wann Sporenkeimung einsetzt.