

Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen.

Von der Fakultät
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer
aus Tegernsee

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc.techn. h.c.
Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Karl Gertis

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl-Heinz Engesser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl

Tag der mündlichen Prüfung: 3. August 2001

Lehrstuhl für Bauphysik

2001

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Sie wurde teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Bauphysik der Außenwände“ als Projekt „Analyse und Prognose der hygienischen Zustände und Wartungsnotwendigkeiten in Außenwänden mit offenen Luftkreisläufen bei hybriden Heizsystemen“ und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie als Projekt „Energetische Sanierung der Bausubstanz. Hygrothermische Gebäudesimulation zur energetisch und feuchtetechnisch optimierten Sanierung“.

Für die Betreuung und für die vielen fachlichen Anregungen, die maßgeblich zur Abrundung dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc.techn. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. K. Gertis bedanken. Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. K.-H. Engesser und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Kießl, die durch ihre Mitbetreuung und die stetige Diskussionsbereitschaft wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Für die vielfältigen Ratschläge und das Korrekturlesen möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. M. Krus, Herrn Dr. rer. nat. K. Breuer und Herrn Dipl.-Ing. (FH) W. Zillig sowie allen Mitarbeitern des Instituts bedanken. Für das sorgfältige und gewissenhafte Erstellen vieler Graphiken sowie das Schreiben des Manuskriptes sei Frau I. Haug, Frau M. Westner bzw. Frau F. Kemmetter ganz herzlich gedankt. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, vor allem bei meiner Frau Monika, bedanken, die mich durch ihr Verständnis und ihre tatkräftige Hilfe unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Klaus Sedlbauer
 Geboren: 11. Dezember 1965 in Tegernsee
 Eltern: Fritz Sedlbauer
 Hilde Sedlbauer, geb. Streidl
 Familienstand: verheiratet seit 1991 mit Monika Sedlbauer, geb. Wölzlmüller
 Kinder: Johanna und Benedikt Sedlbauer

Ausbildung

9/1972 – 6/1976 Grundschule Holzkirchen
 9/1976 – 6/1985 Gymnasium Miesbach
 7/1985 – 9/1986 Wehrdienst
 11/1986 – 3/1992 Studium der Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München
 Abschluß: Diplom

Beruflicher Werdegang

3/1992 – 8/1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in
 Holzkirchen und Stuttgart
 9/1994 – 8/1997 Gruppenleiter am IBP in Stuttgart
 8/1997 – 12/1999 Gruppenleiter am IBP in Holzkirchen
 seit 1/2000 stv. Abteilungsleiter am IBP in Holzkirchen
 seit 10/2000 stv. Institutsleiter (komm.) am IBP in Holzkirchen
 10/1999 – 9/2000 Lehrbeauftragter für das Fach Bauphysik an der Fachhochschule München
 seit 10/2000 Lehrbeauftragter für das Fach Bauphysik an der Technischen Universität München

Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite
Vorwort aus dem Alten Testament	3	3.3.1 Isoplethenmodell	54
Glossar zu Fachbegriffen	4	3.3.2 Instationäres biohygrothermisches Modell	63
Verzeichnis der Formelzeichen	5	3.4 Sicherheitsannahmen	67
Verzeichnis der Abkürzungen	6	4. Umsetzung in ein Rechenverfahren	67
Zusammenfassung in englischer Sprache (Abstract)	6	4.1 Verfahrensstruktur und Vorgehensweise	67
1. Hintergrund und Zielsetzung	10	4.2 Instationäre hygrothermische Wachstumsbedingungen	68
2. Auswertung der Literatur	12	4.3 Funktionsweise des Isoplethenmodells	69
2.1 Schimmelpilze	12	4.4 Funktionsweise des biohygrothermischen Modells	70
2.1.1 Übersicht	12	5. Validierung des entwickelten Verfahrens	71
2.1.2 Schimmelpilze im Bau	18	5.1 Plausibilitätsbetrachtungen	71
2.1.3 Gesundheitsgefährdung	19	5.2 Laborversuche	73
2.1.4 Wachstumsvoraussetzungen	21	5.3 Freilanduntersuchungen	74
2.1.5 Sporenkeimung, Myzelwachstum und Sporulation	31	5.4 Erhebungen in genutzten Objekten	75
2.1.6 Wesentliche Ursachen für Schimmelpilze in Gebäuden	39	5.5 Vergleich mit Literaturangaben	78
2.2 Hygrothermische Berechnungsverfahren	41	5.6 Sensitivitätsanalyse	80
2.2.1 Grundlagen und Softwaretool	42	6. Bewertung des entwickelten Verfahrens	83
2.2.2 Erforderliche Eingabedaten	43	6.1 Neue Ansätze und Funktionsmerkmale	83
2.3 Bestehende Normvorgaben und technische Regeln	44	6.2 Einschränkungen des Modells	84
2.4 Vorhandene Schimmelpilzvorhersagemodelle	48	6.3 Weiterer Untersuchungsbedarf	85
3. Neue Ansätze zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung	52	7. Anwendungsbeispiele	86
3.1 Auswahl von Schimmelpilzen und Einteilung in Gefährdungsklassen	52	7.1 Wandinnenoberflächen	86
3.2 Einflußfaktoren und Bewertung	53	7.2 Wärmebrücke am Fenster	89
3.3 Neue rechnerische Methode	54	7.3 Unbelüftete Satteldächer	90
		7.4 WDVS-Fassade	90
		7.5 Lüftungssysteme mit offenen Luftkreisläufen	92
		8. Schlußfolgerungen	95
		9. Zusammenfassung	97
		10. Literaturverzeichnis	100

Vorwort aus dem Alten Testament [8]

Weisungen für die Priester: Aussatz an Häusern

³³Dann sprach der Herr zu Moses und Aaron:

³⁴„Wenn ihr nun in das Land Kanaan kommt, das ich euch zu eigen geben will, und ich lasse an einem Haus in eurem eigenen Lande einen Befall von Aussatz zu, ³⁵so muß der Eigentümer des Hauses hingehen und dem Priester melden: 'Wie von Aussatz befallen erscheint mir das Haus.' ³⁶Dann ordne der Priester an, daß man das Haus räume, bevor er kommt, den Fall zu besichtigen. ³⁷Wenn er nun den Befall besichtigt und dabei findet, der Befall an den Wänden des Hauses zeige sich in Gestalt grünlicher und rötlicher Grübchen, die tiefer zu liegen scheinen als die Wandfläche, ³⁸dann gehe der Priester aus dem Haus heraus an dessen Eingang und schließe es für sieben Tage ab. ³⁹Am siebten Tage komme der Priester wieder, und wenn er bei der Besichtigung findet, daß der Befall an den Wänden des Hauses sich ausgebreitet hat, ⁴⁰so ordne er an, daß man die betreffenden Steine herausreißt und sie vor der Stadt an einen unreinen Ort werfe. ⁴¹Das Haus

aber soll man ringsum im Inneren abkratzen und den abgekratzten Schmutz draußen vor der Stadt an einen unreinen Ort schütten. ⁴²Dann nehme man andere Steine und setze sie an Stelle der ausgebrochenen, ebenso anderen Lehm und streiche damit das Haus. ⁴³Wenn nun der Aussatz von neuem auftritt, nachdem man die Steine ausgebrochen, das Haus abgekratzt und neu gestrichen hat, ⁴⁴gehe der Priester hinein, besichtige es, und wenn sich der Aussatz im Hause ausgebreitet hat, dann ist es ein bössartiger Aussatz; es ist unrein. ⁴⁵Man soll das Haus abbrechen, seine Steine, seine Balken und den ganzen Lehmewurf des Hauses, und alles an einen unreinen Ort außerhalb der Siedlung bringen. ⁴⁶Wer das Haus während der ganzen Zeit, für die er es verschlossen hatte, betritt, ist unrein bis zum Abend. ⁴⁷Wer in dem Haus schläft, wasche seine Kleider; wer darin ißt, wasche ebenfalls seine Kleider. ⁴⁸Wenn aber der Priester kommt und bei der Besichtigung findet, daß der Aussatz sich im Hause nicht weiter ausgebreitet hat, nachdem das Haus von neuem gestrichen wurde, so erkläre er das Haus für rein; denn der Aussatz ist geheilt“.

Glossar zu Fachbegriffen

Aerob/anaerob

Biologische Prozesse, die in Anwesenheit/Abwesenheit von Sauerstoff stattfinden.

Allergie

Eine von der Norm abweichende, gesteigerte Antwort des Immunsystems im Sinne einer krankmachenden Überempfindlichkeit; wird hervorgerufen durch Kontakt des Organismus mit einem Allergen.

(Alternaria) sp.

sp. als Abkürzung bedeutet, daß alle Spezies aus des jeweiligen Pilzgenus gemeint sind.

Anamorph

Asexuelle Fruchtkörper, Nebenfruchtform.

Ascomycetes (Schlauchpilze)

Klasse der Pilze, die Sporen in Schläuchen oder rundlichen Behältern (Asci) bilden (z.B. Trüffel).

Basidiomycetes

Ständerpilze (Faunpilze), formenreiche Klasse der höheren Pilze; oft reiche Sporenbildung an besonderen Trägern (Basidien) (z.B. Blätterpilze, Röhrenpilze, „Bauchpilze“, deren geschlossene Fruchtkörper sich erst nach der Sporenreife öffnen: z.B. Boviste).

Biofouling

Auftreten von mikrobiellem (Schleim-)Belag auf Werkstoffoberflächen mit der Folge von chemisch-physikalischen Wirkungen, wie z.B. Veränderungen des Diffusionsverhaltens.

Biokorrosion

Veränderung der Struktur und Stabilität eines Baustoffs durch Ausscheidung direkt korrosiv wirkender Stoffwechselprodukte, durch Verfärbungen biogener Pigmente, durch biogene Oxidation strukturbildender Kationen bis hin zum enzymatischen Abbau der betreffenden Materialien.

Cytoplasma

Das Cytoplasma ist die flüssige Grundsubstanz innerhalb der Zellmembran. Darin sind unterschiedlichste Stoffe enthalten: Ionen, Nährstoffe, Enzyme usw. Es ist Reaktionsort für unzählige Stoffwechselreaktionen und Transportmedium für viele Stoffe in der Zelle.

Deuteromycetes (Fungi imperfecti)

Unvollkommene Pilze. Ascomycetes (Schlauchpilze), von denen nur Nebenfruchtformen mit Konidien als Fortpflanzungszellen, also kein vollständiger Entwicklungsgang, bekannt sind (z.B. Fusarium Arten).

Feuchtespeicherfunktion

Funktionaler Zusammenhang zwischen anliegender relativer Feuchte und dem sich in einem porösen Baustoff im Gleichgewicht einstellenden Wassergehalt; wird im biohygrothermischen Modell zur Charakterisierung der Feuchtespeicherfähigkeit des Inneren von Schimmelpilzsporen verwendet.

Gefährdungsklasse

Einteilung der Pilze in Klassen je nach deren Gesundheitsgefährdung.

Hydrophil

Wasserliebend oder im Wasser lebend.

Hyphe

Einzelner fädiger Abschnitt aus dem Vegetationskörper der Pilze.

Isoplethen

Linien gleicher Sporenauskeimungszeit oder gleichen Wachstums.

Isoplethensystem

Auskeimungszeit und Wachstumsraten in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur.

Koloniebildende Einheiten (KBE)

Maßeinheit für Sporenkonzentration pro Volumen.

Keimschlauch

Aus der Spore wachsende Ausstülpung, durchbricht die Sporenwand.

Konidien/Konidiosporen

Ungeschlechtlich entstandene, charakteristische Verbreitungsorgane (Sporen) höherer Pilze.

Letal

Zum Tode führend (z.B. bestimmte Mengen von Giften).

LIM

Lowest Isopleth for Mould: Temperaturabhängig niedrigste relative Feuchte, unter der keine Pilzaktivität (Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum) erwartet wird; für alle Pilze einer Gefährdungsklasse geltend.

LIM_{Bau}

Lowest Isopleth for Mould für einzelne Substratgruppen.

Mesophil

Mittleren Wärmebereich liebend.

Metabolismus

Stoffwechsel; Umwandlung chemischer Substanzen im Organismus in Stoffwechselprodukte.

Morphologisch

Die äußere Gestalt betreffend.

Mykologie

Pilzkunde.

Mykosen

Parasitischer Befall des menschlichen Körpers mit Pilzen.

Mykotoxikosen

Durch Schimmelpilze hervorgerufene Vergiftung.

Myzel

Pilzgeflecht, Gesamtheit der Pilzfäden (Hyphen).

Microbial Volatile Organic Compounds (MVOC)

Flüchtige, organische Verbindungen (Alkohole, Ketone, Aldehyde, Terpene und aromatische Verbindungen), die von Mikroorganismen gebildet werden.

Pathogen

Krankheitserregend, krankmachend.

Pilzspore

Ungeschlechtliche Verbreitungseinheit.

Psychrophil

Kälteliebend.

s_d-Wert

Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke; wird im biohygrothermischen Modell verwendet zur Charakterisierung der Diffusionseigenschaft der Sporenwand von Schimmelpilzsporen.

Sporenauskeimungszeit

Zeitraum bis die Ausbildung des Keimschlauchs unter dem Mikroskop sichtbar wird.

Sporulation

Sporenbildung bzw. Aussendung der Sporen.

Substratgruppe

Einteilung der Substrate (Baustoffe, Verschmutzung) in unterschiedliche Gruppen, für die entsprechende Isoplethensysteme entwickelt wurden.

Verzeichnis der Formelzeichen**Lateinische Zeichen**

a, b	[-]	Umrechnungskoeffizienten
A _{Sp}	[m ²]	Sporenoberfläche
a _w	[-]	Wasseraktivität
dH/dϑ	[J/(m ³ K)]	differentielle Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffs
dM/dt	[-]	zeitabhängiger Mould-Index
d _{Sp}	[m]	Sporendurchmesser
D _{Spw}	[m]	Dicke der Sporenwand
dw/dϕ	[kg/m ³]	differentielle Feuchtespeicherfunktion des Baustoffs
D _ϕ	[kg/(ms)]	Flüssigleitkoeffizient des Baustoffs
f _R	[-]	dimensionsloses Temperaturdifferenzenverhältnis
g _v	[kg/(m ² s)]	Dampfdiffusionsstromdichte
g _w	[kg/(m ² s)]	Flüssigtransportstromdichte
H	[J/m ³]	Gesamtenthalpie
h _{i,e}	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient innen bzw. außen
h _v	[J/kg]	spezifische Verdunstungsenthalpie des Wassers
k _{1,2}	[-]	Korrekturfaktoren im Viitanen-Modell
MI	[-]	Mould-Index im Viitanen-Modell
p _{sat}	[Pa]	Sättigungsdampfdruck
q	[W/m ²]	Wärmestromdichte
R _{si}	[(m ² K)/W]	Wärmeübergangswiderstand innen
s _d -Wert	[m]	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
S _h	[W/m ³]	Wärmequelle oder -senke
S _w	[kg/(m ³ s)]	Feuchtequelle oder -senke
SQ	[-]	Oberflächenqualität (0 = nach Trocknung gesägt, 1 = kammergetrocknet; im Viitanen-Modell)
t	[h]	Zeit
t _m	[h]	Zeitdauer, bis zum Erreichen des Mould-Index 1 (im Viitanen-Modell)

Taxonomie

Einordnung der Lebewesen in ein Verwandtschaftssystem.

Time of Wetness (TOW)

Anzahl der Stunden hoher Feuchte pro Tag bezogen auf 24 Stunden.

Wasseraktivität

Für den Schimmelpilz frei verfügbares, also nicht chemisch gebundenes Wasser.

Xerophil

Trockenheitsliebend, trockenresistent.

Zygomycetes (Algenpilze/Jochpilze)

Niedrig organisierte Pilzklasse (z.B. Schimmel auf Brot).

t _v	[h]	Zeitdauer bis erstes Myzelwachstum mit dem Auge sichtbar wird (im Viitanen-Modell)
U	[W/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
V _{Sp}	[m ³]	Sporenvolumen
w	[kg/m ³]	Wassergehalt des Baustoffs
W	[-]	Holzart (0 = Kiefer, 1 = Fichte; im Viitanen-Modell)
dW/dt	[mm/d]	Myzelwachstumsrate

Griechische Zeichen

δ _p	[kg/(msPa)]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
ϑ	[°C]	Temperatur
ϑ _{Oi}	[°C]	Temperatur der Innenoberfläche
ϑ _{Li}	[°C]	Temperatur der Raumluft
ϑ _{La}	[°C]	Temperatur der Außenluft
Θ	[-]	dimensionsloses Temperaturdifferenzenverhältnis
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs
μ-Wert	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs
ϕ	[%]	relative Luftfeuchte oder relative Feuchte
ϕ _{krit}	[%]	relative Luftfeuchte, ab der Schimmelpilzwachstum auf den Holzproben möglich ist (im Viitanen-Modell)

Mathematische Symbole

d	Operator für vollständiges Differential
∂	Operator für partielles Differential
Δ	Differenzenoperator
∇	Nablaoperator

Verzeichnis der Abkürzungen

ATP	<u>A</u> denosin <u>t</u> riphosphat
BRI	<u>B</u> uilding <u>R</u> elated <u>I</u> llness
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung
DNA	<u>D</u> esoxyribo <u>n</u> ucleinsäure (- <u>a</u> cid)
EN	<u>E</u> uropäische <u>N</u> orm
ESP-r	<u>E</u> nvironmental <u>S</u> ystems <u>P</u> erformance <u>r</u> esearch
EWT	<u>E</u> rdreich/ <u>L</u> uft- <u>W</u> ärme <u>t</u> auscher
IBP	Fraunhofer-Institut für <u>B</u> auphysik
KBE	<u>K</u> olonie <u>b</u> ildende <u>E</u> inheiten
LGA	<u>L</u> andesgesundheits <u>a</u> mt
LIM	<u>L</u> owest <u>I</u> sopleth for <u>M</u> ould
LIM _{Bau}	Lowest Isopleth for Mould für Substratgruppen

MI	<u>M</u> ould- <u>I</u> ndex
MVOC	<u>M</u> icrobial <u>V</u> olatile <u>O</u> rganic <u>C</u> ompounds
M.-%	<u>M</u> asseprozent
PE	<u>P</u> oly <u>e</u> thylen
RNA	<u>R</u> ibo <u>n</u> ucleinsäure (- <u>a</u> cid)
SBS	<u>S</u> ick <u>B</u> uilding <u>S</u> yndrome
TOW	<u>T</u> ime of <u>W</u> etness
Vol.-%	<u>V</u> olumenprozent
WDVS	<u>W</u> ärmedämm <u>v</u> erbundsystem
WHO	<u>W</u> orld <u>H</u> ealth <u>O</u> rganisation
WSchV	<u>W</u> ärmes <u>c</u> hutz <u>v</u> erordnung
WUFI	<u>W</u> ärme- und <u>F</u> euchtetransport <u>i</u> nstationär (Berechnungsprogramm)

Zusammenfassung in englischer Sprache (Abstract)

Life on earth would not be conceivable without fungi, bacteria and other micro-organisms. These organisms are responsible for the fast decomposition of dead material, splitting it up into its components and thereby giving it a new access to a further life cycle. Therefore micro-organisms as fungi and bacteria are important components of our eco-system. In buildings, however, favourable growing conditions for mould fungi can also occur and cause fungus infestation. Despite the quality of house building having improved over the last decades, especially by measures aiming at the reduction of heat losses due to transmission and ventilation, the number of reports on building damages caused by micro-organisms, especially by mould fungi is still increasing. The "Third Report on Building Damages" by the Federal Government of Germany in 1996 estimated the costs resulting from mould fungi damages to amount to more than 200 million Euro per year. Different causes, as for example the critical combination of the airtight construction method with insufficient ventilation of the building are given as reasons for the recent increasing occurrence of mould fungi in dwellings. Whereas before the energy crisis in the 1970's regulating the temperature was mainly operated by opening the windows, today, because of energy saving reasons, airing is not done as frequently. Especially the unintentional ventilation due to leakages was reduced considerably. As a result the air humidity in rooms rises. Thereby mould fungi does not only occur on the inside

surface of external building components, but even inside of construction parts.

The danger for the occupants of dwellings lies in the settling and spreading of pathogens (disease causing agents) through micro-organisms. Therefore, consequent measures have to be taken to avoid health dangers that come from mould fungi on the surface of building components. For example, when selling a building in the USA proof has to be furnished guaranteeing that the dwelling is free of the mould fungus *Stachybotrys atra*. In comparison to health aspects, building damages caused by mould fungi – i.e. the destructive effect the fungi have on building materials, like bio-corrosion or bio-fouling – only is of minor importance. For that reason the scientific paper on hand does not deal with building damages nor with legal problems ever occurring in this context.

In order to avoid the mould fungus formation in buildings, a strategy has to be set up that focuses on the growth conditions for mould fungi and also considers the complex transient processes of building physics. The application of biocides is always accompanied by additional health risks, especially when used indoors, and moreover can prevent the formation of mould fungus only over a limited period of time. Moreover, biocides often have a very selective effect, so that other fungi or micro-organisms can spread instead. Besides a considerable limitation for the selection of biocides is to be expected within latest EU directives. A prerequisite for preventing mould fungus without the use of bio-

cides is the knowledge of the boundary conditions under which fungus growth takes place. In reference to the boundary conditions for the growth of fungus it turns out that the decisive parameters of influence like temperature, humidity and substrate have to be available over a certain period of time simultaneously in order to enable the formation of mould fungi.

The presently common valuation methods for the growth of mould fungi do not, or only indirectly, take into account the transient boundary conditions. Whereas in German publications mainly the relative humidity is given as only criterion for mould fungus formation, the relative humidity in dependence on the temperature is seen as a cause by international experts. These characteristics usually do not allow any greater differentiation regarding the influence of the substrate, i.e. of the building material or the degree of soiling. Therefore, the main focus of this scientific paper on hand is to develop a planning instrument from the point of view of an engineer that aims at predicting the formation of mould fungus. This instrument is provided for being used by building physicists or consulting offices acting in the field of the building sector. This is also the reason for the deliberately chosen simple approach employed in this interdisciplinary scientific paper. A Bio-hygrothermal procedure was developed that makes it possible to predict mould fungus formation and is based on the comparison of the three already mentioned biological prerequisites for the growth of mould fungi and the transient growth conditions occurring in buildings. This procedure consists of two consecutive predictive models, i.e. the Isopleth model and the transient Bio-hygrothermal model. The Isopleth model makes it possible to determine the germination time of the spores and the myzel growth on the basis of different Isopleth systems that also regard the influence of the substrate for predicting the formation of the mould fungus. The Isopleth system describes the hygrothermal prerequisites for the growth of the fungus. It consists of a boundary line that is dependent on the temperature and on the relative humidity regarding fungus activity, and of iso-lines that indicate spore germination time when spore germination is to be predicted, and stand for growth per time unit when the description of the myzel growth is concerned.

Significant differences exist among the various fungus species. Therefore, when developing common Isopleth systems only fungi were regarded that are dangerous to human health and also can be detected in buildings. Quantitative statements on the growth prerequisites temperature and humidity will be set up for these more than 150 species that fulfil both features, as far as they are given in literature. To further clarify the differentiation of the life phases of the mould fungi, the data for spore germination and myzel growth will be given separately. In order to differentiate the mould fungi according to the health dangers they may cause, the so called hazardous classes will be defined as follows:

- A. Fungus or its metabolic products are highly pathogen; they are not allowed to occur in used dwellings.
- B. Fungus is pathogen when exposed over a long period and may cause allergic reactions.
- C. Fungus is not dangerous to health, fungus formation however, may cause economic damage.

Classifying the fungi into three hazardous classes it occurs that the values of class C are only slightly different from that of class B. Therefore it is sufficient to differentiate within the Isopleth model only between the hazardous class A and a combined class B/C.

Within the Isopleth model the prerequisites for the growth of mould fungi in dependence of temperature and relative humidity are stated for the above mentioned hazardous classes at first for the optimal culture medium. The Isopleth systems were developed for assessing the spore germination as well as the growth of the myzels. They are based on measured biological data and also consider the growth prerequisites of all fungi of one hazardous class. The resulting lowest boundary lines of possible fungus activity are being called LIM (Lowest Isopleth for Mould).

In order to regard the influence of the substrate, that is the building materials or possible soiling, on the formation of mould fungus, Isopleth systems for four categories of substrats were suggested that could be derived from experimental examinations. For this purpose four categories of substrats were

determined and different building materials assigned:

Substrate category 0: Optimal culture medium

Substrate category I: Biologically recyclable building materials like wall paper, plaster cardboard, building materials made of biologically degradable raw materials, material for permanent elastic joints;

Substrate category II: Building materials with porous structure such as renderings, mineral building material, certain wood as well as insulation material not covered by I;

Substrate category III: Building materials that are neither degradable nor contain any nutrients.

An individual Isopleth system will only be set up for the categories 0, I and II, whereas in the building category 0 the Isopleth systems for optimal culture media are applied. For the substrate category III no Isopleth system is given since it can be assumed that formation of mould fungi is not possible without soiling. In case of considerable soiling, substrate category I always has to be assumed. The basic principle of the new method and of defining the building material categories is to assume a worst case scenario, therefore always being on the safe side in respect of preventing the formation of mould fungi. To what extent correcting the Isopleth systems for individual building material categories towards increased relative humidity can still be done with a clear conscience, has to be proved by further measurements.

Altogether, the following four Isopleth systems were developed for the spore germination and for the growth of the myzels individually. Every one of the systems is valid for a whole group of mould fungi and takes into account, next to optimal culture media, also building material:

a) Isopleth systems for the hazardous class B/C (LIM B/C): systems referring to optimal culture

medium. Therefore they provide the smallest prerequisites for the growth of fungi as far as relative humidity is concerned. They build up the limit for the growth of all species of fungi. This means that fungal growth for fungi of hazardous class A can also be excluded when the boundary conditions exclude the growth of fungi of hazardous class B/C.

- b) Isopleth systems for the hazardous class A (LIM A): analogous to a), but only valid for all fungi of the hazardous class A.
- c) Isopleth systems for the substrate category I (LIMBau I): valid for all mould fungi occurring in the building. In respect to the culture medium they do not refer to the optimal medium but to materials of category I,
- d) Isopleth systems for the substrate category II (LIMBauII): analogous to c), but only valid for all materials belonging to the substrate category II.

For transient boundary conditions of temperature and relative humidity, either spore germination time or the myzel growth can be determined with the help of these Isopleth systems. The assessment of spore germination on the basis of the Isopleth model has the disadvantage that an interim drying out of the fungi spores cannot be taken into account in case of occurring transient micro-climatic boundary conditions. Therefore in these cases, this process will more often predict the germination of spores than the Bio-hygrothermal model. In order to describe the mode of action for the fundamental means of influence on the germination of spores, i.e. the humidity available at certain temperatures, a new Bio-hygrothermal model was developed. This model makes it possible to calculate the humidity household of a spore in dependence of the transient boundary conditions, thus even to consider interim drying out of the fungus spores.

The Bio-hygrothermal model for predicting the germination of the spores is based on the fundamental idea that a fungus spore has a certain osmotic potential because of the salts, sugar and further substances inherent in the spores. With the help of this osmotic potential spores can absorb

water existing in the environment, i.e. in materials as well as in the air. This potential computationally is described by means of a moisture retention curve. A moisture retention curve for bacteria spores, found in literature, is used with slight modifications. The absorption of humidity through the spore septum is being described by a diffusion approach in the model. This simplification is justifiable because the humidity absorption always occurs isothermal, due to the small geometrical size of the mould fungus spore. Furthermore the spore septum receives a humidity-dependent s_d -value that is being iteratively adjusted by comparison of the calculated spore germination times with those given in the Isopleth systems.

The Bio-hygrothermal model assumes that humidity absorption first takes place by means of diffusion, until a certain humidity content inside the spore is reached that is needed for starting the metabolism. From this point on the fungus can regulate its metabolism, if necessary independent of the surrounding conditions. Nevertheless, the substantial regulation mechanism still remains generally unknown and therefore cannot be described in an exemplary manner nor in terms of physics. However, this is not necessary since it is being assumed in the model that the critical content of water (limit of water content) that makes biological activity only possible, must not be passed. This limit of water content is being fixed by the Isopleth systems for the spore germination as follows. Depending on the temperature, the lowest relative humidity at which the spore germination takes place can be read off the respective LIM-curves. With the help of the humidity store function assumed for the inside spore, the corresponding limit of water content can be calculated. Furthermore, the LIM-curves in the Isopleth systems of the appropriate categories of building materials have to be used when setting the limit of water content.

In order to consider possible influences of the substrate, the s_d -values of the spore septum were adjusted in that manner that the spore germination times measured in the Bio-hygrothermal model correspond with those taken from the Isopleth systems in the building material categories I and II. By adjusting the s_d -values of the spore septum as

well as by slightly raising the moisture retention curve in the upper humidity range, a model spore can be stated that is valid for all of the three building material categories.

In order to get the transient conditions for temperature and relative humidity occurring in buildings, different possibilities will be presented. In case no measured values are on hand, modern hygrothermal calculation methods (i.e. the programme WUFI) can be used that take into account all important physical effects when calculating the hygrothermal conditions in one and two-dimensional structures. The assessment of the spore germination will be done directly for the micro-climate on the surface. The hygrothermal conditions in 1 to 3 mm depth also should be referred to for the myzel growth. This can also be done in a very simple manner with the help of the WUFI programme. Three-dimensional structures can be assessed e.g. by using the appropriate calculation programmes, like finite-difference-programmes. The transient hygrothermal boundary conditions determined at the corresponding places on or within building components serve as input parameter for the Bio-hygrothermal model.

The Bio-hygrothermal process is being validated by observation of plausibility, sensitivity analyses as well as the comparison with the results of laboratory experiments, experiments of outdoor testing sites and measurements in occupied dwellings. In all cases great correspondence between the results of the predictive models and the measurements and observations in practice is being observed. Since the material parameters for the Bio-hygrothermal model are in some aspects only adjusted or could only be assumed from experiments with spore-forming bacteria, they will have to be furthermore supported by specially selected biological experiments. Comparing the Bio-hygrothermal model with previously standard guidelines, preventive strategies and other predictive methods, it is shown that the Bio-hygrothermal model is by far exceeding the state of the art. Furthermore, the developed procedure is being employed in various typical examples. Based on these, conclusions for the prevention of mould fungi are being drawn.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Ohne Pilze, Bakterien und anderen Mikroorganismen wäre ein Leben auf der Erde nicht vorstellbar. Sie sind u.a. dafür verantwortlich, daß abgestorbenes Material schnell zersetzt, in seine Einzelbestandteile aufgespalten und dem höheren Leben wieder zugänglich gemacht wird. Mikroorganismen wie Pilze und Bakterien stellen daher einen wichtigen Bestandteil in unserem Ökosystem dar. In einigen verfahrenstechnischen Anwendungen werden ihre Eigenschaften gezielt genutzt, so z.B. zur Abluftreinigung [27] mithilfe von Biofiltern oder Biowäschern sowie bei der Abwasserreinigung und der Sanierung belasteter Böden.

Bei für Schimmelpilze günstigen Wachstumsbedingungen kann es allerdings auch zu einem Befall in Gebäuden kommen (z.B. [54, 98]). Obgleich in den letzten Jahrzehnten die Ausführung unserer Häuser erheblich an Wert zugenommen hat, vor allem durch Maßnahmen, die eine Reduzierung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste zum Ziel hatten, häufen sich Berichte über Bauschäden durch Mikroorganismen, insbesondere durch Schimmelpilze (z.B. [99]). So beziffert der dritte Bauschadensbericht der Bundesregierung aus dem Jahr 1996 [26] die durch Schimmelpilzschäden hervorgerufenen Kosten auf etwas mehr als 200 Millionen Euro jährlich. Verschiedene Ursachen wie beispielsweise die kritische Kombination aus luftdichter Bauweise und ungenügendem Lüftungsverhalten werden meist als Gründe für das neuerliche Ansteigen der Schimmelpilzhäufigkeit in Wohnungen genannt. Während man vor der Energiekrise in den 70er Jahren die Temperaturregelung durch Fensteröffnen bewerkstelligte, wird heute aus Gründen der Energieeinsparung deutlich weniger gelüftet. Auch der vormals ungewollt auftretende Infiltrationsluftwechsel wurde wesentlich reduziert. Die Folge sind erhöhte Feuchtelasten in Wohnräumen. Dabei treten nicht nur auf Innenoberflächen von Außenbauteilen, sondern auch im Inneren von Konstruktionen Schimmelpilze auf (siehe z.B. [70]).

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. So wird z.B. in den USA beim Verkauf eines Gebäudes ein Zeugnis verlangt, in dem garantiert wird, daß im Haus der Schimmelpilz *Stachybotrys atra* nicht vorhanden ist. Im Vergleich zu den gesundheitlichen Aspekten spielen Bauschäden durch Schimmelpilze – damit ist hier eine baustoffzerstörende Wirkung der Pilze im Sinne der Biokorrosion oder des Biofouling gemeint [143] – eine eher untergeordnete Rolle. Daher wird in der vorliegenden Arbeit auf Bauschäden durch Schimmelpilze genauso wenig eingegangen wie auf rechtliche Fragen, die sich in diesem Zusammenhang immer wieder stellen (vgl. z.B. [56]).

Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung in Gebäuden muß eine bauphysikalische Verhinderungsstrategie im Vordergrund stehen, die von den Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen ausgeht und die komplexen bauphysikalischen 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. Darüber hinaus wirken Biozide häufig selektiv, so daß statt dessen andere Pilze oder Mikroorganismen Fuß fassen können. Außerdem ist im Rahmen einer neuen EU-Richtlinie eine deutliche Einschränkung bei der Auswahl von Bioziden zu erwarten. Voraussetzung für eine biozidfreie Verhinderung von Schimmelpilzen ist die genaue Kenntnis der Randbedingungen, unter denen mit Pilzwachstum gerechnet werden muß. Daher ist es Ziel dieser Arbeit, eine neuartige Methode zu entwickeln, zu validieren und an exemplarischen Beispielen anzuwenden, die eine Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis eines Vergleichs der Wachstumsvoraussetzungen mit den im Bau auftretenden hygrothermischen Wachstumsbedingungen ermöglicht. Bild 1 zeigt dazu die schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise. Das Wachstum und die Ausbreitung von Schimmelpilzen hängen in erster Linie von den klimatischen Randbedingungen an den Bauteiloberflächen sowie im Inneren der Konstruktionen ab. Die wichtigsten Parameter sind Temperatur, relative Feuchte sowie ein entsprechendes Substrat.

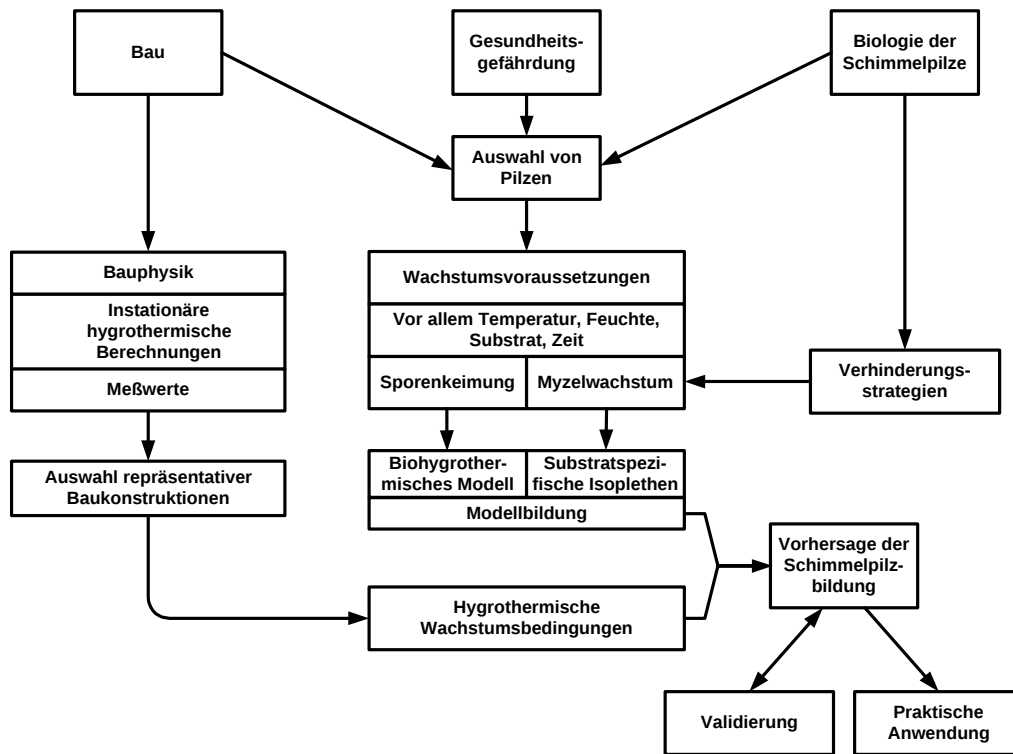


Bild 1 Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise bei der Entwicklung des biohygrothermischen Verfahrens.

Das Verfahren soll sich auf Pilze beschränken, die Schäden am Bau hervorrufen oder von denen eine Gefährdung der Gesundheit ausgeht. Im Isoplethenmodell-Teil werden auf Basis von substratspezifischen Isoplethensystemen die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum in Abhängigkeit von hygrothermischen Klimarandbedingungen bestimmt. Das biohygrothermische Teil-Modell beschreibt das Verhalten der Pilzsporen bis zur Auskeimung auf Basis einer physikalischen Modellierung der Schimmelpilzsporen. Nach Validierung der Vorhersagemodelle erfolgt die baupraktische Anwendung des Verfahrens.

Zielsetzung des neuen Vorhersageverfahrens ist es, ausgehend von den aus bauphysikalischen Messungen oder Berechnungen bekannten instationären hygrothermischen Zuständen sowie den Materialeigenschaften – im Sinne von Wachstumsbedingungen – Aussagen abzuleiten, bei welchen Randbedingungen eine Gefährdung durch Pilzbefall auftritt und bei welchen dies nicht passiert. Ferner sollte das Verfahren in der Lage sein, vergleichende qualitative Aussagen zu treffen, in welcher Weise im Falle einer Sporenauskeimung mit einem Fortschreiten des Pilzbefalls, d.h. Myzelwachstum, bei unterschiedlichen hygrothermischen Bedingungen zu rechnen ist.

In dieser Arbeit geht es also im Wesentlichen darum, aus der Sicht eines Ingenieurs ein Planungsinstrument zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung zu entwickeln, das von Bauphysikern und im Baubereich tätigen Beratungsbüros genutzt werden kann. Daher wird bewußt ein einfacher Ansatz gewählt.

Das Rechenprogramm WUFI [76] bietet als modernes hygrothermisches Berechnungsverfahren die Möglichkeit, für unterschiedliche Geometrien die instationären Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte an Bauteiloberflächen sowie im Inneren von Konstruktionen zu ermitteln. WUFI ist anhand umfangreicher Untersuchungen (z.B. [65] und [66]) auch experimentell gut validiert worden. Da das Programm WUFI für hygrothermische Berechnungen von Baustoffen und Bauteilen konzipiert wurde, können biologische Daten erst nach einer entsprechenden Aufbereitung verwendet werden. Dies bedeutet, daß in der vorliegenden Arbeit ein biologischer Modellteil (später Isoplethenmodell genannt) mit dem hygrothermischen Modellteil zu einem „biohygrothermischen Gesamtmodell“ vereint werden muß.

2. Auswertung der Literatur

Um die oben beschriebene Zielsetzung zu erreichen, ist es zunächst erforderlich, sich einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand im Bereich der Biologie von Schimmelpilzen zu verschaffen, die Wachstumsvoraussetzungen zu klären sowie die Ursachen für deren Auftreten in Gebäuden zu erörtern. Anschließend wird im Zuge der Literatursauswertung der Stand der Technik im Bereich hygromischer Berechnungsverfahren dargestellt sowie auf bisherige und aktuelle Normvorgaben bzw. Sicherheitskonzepte bzgl. Schimmelpilzbildung eingegangen.

2.1 Schimmelpilze

Um die Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen für das o.g. Vorhersagemodell aufbereiten zu können, sind die in Gebäuden vorkommenden Arten sowie davon ausgehende mögliche Gesundheitsgefährdungen systematisch zu analysieren.

2.1.1 Übersicht

Im Unterschied zu Algen und Flechten gedeihen Schimmelpilze auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen. Sie werden daher häufig als Erstkolonisierer bezeichnet. Um sich einen Eindruck von den geometrischen Abmessungen einer Pilzhyphe und einer -spore im Vergleich zu Bakterien und Zellen höherer Pflanzen zu verschaffen zu, zeigt Bild 2 die entsprechenden Größenunterschiede [116].



Bild 2 Schematische Darstellung der Größe einer Pilzhyphe (1), einer Pilzspore (2), Bakterien (3) und einer Zelle einer höheren Pflanze (4), nach [116].

Definition des Begriffes Schimmelpilze

Die umgangssprachliche Bezeichnung „Schimmel“ kommt aus dem Althochdeutschen und ist mit dem Wort „Schimmer“ verwandt [102]. Die Schimmelpilze sind im Wesentlichen durch folgende Kriterien definiert [102]:

- Schimmelpilze besitzen ein watteartiges Myzel,
- sie gedeihen auf festen Nährmedien,
- die Gewinnung der Nährstoffe geschieht durch Zersetzung abgestorbener organischer Substanzen,
- die Vermehrung erfolgt überwiegend ungeschlechtlich.

Damit ist eine genaue Klassifizierung im biologischen Sinn aber nicht möglich. Folglich finden sich Schimmelpilze in der biologischen Taxonomie in verschiedenen Klassen. Die Einteilung in Abteilungen, Klassen, Ordnungen usw. erfolgt hinsichtlich des morphologischen Aufbaus und anhand der Haupt- bzw. Nebenfruchtform (sexuelle und asexuelle Vermehrung) [40]. In Bild 3 ist die derzeit übliche Unterteilung der Pilze dargestellt [125]. Schimmelpilze finden sich in den folgenden Klassen:

- Zygomycetes (Jochpilze),
- Ascomycetes (Schlauchpilze) und
- Deuteromycetes (Fungi imperfecti).

An dieser Stelle sei auf ein Kuriosum hingewiesen, das, vor allem bei nicht biologisch ausgebildeten Sachverständigen, nicht selten zu Irrtümern führt: Da die sexuelle Vermehrung bei vielen Spezies nur unter besonderen Umgebungsbedingungen erfolgt, führt dies dazu, daß ein und derselbe Pilz unter zwei Bezeichnungen geführt werden kann. So wird ein vorkommender Pilz zum Beispiel bei Auftreten der Nebenfruchtform *Aspergillus repens* (Klasse Deuteromycetes) genannt, während er in der Hauptfruchtform unter dem Namen *Eurotium repens* (Klasse Ascomycetes) bekannt ist.

Oomycota bestehen nur aus einer Klasse, den Oomycetes. Eumycota lassen sich in fünf Klassen einteilen. Die 3 Klassen Zygomycetes (Jochpilze), Ascomycetes (Schlauchpilze) und Deuteromycetes (Fungi imperfecti) enthalten sogenannte Schimmelpilze.

	Substrat / Baustoffe																											
Schimmelpilze	Cellulose	Lignin	PVC	Mineralien	Naturstein, Beton	Tapete	Gipskartonplatten	Keramikfliesen	Kunststoff	Putz	Silikondichtmasse	Tap. mit Fungizid	Glaswolle	Farbe, Anstrich	Holz	Teppichboden	Textilien, Wolle	Leder	Hausstaub	Heu, Stroh	Papier	Spanplatten	Beschichtung außen	HF-Schaum	Siliziumgel	Fassaden	Faserplatten	Isoliermaterial
Ahsidia corvnhifera																												
Abs. glauca																												
Acrostalagmus sp.																												
Acremonium sp.																												
Acr. Cephalosporium																												
Acr. furcatum																												
Acr. strictum																												
Acr. obclavatum																												
Alternaria sp.																												
Alt. alternata																												
Aspergillus sp.																												
Asp. candidus																												
Asp. carbonarius																												
Asp. carneus																												
Asp. chevalieri																												
Asp. glaucus																												
Asp. fischeri																												
Asp. flavus																												
Asp. flavecipes																												
Asp. fumigatus																												
Asp. halophilus																												
Asp. nidulans																												
Asp. niger																												
Asp. ochraceus																												
Asp. parasiticus																												
Asp. penicilloides																												
Asp. repens																												
Asp. restrictus																												
Asp. steblatus																												

Fortsetzung Tabelle A

Schimmelpilze	Substrat / Baustoffe																		
	Cellulose	Lignin	PVC	Mineralien	Naturstein, Beton	Tapete	Gipskartonplatten	Keramikfliesen	Kunststoff	Putz	Silikonichtmasse	Tap. mit Fungizid	Glaswolle	Farbe, Anstrich	Holz	Teppichboden	Textilien, Wolle	Leder	Hausstaub
Rhizopus sp.																			
Rhi. stolonifer																			
Rhodotorula sp. (Hefe)																			
Scopulariopsis sp.																			
Sco. brevicaulis																			
Sco. brumptii																			
Sco. fusca																			
Sporobolomyces roseus																			
Sporotrichum sp.																			
Stachybotrys sp.																			
Sta. chartarum (atra)																			
Stemphylium sp.																			
Scytalidium circinatum																			
Scy. lignicola																			
Thamnidium sp.																			
Trichoderma sp.																			
Tri. harzianum																			
Tri. lignorum																			
Tri. viride																			
Trichothecium roseum																			
Tritirachium sp.																			
Ulocladium sp.																			
Ulo. atrum																			
Verticillium sp.																			
Wallemia sebi																			
Xeromyces																			

Tabelle 1 Zusammenstellung von im Bau vorgefundenen Schimmelpilzen. Mit genannt sind die von diversen Autoren und im Neuentwurf der DIN 4108 Schimmelpilze [21] als repräsentativ für das Auftreten im Bau angesehenen Pilzspezies. Ferner werden Angaben gemacht zur Bewertung der Gesundheitsgefahr von Pilzen sowie zur Datenlage.

Pilzspezies	in Gebäuden gefunden [55] ¹⁾	repräsentativ in Gebäuden								Gesundheitsgefährdung [55] ²⁾	Einteilung nach [81] ³⁾	Gefährdungsklassen ⁴⁾	Daten vorhanden	
		Gertis [37]	LGA [81]	Nielsen [89]	Annex [52]	Carl [12]	Grant [39]	Rao [97]	DIN 4108 [21]				Sporenkeimung	Myzelwachstum
Absidia sp.												R		
Absidia corymbifera												B		
Absidia glauca												C		
Acremonium sp.											2	B		
Acr. cephalosporium												B		
Acr. furcatum												C		
Acr. obclavatum												C		
Acr. strictum												C		
Acrostalagmus sp.												C		
Alternaria sp.											2	B		
Alternaria alternata												B		
Alternaria tenuis												B		
Aspergillus sp.												B		
Asp. amstelodami												B		
Asp. brevicompactum												-		
Asp. candidus												B		
Asp. carbonarius												C		
Asp. chevalieri												-		
Asp. clavatus												-		
Asp. echinulatus												-		
Asp. fischeri												C		
Asp. flaviceps												C		
Asp. flavus											3	A		
Asp. fumigatus											3	A		
Asp. glaucus												C		
Asp. halophilus												C		
Asp. mangini												-		
Asp. nidulans											3	A		
Asp. niger											2	A		
Asp. ochraceus												B		
Asp. parasiticus												B		
Asp. penicilloides											3	A		
Asp. repens												-		
Asp. restrictus											2	B		
Asp. ruber												B		
Asp. sydowii												C		
Asp. tamarii												C		
Asp. terreus											2	B		

Fortsetzung Tabelle 1

Pilzspezies	in Gebäuden gefunden [55] ¹⁾	repräsentativ in Gebäuden								Gesundheitsgefährdung [55] ²⁾	Einteilung nach [81] ³⁾	Gefährdungsklassen ⁴⁾	Daten vorhanden	
		Gertis [37]	LGA [81]	Nielsen [89]	Annex [52]	Carl [12]	Grant [39]	Rao [97]	DIN 4108 [21]				Sporenkeimung	Myzelwachstum
<i>Pen. aurantio-nigrum</i>												B		
<i>Pen. berycom pactum</i>											2	B		
<i>Pen. chrysogenum</i>											2	B		
<i>Pen. citreonigrum</i>												C		
<i>Pen. citrinum</i>												C		
<i>Pen. commune</i>												-		
<i>Pen. corylophilum</i>												C		
<i>Pen. cyclophilum</i>												B		
<i>Pen. decumbens</i>												C		
<i>Pen. echinulatum</i>												C		
<i>Pen. expansum</i>											2	B		
<i>Pen. frequentans/glabrum</i>												-		
<i>Pen. funiculosum</i>												C		
<i>Pen. glabrum</i>												B		
<i>Pen. griseofulvum</i>												C		
<i>Pen. italicum</i>												-		
<i>Pen. janthinellum</i>												C		
<i>Pen. lapidosum</i>												-		
<i>Pen. myczynskii</i>												C		
<i>Pen. nigricans</i>												-		
<i>Pen. notatum</i>												B		
<i>Pen. olivoviride</i>												C		
<i>Pen. oxalicum</i>												C		
<i>Pen. purpurogenum</i>												C		
<i>Pen. rubrum</i>												C		
<i>Pen. simplicissimum</i>												C		
<i>Pen. spinulosum</i>												B		
<i>Pen. verrucosum</i>												B		
<i>Pen. viridicatum</i>												-		
<i>Pen. vulpium</i>												-		
<i>Phialophora heteromorpha</i>												B		
<i>Phoma</i> sp.												C		
<i>Phoma herbarum</i>												-		
<i>Phoma leveillei</i>												C		
<i>Phoma putaminum</i>												C		
<i>Phoma violaceae</i>												C		
<i>Rhinochadiella</i> sp.												C		
<i>Rhizopus</i> sp.											3	A		
<i>Rhizopus arrhizus</i>												-		
<i>Rhizopus oryzae</i>												B		
<i>Rhizopus stolonifer</i>												C		
<i>Rhodotorula</i> sp. (Hefe)											1	B		
<i>Scopulariopsis</i> sp.												B		
<i>Scop. brevicaulis</i>												B		
<i>Scop. brumptii</i>												B		
<i>Scop. fusca</i>												B		
<i>Scytalidium circinatum</i>												C		
<i>Scytalidium lignicola</i>												C		
<i>Sistotrema brinkmannii</i>												-		
<i>Sphaeropsidales</i>												-		
<i>Sporobolomyces roseus</i>												C		
<i>Sporotrichum</i> sp.												C		
<i>Sporothrix</i> sp.												C		
<i>Stachybotrys</i> sp.												B		
<i>Stachybotrys atra</i>											3	A		
<i>Stemphylium</i> sp.												C		
<i>Steriles Mycel</i>												-		
<i>Torula</i>														
<i>Trichoderma</i> sp.												C		
<i>Trichoderma harzianum</i>											2	B		
<i>Trichoderma lignorum</i>												B		
<i>Trichoderma viride</i>											2	B		
<i>Trichothecium</i> sp.														
<i>Trichothecium roseum</i>											2	C		
<i>Tritirachium</i>												C		
<i>Ulocladium</i> sp.												C		
<i>Ulocladium atrum</i>												C		
<i>Ulocladium chartarum</i>												-		
<i>Ulocladium consortiale</i>												-		
<i>Ustilago</i> sp.												B		
<i>Verticillium</i> sp.												B		
<i>Wallemia sebi</i>											1	C		
<i>Xeromyces</i> sp.												C		

1) Dargestellt werden alle in der ausgewerteten Literatur genannten und in Gebäuden gefundenen Pilze (nach [55]).

2) Dargestellt werden alle in der ausgewerteten Literatur genannten gesundheitsgefährdenden Pilze (nach [55]).

3) Die von der LGA Stuttgart [81] angegebene Einteilung der Pilze hinsichtlich Gesundheitsgefährdung bedeutet im einzelnen:

- 1: Pilze dieser Gruppe sollen im Innenraum nicht dominieren - langfristiger Handlungsbedarf.
- 2: Pilze dieser Gruppe sollen im Innenraum nicht gehäuft auftreten - mittelfristiger Handlungsbedarf.
- 3: Es darf kein Pilz dieser Gruppe im Innenraum vorhanden sein - sofortiger Handlungsbedarf.

4) Bedeutung der Gefährdungsklassen:

- A: Pilz ist toxisch und darf in einem Wohnraum nicht auftreten (entspricht LGA-Einteilung).
- B: Pilz ist bei langer Expositionszeit gesundheitsgefährdend, d.h. allergisierend oder pathogen.
- C: Pilz ist nicht gesundheitsgefährdend, führt aber zu wirtschaftlichem Schaden.

Vorkommen

Der natürliche Lebensraum der Schimmelpilze sind abgestorbene Pflanzen auf dem Erdboden. So sind sie in Kompostieranlagen, Müll- und Biotonnen und bei Zimmerpflanzen zu finden. Daher ist es wenig verwunderlich, daß Schimmelpilzsporen ubiquitär, also an jedem Ort und zu jeder Jahreszeit nachweisbar sind, obgleich die gemessenen Sporenkonzentrationen der Außenluft jahreszeitlichen und täglichen Zyklen [80, 135] folgen, wie Untersuchungen der Sporenkonzentration in der Außenluft für einige norddeutsche Orte zeigen [139]. Daher sollte bei der Messung der Sporenkonzentration in Innenräumen (siehe z.B. [101]) die Sporenkonzentration der Außenluft mit in die Bewertung einbezogen werden. Die Sporenkonzentration wird üblicherweise in „koloniebildenden Einheiten pro Volumen“ (KBE/m³) angegeben. Als Einflußfaktoren des jahreszeitlichen Zyklus gibt Takahashi [129] Niederschlag, durchschnittliche Monatstemperatur und relative Luftfeuchte, Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit und den barometrischen Druck an. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß verschiedene Autoren unterschiedliche Angaben der maximalen äußeren Sporenkonzentrationen machen [87]. Wenn allerdings in Innenräumen eine deutlich höhere Sporenkonzentration nachweisbar ist als in der Außenluft, dann ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Schimmelpilzbefall in der Wohnung, z.B. auf Zimmerpflanzenerde oder aber auch auf den Bauteilen, dafür verantwortlich.

2.1.2 Schimmelpilze im Bau

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind nur Schimmelpilze von Bedeutung, die in Gebäuden angetroffen werden. Um von den über 100.000 verschiedenen Spezies auf die wichtigsten auf Standardmedien kultivierbaren Spezies in Gebäuden zu schließen, wurden in [55] die wesentlichen Literaturstellen ausgewertet und die Ergebnisse zusammengetragen. Eine Übersicht von Baumaterialien, die häufig von Schimmelpilzen befallen werden sowie die dabei beteiligten Spezies zeigt Tabelle A. Ca. 200 in Gebäuden anzutreffende Spezies werden in Tabelle 1 aufgezählt. In dieser Zusammenstellung sind die von verschiedenen Autoren [12, 37, 39, 52, 81, 89, 97] sowie im Neuentwurf der DIN 4108 Teil „Schimmelpilze“ [21] als repräsentativ, d.h. häufig in Gebäuden vorkommend, angesehene Arten genannt. Überraschenderweise werden nur wenige Spezies von mehreren Autoren gemeinsam genannt. Diese Diskrepanzen sind vermutlich in den verwendeten Erfassungsarten, den verschiedenen Gebäuden, den dort vorhandenen Feuchten und Temperaturen sowie letztlich auch in unterschiedlichen geographischen wie jahreszeitlichen Randbedingungen begründet. Deswegen erscheint es erforderlich, die Wachstumsvoraussetzungen sämtlicher in Tabelle 1 genannter Pilze in der Vorhersagemethode zu berücksichtigen, sofern entsprechende Daten vorhanden sind.

Tabelle 2 Übersicht über mögliche Erkrankungen des Menschen durch Schimmelpilze nach [32, 102, 113, 129].

Begriff	Beschreibung	Arten	Befallene Organe bzw. Krankheiten	Beispiele für beteiligte Schimmelpilze
Mykosen ¹⁾	Pilzwachstum am oder im menschlichen Wirt	Epidermale Mykosen ²⁾	Haut	Aspergillus fumigatus Penicillium spinulosum
		Endo- und Systemmykosen ³⁾	Innere Organe, z.B.: Herz, Leber, Niere z.B. Hepatitis primärer Leberkrebs	Aspergillus niger Absidia sp., Mucor, sp. Aspergillus flavus Penicillium parasiticus
Mykotoxikosen	Vergiftung durch Mykotoxine	Aflatoxikosen	Endemische Nephropathie kardiale Beriberi	Penicillium verrucosum Penicillium citreoviride
		Penicillium-Mykotoxikosen		Fusarium sporotrichioides Fusarium poae
		Fusarium-Mykotoxikosen	z.B.: Krebs alimentäre toxische Aleukie	
		Alternaria-Mykotoxikosen	Onyalai	Tenuazonensäure und Salze von Phoma sorghina
		Stachybotryotoxikose		Stachybotrys atra
Mykogene Allergien	Kontakt von Pilzelementen mit feuchten Schleimhäuten	Asthma bronchiale	Keine Angabe	Verschiedene Phycomyceten
		Allergische Alveolitis	Lunge	Aspergillus-Arten Penicillium-Arten

1) Weitere Mykosen wie z.B. Muco-, Zygo-, Phaeohypho- und Otomykosen sind bekannt.

2) Man unterscheidet dabei Aspergillosen und Penicilliosen.

3) Man unterscheidet dabei Aspergillosen und Phykomycosen.

2.1.3 Gesundheitsgefährdung

Es ist hinreichend bekannt, daß Pilze bei Menschen Krankheiten auslösen können (z.B. [17, 59, 94]). Wie auch in Bild 1 angedeutet, ist es hinsichtlich einer für die Modellbildung geeigneten Auswahl von Schimmelpilzen erforderlich, die gesundheitliche Bedeutung verschiedener Spezies richtig einzuschätzen. Dazu soll zunächst erläutert werden, mit welchen möglichen Erkrankungen gerechnet werden muß und ob bestimmte Richtwerte für Sporenkonzentrationen in Innenräumen berücksichtigt werden können. Darauf aufbauend erfolgt eine vereinfachende Einteilung aller im Bau vorkommender Pilze in mehrere Gefährdungsklassen.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über mögliche Erkrankungen des Menschen durch Schimmelpilze nach [32, 102, 113, 129]. Im Wesentlichen lassen sich drei unterschiedliche prinzipielle Arten unterscheiden, die im folgenden erläutert werden:

Mykosen

Als Mykose wird Pilzwachstum bei einem menschlichen Wirt bezeichnet. In der Medizin wird die Bezeichnung der Erkrankung aus dem Pilznamen und der Endung -ose (von Mykose) gebildet. Am verbreitetsten sind Aspergillosen und Penicilliosen. Im Allgemeinen stellen Mykosen keine lebensbedrohliche Gefahr dar; aber bei immungeschwächten Patienten können sie zu einer ernsthaften Gefahr werden. Dabei sei an dieser Stelle auf den sog. „Fluch der Pharaonen“ hingewiesen; damals verliefen Lungenmykosen tödlich. Folgende Organe werden bevorzugt befallen: Haut, Atmungsorgane, Augen, aber auch Herz, Leber, Niere und der Verdauungstrakt. Von Reiß [102] werden drei Ursachen genannt:

- Berufliche Exposition: Arbeiten mit pilzhaltigem Material, z.B. Pilzelemente im Staub von Getreide, Heu und Stroh, aber auch bei der Verarbeitung von verschimmeltem Holz.
- Akzidentelle Exposition: Aufnahme von pilzhaltigem Material durch bautechnische Mängel z.B. Belüftung von Aufenthaltsräumen mit verschimmelten Lüftungsanlagen, Feuchte in Wohnräumen oder durch kontaminierte Lebensmittel, Müll und Schmutz.

- Unauffällige konstante Exposition: Durch häusliche Umwelt, z.B. Zimmerpflanzenerde oder Haustiere.

Die wichtigsten Schimmelpilzspezies, welche Mykosen hervorrufen sind [102]: *Absidia sp.*, *Aspergillus sp.*, *Basidiobolus ranarum*, *Cephalosporium sp.*, *Cladosporium sp.*, *Fusarium sp.*, *Mortierella sp.*, *Mucor sp.*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Scopulariopsis sp.* und *Verticillium sp.*

Mykotoxikosen

Mykotoxikosen sind Vergiftungen durch toxisch wirkende Substanzen, die Pilze mit Hilfe ihres Stoffwechsels bilden. Es wird angenommen, daß Schimmelpilze diese Stoffe produzieren, um sich besser gegen konkurrierende Spezies durchsetzen zu können. Zu diesen Toxinen gehören Aflatoxin und Ochratoxin A, Patulin, Citrinin, Citreoviridin, Sterigmatocystin und Mycophenolsäure [102, 122]. Diese Stoffe werden überwiegend über verschimmelte Nahrungsmittel aufgenommen. Allerdings können zum Beispiel Aflatoxine auch durch Inhalation kontaminierter Stäube und Sporen in den Blutkreislauf gelangen. Akute Vergiftungserscheinungen sind aufgrund strenger Bestimmungen für den Umgang mit Lebensmitteln in den Industriestaaten selten geworden. Kritischer sind hier die chronischen Vergiftungserscheinungen, da der menschliche Körper nicht in der Lage ist, diese Toxine abzubauen und auszuschcheiden. Die häufigste chronische Erkrankung ist der primäre Leberkrebs (hepatozelluläres Carcinom). Laut Reiß [102] erkrankt rund eine Million Menschen jährlich; man rechnet mit mindestens 200.000 Todesfällen pro Jahr weltweit.

Toxische Reaktionen durch Einatmen von Sporen werden bei hohen Konzentrationen $> 10^8$ KBE/m³ beschrieben und treten damit nur an Arbeitsplätzen mit hoher Belastung durch Stäube auf. *Stachybotrys*-Konidiosporen, die einen hohen Toxingehalt haben, zeigen schon ab Konzentrationen von 10 KBE/m³ toxische Einflüsse auf das Immunsystem [124]. Zu den toxinbildenden Schimmelpilzen gehören *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.*, *Cladosporium sp.* und *Stachybotrys sp.*

Allergien

Allergien beruhen auf einer übermäßigen Reaktion des Immunsystems. Die verschiedenen Allergieformen werden je nach erzeugter Immunreaktion in vier Typen eingeteilt [50, 87, 102]:

- Durch Pilzallergene hervorgerufene Typ 1-Allergien zeigen sich entweder durch allergische Rhinitis oder durch Asthma. Allergische Reaktionen, auch Allergien der Atemwege, laufen in zwei Phasen ab. Die Frühphase tritt innerhalb von Minuten ein und ist durch Ausschüttung von Mediatoren (z.B. Histamin aus Stammzellen) gekennzeichnet. 3 bis 4 Stunden nach Allergenaufnahme geschieht die Spätreaktion als Ergebnis von Zellreaktionen auf die in der Frühphase gebildeten Mediatoren.
- Typ 2-Allergien sind Reaktionen von Antikörpern und Antigenen auf Zelloberflächen. Dieser Allergietyp wird nicht durch Inhalationsallergene ausgelöst, sondern erfolgt z.B. durch orale Aufnahme. Da Inhalationsallergene keine Typ 2-Reaktion auslösen, wird auf diese Allergieform hier nicht näher eingegangen.
- Der Typ 3 entsteht durch eine Immunkomplexbildung zwischen Antigen und Antikörper. Dies tritt ungefähr 4 bis 6 Stunden nach Exposition auf und ist somit eine Spätreaktion.
- Der Allergietyp 4 ist durch eine Reaktion von sensibilisierten T-Lymphozyten mit einem Allergen definiert. Da dies 24 bis 48 Stunden nach Antigenkontakt auftritt, ist dieser Typ durch eine verzögerte Reaktion gekennzeichnet.

Schimmelpilze können Inhalationsallergien hervorrufen. Dabei spielt nicht das Myzel die entscheidende Rolle, sondern die Sporen. Viele Pilzsporen sind nur 2 bis 5 µm groß und gelangen somit in die Bronchien und können Asthma hervorrufen. Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 10 µm werden von der Nasen- und Rachenschleimhaut zurückgehalten und können Heuschnupfen erzeugen. Zu den typischen und häufigsten allergischen Krankheitsbildern gehören:

- Die Bindehautentzündung der Augen (Konjunktivitis),
- der allergische Schnupfen (Rhinitis),
- die Entzündung der Atemwege (Bronchitis),
- die anfallsweise Atemnot (Asthma bronchiale),
- das Hautekzem (atopisches Ekzem, Neurodermitis) und
- das Nesselfieber (Urtikaria).

Sick Building Syndrome (SBS) und Building Related Illness (BRI)

Begriffe wie SBS und BRI werden immer häufiger auch in Zusammenhang mit Schimmelpilzen genannt, so daß sie hier kurz erläutert werden sollen. Unter dem Sick Building Syndrome (SBS) beziehungsweise Building Related Illness (BRI) versteht man mehrere unspezifische Symptome (z.B. Schleimhautirritationen, brennende Augen, gehäufte Infekte der oberen Atemwege, aber auch Müdigkeit und Konzentrationsschwäche), die bei einem Aufenthalt in bestimmten Gebäuden auftreten, ohne daß ein eindeutiger Auslöser gefunden werden kann. Als Einflußfaktoren werden neben Viren, Pollen, Milben, Stickoxide, Kohlenmonoxid, Ozon, Radon, Emissionen aus Bau- und Einrichtungsmaterialien, elektromagnetischen Feldern auch „Microbial Volatile Organic Compounds“ (MVOC) und Pilzsporen genannt. Die Gefahren, die von Pilzsporen ausgehen, sind oben genannt. McGrath [86] zeigt einen Zusammenhang zwischen erhöhten Konzentrationen von Penicilliumsporen im Innenraum und SBS.

MVOC sind, wie der Name besagt, flüchtige, organische Verbindungen (Alkohole, Ketone, Aldehyde, Terpene und aromatische Verbindungen), die unter anderem auch von Pilzen gebildet werden. Feuchte und verfügbare Nahrung beeinflussen das Wachstum und damit auch die Produktion und Zusammensetzung von MVOC. Ein einzelnes MVOC ist kein ausreichendes Kriterium, um mikrobiellen Befall an Baumaterialien nachzuweisen [62]. Dennoch lassen sich hohe Konzentrationen an MVOC auch mit der menschlichen Nase wahrnehmen. Dies macht sich durch einen modrigen, erdigen Geruch bemerkbar und kann ein Zeichen für einen fortgeschrittenen Schimmelpilzschaden sein.

Richtlinien für zulässige Sporenkonzentrationen

In Gebäuden spielt bei der Gesundheitsgefährdung durch Pilze ausschließlich der Übertragungsweg Luft eine Rolle. Daher ist zu fragen, welche Konzentrationen in Räumen kritisch sind. Allerdings gibt es keine genauen Aussagen, ab welchen Konzentrationen von Pilzaerosolen (Sporen, myzelhaltiger Staub, flüchtige mikrobielle Stoffe) eine Gefährdung der Gesundheit vorliegt. Viele Empfehlungen zur Beurteilung der Pilzsporenbelastung in Innenräumen beruhen auf Werten, die in unbelasteten Räumen auftreten und nicht auf Daten, die den Einfluß auf die Gesundheit beschreiben. So weichen die Vorgaben gesetzlicher Richtlinien oft weit voneinander ab. Eine Übersicht über diese Richtlinien gibt Rao [97] an. So erklärt die Empfehlung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) pathogene und toxische Pilzspezies im Innenraum als nicht akzeptabel. Eine Konzentration von $\leq 150 \text{ KBE/m}^3$ gilt als normal, wenn diese sich aus einer Mixtur von verschiedenen Pilzsporen zusammensetzt und $\leq 500 \text{ KBE/m}^3$, wenn diese von *Cladosporium* und anderen gewöhnlich in der Außenluft auftretenden Pilzen stammen [97]. Für die Baupraxis wird der Erfahrungswert 100 KBE/m^3 über der Außenluft als Anzeiger einer intramuralen Anreicherung als guter Orientierungswert von Senkpiel [123] genannt.

Wie in Ziffer 2.1.1 erläutert, treten in der Außenluft erhebliche Schwankungen der Sporenkonzentrationen auf, die, bedingt durch den Gebäude-Luftwechsel, auch in Wohnräumen zu Veränderungen führen können, so daß letztlich nicht mehr erkenntlich ist, in welchem Maße ein in Räumen vorhandener Schimmelpilzbefall zu einer Innenraumkonzentration beiträgt. Insgesamt muß daraus geschlossen werden, daß für die Modellentwicklung Annahmen einer zulässigen Innenraum-Sporenkonzentration nicht geeignet sind, sondern daß davon auszugehen ist, daß möglichst kein Pilzwachstum in Gebäuden auftreten darf.

Einteilung der Pilze hinsichtlich Gesundheitsgefährdung

Tabelle B im Anhang stellt einige humanpathogene und allergene Schimmelpilze und durch sie hervorgerufenen Krankheiten zusammen [55]. Um einzelne Spezies hinsichtlich ihrer Gesundheitsgefahr beur-

teilen zu können, wurde vom Landesgesundheitsamt Stuttgart [81] folgende, bisher allerdings nicht veröffentlichte Einteilung (Gruppe 1 bis 3) vorgenommen:

- Gruppe 1: Pilze dieser Gruppe sollen im Innenraum nicht dominieren - langfristiger Handlungsbedarf.
- Gruppe 2: Pilze dieser Gruppe sollen im Innenraum nicht gehäuft auftreten - mittelfristiger Handlungsbedarf.
- Gruppe 3: Es darf kein Pilz dieser Gruppe im Innenraum vorhanden sein - sofortiger Handlungsbedarf.

Eine Zuordnung der einzelnen Pilze zu diesen 3 Gruppen wird in Tabelle 1 gezeigt. In die Gruppe 2 entfallen 15 Pilze. 10 Spezies werden der 3. Gruppe zugeordnet, nur wenige der 1. Gruppe.

2.1.4 Wachstumsvoraussetzungen

Sind die Umgebungsbedingungen optimal, wie z.B. im flüssigen Vollmedium, so kann eine Gesetzmäßigkeit für Schimmelpilzwachstum angegeben werden, die sich in 6 aufeinanderfolgende Phasen unterteilt:

- A bis B: Anlaufphase (Lag-Phase)
- B bis C: Beschleunigungsphase
- C bis D: exponentielle Wachstumsphase (Log-Phase)
- D bis E: Verzögerungsphase
- E bis F: stationäre Phase
- F bis G: Absterbephase.

Bild 4 zeigt dazu eine schematische Darstellung dieser Wachstumskurve nach [102]; die Keimzahl ist logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. In der ersten Phase, der Anlaufphase, vergrößern sich die Zellen, ihr Stoffwechsel wird aktiviert, aber die Anzahl der Zellen bleibt im wesentlichen noch konstant. Die Dauer dieser Phase ist abhängig von der Temperatur und der an den Sporen anliegenden Feuchte. Danach folgt die Beschleunigungsphase. Diese ist gefolgt von der exponentiellen Wachstumsphase. In dieser Phase beschränkt sich der Pilz auf die Vermehrung seiner vegetativen Einheiten

und die Produktion von Biomasse. Sinkt die Vermehrungsrate infolge ungünstiger Umweltbedingungen, wie Mangel an Nährstoffen, so ist die Verzögerungsphase erreicht. Schließlich kommt die stationäre Phase, in der die Keimzahl konstant bleibt, da sich zwischen der Neubildung und dem Absterben der Zellen ein Gleichgewicht eingestellt hat. Durch die stete Verknappung der vorhandenen Nährstoffe und Bildung giftiger Stoffwechselprodukte wird die Pilzkultur nach der stationären Phase, zumindest im Zentrum absterben. Das Leben des Pilzes ist gefährdet, und er wird in dieser Phase sporulieren, um seinen Fortbestand zu sichern.

Im folgenden werden alle unmittelbar auf den Pilzmetabolismus einwirkenden Parameter zusammen

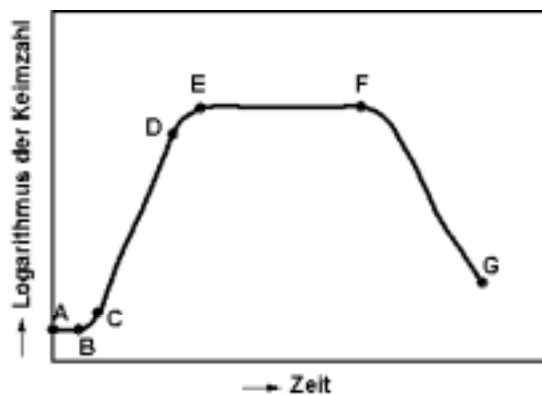


Bild 4 Schematische Darstellung der Wachstumskurve einer Schimmelpilzkultur nach Reiß [102]:

- A bis B: Anlaufphase (lag-phase)
- B bis C: Beschleunigungsphase
- C bis D: exponentielles Wachstum (log-phase)
- D bis E: Verzögerungsphase
- E bis F: stationäre Phase
- F bis G: Absterbephase.

gestellt. Es sollen die Grenzen aufgezeigt werden, in denen sich das Leben bzw. Überleben der Schimmelpilze abspielt. In der in Tabelle 3 gezeigten Übersicht sind die wesentlichen Einflußfaktoren auf das Wachstum von Mikroorganismen dargestellt.

Temperatur

Da an den Wachstums- und Entwicklungsprozessen eines Organismus eine große Anzahl biochemischer Umsetzungen beteiligt sind, ist hinsichtlich Wachstum und Entwicklung von Mikroorganismen eine Temperaturabhängigkeit zu erwarten. Aus der Mykologie ist bekannt, daß Pilzwachstum ab 0 °C auftritt mit einer optimalen Wachstumstemperatur von meist über 30 °C. Aus verschiedenen Literaturangaben [9, 123, 128] kann gefolgert werden, daß Schimmelpilze in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 50 °C gedeihen können. Es wurde häufig beobachtet, daß Pilze in der Regel Kältestreß toleranter gegenüber stehen als Hitzestreß [102]. Diese Erkenntnis macht man sich in der Lebensmittelindustrie zunutze. Sporen und Myzel werden durch kurzzeitige Erhitzung des Produktes auf bis zu 80 °C fast vollständig abgetötet. Einige Sporen von *Aspergillus sp.* und *Penicillium sp.* können allerdings selbst diesen lebensfeindlichen Bedingungen trotzen [140]. Ebenso behalten diese nicht psychophilen Arten ihre Keimfähigkeit bis -10 °C bei [116]. Da im Inneren von Baukonstruktionen oder an Innenoberflächen Temperaturen in der Regel zwischen 0 °C und 30 °C liegen, wird sich nie eine letale Wirkung der Temperatur auf Schimmelpilze einstellen.

Tabelle 3 Wesentliche Einflußfaktoren für das Auskeimen und Wachstum von Schimmelpilzen mit Angaben des minimalen und maximalen Wachstumsbereichs.

Einflußgröße	Parameter	Einheit	Wachstumsbereich		Bemerkungen
			Minimal	maximal	
Temperatur	Temperatur an der Bauteiloberfläche	°C	-8	60	<u>hängt von der Pilzart und dem Lebensstadium (Sporenkeimung oder Myzelwachstum) ab</u>
Feuchte	relative Feuchte an der Bauteiloberfläche	%	70 ¹⁾	100	
Substrat	Nährstoffe und Salzgehalt	-	-	-	<u>auch in Staubablagerungen können Nährstoffe gefunden werden</u>
Milieu	pH-Wert der Oberfläche	-	2	11	²⁾
Zeit	z.B. Stunden pro Tag	h/d	1	-	<u>je nach Temperatur und Feuchte</u>
Atmosphäre	Sauerstoffgehalt	%	0,25	-	immer vorhanden

1) Bekannt sind auch Schimmelpilze (Xeromycis), die auf Gebäck schon ab 45 % relativen Feuchte wachsen.

2) Der pH-Wert hängt selbst von der relativen Feuchte sowie der Temperatur ab und wird vom Pilz beeinflusst.

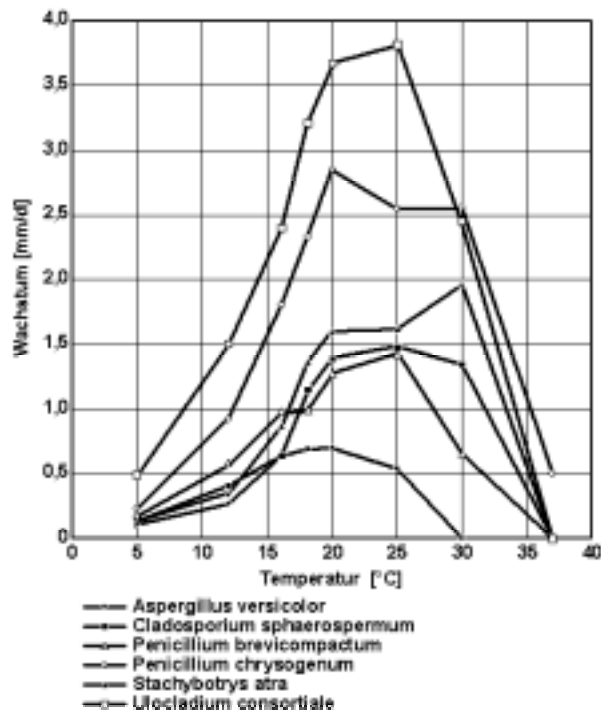


Bild 5 Wachstumsraten verschiedener Schimmelpilze in Abhängigkeit von der Temperatur nach Grant [39].

Je nach Temperatur ändert sich die Biomassenproduktion. In Bild 5 erkennt man bei der in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragenen Wachstumsrate [39] ein klar ausgeprägtes Optimum. Demzufolge beeinflusst eine Veränderung der Temperatur den Metabolismus. Nach Strasburger [128] gilt, daß zum Auslösen eines Wachstumsvorganges, d.h. der Enzymaktivität von Schimmelpilzen, eine bestimmte Minimaltemperatur überschritten werden muß. Von da an ist bei weiterem Temperaturanstieg eine Beschleunigung der Wachstumsgeschwindigkeit zu beobachten. Sie verzögert sich kurz vor Erreichen des Idealbereichs. 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 bringen, da Proteine (Enzyme) denaturieren [16].

Allerdings kann in vielen Fällen eine kleine Temperaturdifferenz von wenigen Kelvin darüber entscheiden, ob Wachstum einer bestimmten Spezies statt

findet oder nicht. Eine Übersicht des Temperaturbereichs sowie des entsprechenden Optimums einiger repräsentativer Pilze zeigt Bild 6. Man erkennt sowohl die große Bandbreite als auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Pilzen. Nach Ayerst [4] muß bzgl. Angaben zur Abhängigkeit des Wachstums von der Temperatur eine Unsicherheit von ± 2 K angenommen werden. Dazu kommt, daß verschiedene Autoren nicht selten unterschiedliche Angaben zum Temperaturbereich für einen Pilz machen. Tabelle 4 gibt eine Angabe der minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstums Voraussetzungen hinsichtlich Temperatur, relative Feuchte und pH-Wert für Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum an.

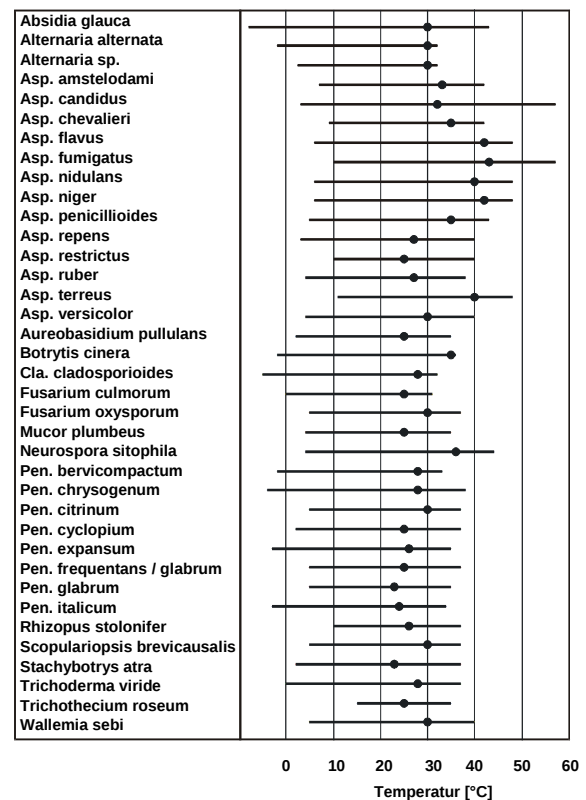


Bild 6 Schematische Darstellung des Temperaturbereichs für das Vorkommen verschiedener Schimmelpilze. Die Optima sind jeweils durch Punkte gekennzeichnet. Die Abkürzungen bedeuten:
 Asp.: Aspergillus
 Cla.: Cladosporium
 Pen.: Penicillium
 sp.: Spezies.

Tabelle 4 Angabe der minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstumsvoraussetzungen für einzelne Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur, relativer Feuchte und pH-Wert bzgl. Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum für unterschiedliche Gefährdungsklassen.

Pilzspezies	Gefährdungs-klasse	Wachstumsvoraussetzungen											
		Temperatur [°C]						relative Feuchte [%]				pH-Wert [-]	
		Sporen-keimung			Myzel-wachstum			Sporen-keimung		Myzel-wachstum		pH-Wert [-]	
		min.	opt.	max.	min.	opt.	max.	min.	opt.	min.	opt.	min.	opt.
Asp. Flavus	A	10	30	45	6	40	45	80	100	78	98	2,5	7,5
Asp. Fumigatus	A	10	40	50	10	43	57	80	97	82	97	3	6,5
Asp. Nidulans	A	10	37	50	6	40	48	75	95	78	97		
Asp. Niger	A	10	35	50	6	37	47	77	98	76	98	1,5	9,8
Asp. Penicillioides	A				5	25	37						
Asp. Versicolor	A	8	30	42	4	30	40	74	91	75	95		
Stachybotrys atra	A	5	25	40	2	23	37	85	97	89	98		
Gefährdungsklasse A	A	5	33	50	2	40	57	74	96	75	97	2	7
Absidia corymbifera	B				35	45						3	8
Absidia glauca	B				-8	30	43			70			
Alternaria alternata	B	3	35	37	-2	30	32	84		85	98	<2,7	5,4
Asp. Amstelodami	B	5	35	43	7	33	42	70	90	71	100		
Asp. Candidus	B	10	35	45	3	32	57	70	95	74	90	2,1	7,7
Asp. Ochraceus	B					32				77	95	3	6,5
Asp. Parasiticus	B				10	37				82		2	6,5
Asp. Restrictus	B	10	28		10	28		73	95	71	90		
Asp. Ruber	B	5	30	42	4	27	38	70	90	71	93		
Asp. Terreus	B	14	40	50	11	40	47	75	99	77	97		
Aureobasidium pullulans	B				2	25	35			88			
Botrytis cinera	B				-3	21	36			93			
Cla. Cladosporioides	B				-5	28	32	85		84	96	3,1	7,7
Eurotium herbariorum	B					30	40	73		75	96		
Fusarium culmorum	B	3	25	37	0	25	31	87		90			
Fusarium oxysporum	B				5	30	37			90		2	9
Fusarium solani	B									90			
Mucor plumbeus	B				4	25	35	93		93	98		7
Pen. Brevicompactum	B	5	25	32	-2	25	30	78		75	96		
Pen. Chrysogenum	B				-4	28	38	78		79	98		
Pen. Cyclopium	B	5	25	33	2	25	37	80	97	80	98	2	10
Pen. Expansum	B	<0			-3	26	35	82		82	95		
Scopulariopsis brevicaulis	B				5	30	37			85	94		9,5
Trichoderma viride	B				0	28	37				99		
Gefährdungsklasse B	B	3	31	50	-8	29	57	70	94	70	96	2	7
Chaetomium globosum	C					35							
Chrysosporium fastidium	C							69	93	72	92		
Cla. Sphaerosperum	C					25				81,5			
Paecilomyces lilacinus	C					35	60	84		84			
Pen. Citrinum	C							84		80		2	5,5
Rhizopus stolonifer	C	1,5	28	33	10	26	37	84		92	98		<6,8
Trichothecium roseum	C	5			15	25	35	90		86	96		
Ulocladium sp.	C									89			
Wallemia sebi	C		30		5	30	40	69		70			
Gefährdungsklasse C	C	2	29	33	5	29	60	69		70	95	2	10

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 (z.B. [1]). Dieser Feuchtegehalt wird in der Biologie häufig als Wasseraktivität – „a_w-Wert“ – dargestellt und steht in einem direkten Zusammenhang mit der relativen Feuchte im Baustoff oder an der Oberfläche [9]:

$$\varphi = a_w \cdot 100 \quad (1)$$

mit: φ [%] relative Feuchte
 a_w [-] Wasseraktivität

Im folgenden wird stets die relative Feuchte als Begriff verwendet. Bieberstein [9] weist darauf hin, daß Schimmelpilzbildung

bei Feuchten erfolgen kann, die noch weit von einem Zustand der Feuchtesättigung entfernt sind. Nicht nur die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum, sondern auch die Mykotoxinproduktion sind stark abhängig von der verfügbaren Feuchte (neben Temperatur und Nährstoffe) [84].

Für den Wachstumsparameter Feuchte schlug Snow [127] schon im Jahr 1949 eine Grobklassifizierung der Pilze vor: 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, so daß unter Berücksichtigung neuerer Untersuchungen die Grenzen um ca. 5 bis 10 % nach unten korrigiert werden müssen [5, 39]. Jede einzelne Pilzspezies besitzt ihren eigenen, charakteristischen Feuchtebereich, der Leben ermöglicht und u.a. die Intensität des Wachstums bestimmt, wie die Werte in Tabelle 4 zeigen.

Aus den in Tabelle 4 aufgeführten Daten läßt sich zusammenfassend aussagen, daß die Feuchtegrenze, unterhalb der kein Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden auftritt, bei ca. 70 % relativer Feuchte liegt. Xerophile Pilze begnügen sich zwar schon mit einer relativen Feuchte von 65 %, aber nicht alle Spezies treten in Gebäuden auf [146]. Mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt die Wahrscheinlichkeit, daß Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei 80 % relativer Feuchte sind die Wachstumsbedingungen für fast alle Schimmelpilzarten erreicht. Bei hoher Feuchte kommen nur noch wenige Spezies hinzu; diese streben ihren Optimalbereich bei 90 % bis 96 % an. Ferner kann davon ausgegangen werden, daß nur wenige Schimmelpilze in flüssigem Wasser ausreichende Lebensbedingungen finden [102].

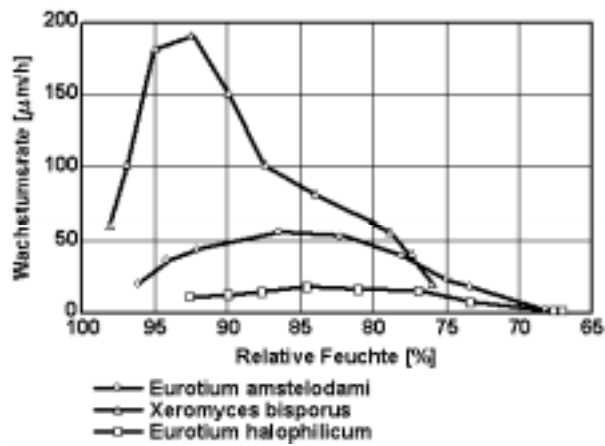


Bild 7 Wachstumsraten dreier xerophiler Pilze in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte auf einem Nährboden aus Glucose und Fructose bei 25 °C nach Hocking [48].

Bild 7 gibt die Wachstumsrate verschiedener xerophiler Pilze wieder in Abhängigkeit von der relativen Feuchte bei optimaler Temperatur nach [48]. Es zeigt sich, ähnlich dem Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur, auch eine deutliche Abhängigkeit des Wachstums von der relativen Feuchte.

Kombination von Temperatur und Feuchte

Die Wachstumsvoraussetzungen Temperatur und Feuchte sind bisher getrennt voneinander betrachtet worden. Es ist jedoch zu beachten, daß sich die Lage der minimalen und optimalen relativen Feuchten bei unterschiedlichen Temperaturen verschieben kann. Die minimalen Werte sind nur bei optimalen Temperaturen zu erreichen [116]. Eine Überlagerung der beiden Einflüsse ergibt, in einem Diagramm aufgetragen, Linien gleichen Wachstums (Isoplethen). Die unterste Kurve kennzeichnet die Bedingungen, unter denen keine Sporenkeimung bzw. Wachstum mehr feststellbar ist, wie Bild 8 zeigt. Ein Ansteigen des Feuchtebedarfs bei Temperaturen über etwa 30 °C begründet sich in der Temperaturabhängigkeit der Aktivität von am Stoffwechsel beteiligten Enzymen. Werden Auskeimungszeiten bzw. Wachstumsraten in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur angegeben, so spricht man von Isoplethensystemen. Die Bilder 9 bzw. 10 zeigen beispielsweise für *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) entsprechende Darstellungen, die auf meßtechnisch ermittelten Daten beruhen [126].

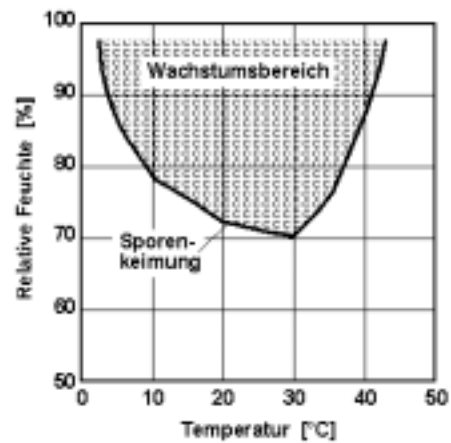


Bild 8 Schematische Darstellung des Wachstumsbereichs für Schimmelpilze in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte; als Vorbereitung für die Festlegung von Wachstumsisoplethen.

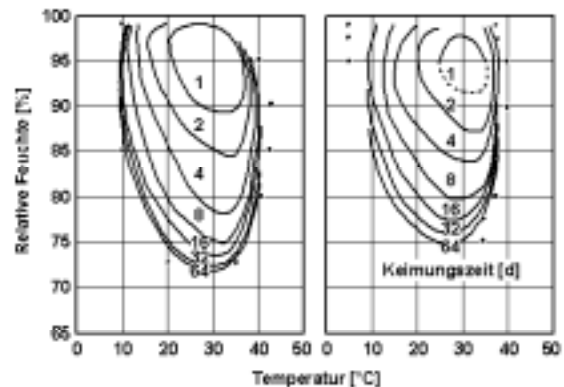


Bild 9 Isoplethensysteme für Sporenauskeimung der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) nach Smith [126].

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.

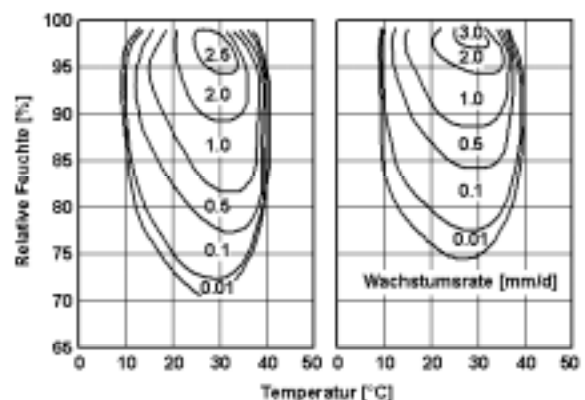


Bild 10 Isoplethensysteme für Myzelwachstum der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte nach Smith [126]. Die Zahlen an den Isolinien kennzeichnen die Wachstumsraten in mm/d.

Substrat

Der Nährstoffgehalt des Substrats, auf dem der Pilz wächst, ist neben der Temperatur und Feuchte die wichtigste Einflußgröße auf Schimmelpilzbildung. Die vorliegenden Untersuchungen zum temperatur- und feuchteabhängigen Pilzwachstum wurden überwiegend im Labor durchgeführt. Als Nährmedium wird 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 Mineralputzen) aus, um mikrobiologisches Wachstum zu ermöglichen.

Neben einigen mineralischen Nährstoffen bzw. Spurenelementen sind kohlenstoff- und stickstoffhaltige Nährstoffe essentiell. Mit Hilfe ihrer Enzyme können Pilze Substrate abbauen und in verwertbare Stoffe umwandeln [88]. Tabelle C gibt einige für Schimmelpilze als Nährstoffe nutzbare Substratbestandteile [14, 102], aufgeteilt nach der Geschwindigkeit der Abbaubarkeit in schnell, einigermaßen schnell sowie langsam abbaubare Substanzen bzw. Moleküle an. 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 [29, 37, 103] umfangreiche Messungen durchgeführt. Diese Untersuchungen ergaben hinsichtlich des Einflusses 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 [37] 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 und wird durch [1] bestätigt. 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 dün-

ne, aber doch relativ substratreiche Schicht zu bilden, auf der es, wenn auch etwas verzögert, zur Sporenauskeimung und erstem Myzelwachstum kommen kann.

Tabelle C Zusammenstellung einiger für Schimmelpilze als Kohlenstoffverbindungen nutzbare Substratbestandteile (modifiziert nach [14] und [102]), aufgeteilt nach der Geschwindigkeit der Abbaubarkeit in schnell, einigermaßen schnell sowie langsam abbaubare Produkte.

Schnell abbaubar	Einigermaßen schnell abbaubar	Langsam abbaubar
Monosaccharide: Glucose, Fructose, Mannose (und andere Hexosen); Xylose (und andere Pentosen)	Stärke (Polymer von Glucose)	Cellulose (mikrofibrilläre Aggregate von Glucosepolymeren)
	Innulin (Polymer von Fructose)	Cutin (Polymer von Fettsäuren und Hydroxylfettsäuren)
organische Säuren, insbes. Fettsäuren	Glycogen (Polymer von Glucose)	Lignin (komplexes Polymer)
	Proteine (Polymere von Aminosäuren)	Suberin (komplexes korkartiges Polymer, enthält hohe Molekulargewichte von Fettsäuren und deren Oxidationsprodukten)
Saccharose, Maltose (und andere Di- und Polysaccharide)	Pectin (Polymer von Galactosäuren)	Chitin (Polymer von Acetyl-Glucosaminen mit Proteinen)
	Lipide (Komplexe von Glycerin und Fettsäuren)	Keratin (über kreuzgebundene Proteine, reich an Schwefel)
	Hemicelluläre kurzkettige Polymere von Glycose, Mannose, Xylose, Harnsäure	Wachse (Ester aus langkettigen Fettsäuren mit langkettigen, einwertigen Alkoholen)
		Andere Kohlenwasserstoffe (z.B.: petrochemische Produkte, wie Öl, Bitumen, Kerosin)

Block [11] gibt in Abhängigkeit von der an unterschiedlichen Materialien wie Leder, Käse, Wolle, Holz, Baum- und Glaswolle angelegten relativen Feuchten eine Wachstumsrate an und konstatiert, daß bei dem verwendeten „Pilzmix“ sich je nach Material unterschiedliche minimale relative Feuchten ergeben, ab denen sich Pilzaktivität einstellt. So wachsen bei einer Temperatur von 30 °C beispielsweise Schimmelpilze auf Leder ab 76 %, auf Holz ab 80 %, auf Wolle generell ab 85 % sowie auf Baum- und Glaswolle ab 92 %. Dies deutet darauf hin, daß sich die entsprechenden temperaturabhängigen minimalen relativen Feuchten, ausgehend von der Kurve, die für Vollmedien gilt, je nach Substrat hin zu höheren Feuchten verschieben.

Kruppa, Veer und Rüden [63] untersuchten das Verhalten von Mikroorganismen auf den Baumaterialien Gipskarton, Kalksandstein und Beton. Dazu wurde die Besiedelung auf diesen Materialien mit Bakterien sowie Schimmel- und Sproßpilzen (Hefen) unter normalen und extremen Bedingungen vorgenommen. Dabei stellten sie fest, daß bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen von 10 °C bis 30 °C schon bei einer relativen Luftfeuchte von 70 % innerhalb von drei Tagen eine Vermehrung von Pilzen auf Baumaterialien erfolgen kann. Allerdings handelt es sich dabei nicht um einen Erstbefall von Schimmelpilzen, sondern um einen gut ausgebildeten Biofilm auf den Baustoffen, der ggf. Nährstoffe in ausreichender Menge enthalten hat.

Der Einfluß verschiedener Baumaterialien wurde auch von Ritschkoff [107] näher untersucht. Die Ergebnisse in Bild 11 stellen beispielhaft den Mould-Index (Möglichkeit zur Beschreibung des Schimmelpilzwachstums; vgl. Ziffer 2.4) in Abhängigkeit von der Zeit in Wochen für unterschiedliche Baustoffe bei 97 % relativer Feuchte und Temperaturen von 15 °C (oben) bzw. 23 °C (unten) dar. Es ergeben sich je nach verwendetem Material verschiedene Expositionszeiten, um einen bestimmten Mould-Index zu erreichen. In den meisten Fällen sind zur Auskeimung von Schimmelpilzen bei mineralischen Baustoffen geringfügig höhere relative Feuchten sowie längere Expositionszeiten im entsprechenden Labor-klima erforderlich im Vergleich zu Bauprodukten aus Holz. Als Begründung werden die organischen Be-

standteile im Holz angegeben. Allerdings treten bei den Untersuchungen von Ritschkoff Ergebnisse auf, die z.T. widersprüchlich erscheinen. So liegt beispielsweise die Wachstumskurve für Zementprodukte in Bild 11 bei 97 % relativer Feuchte und 23 °C (Bild unten) unter jener bei gleicher Feuchte und nur 15 °C (Bild oben). Grant [39] gibt ebenfalls für unterschiedliche Materialien wie Malz-Agar, Tapete, Holz sowie Glas minimale relative Feuchten an, ab denen Wachstum auftritt. Die Messungen fanden jeweils bei 12 °C und 25 °C statt.

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

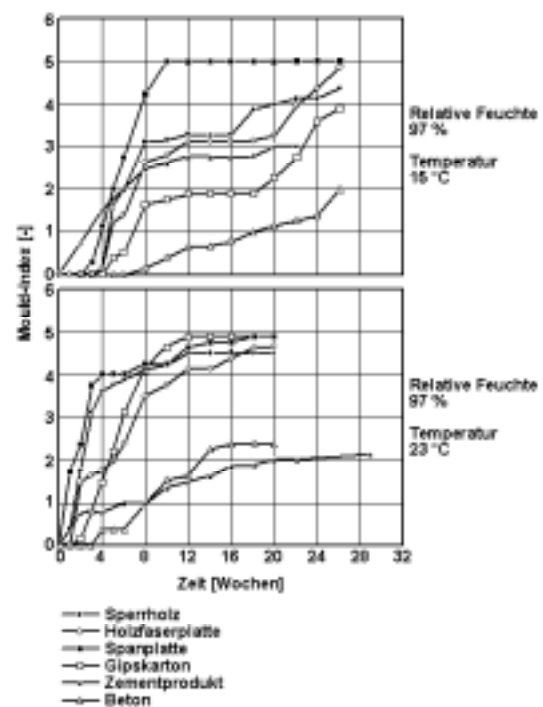


Bild 11 Zeitverlauf des gemessenen Mould-Index in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Baumaterialien.

Oben: Temperatur: 15 °C.

Unten: Temperatur: 23 °C.

Dargestellt wird der meßtechnisch ermittelte Mould-Index für Holzbaustoffe und mineralische Baumaterialien bei einer relativen Feuchte von 97 % und verschiedenen Temperaturen nach Ritschkoff [107]. Der Mould-Index wird in Tabelle 11 erläutert.

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 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 dürfen, bevor eine Schimmelpilzbildung auftritt. Deshalb wurde von Gertis, Erhorn und Reiß [37] der Einfluß von instationären Klimaverhältnissen auf das Schimmelpilzwachstum untersucht. Bild 12 zeigt diese Versuchsanlage für Schimmelpilztests an Bau- und Oberflächenmaterialien. Mit dieser Meßapparatur können die Parameter Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Oberflächenfeuchte und -temperatur variiert werden. Es wurden 7 unterschiedliche Putze, 2 Tapeten sowie 3 Dispersionsfarben untersucht. Die Oberflächentemperatur an den Proben betrug 14 °C bzw. 18,5 °C. Der zeitliche Verlauf der Luftfeuchteschwankungen wurde in folgenden Kombinationen untersucht:

- | | | |
|-----|-----------------|------------------------|
| I | 95 % an 24 h/d | |
| II | 95 % an 6 h/d | sowie 60 % an 18 h/d |
| III | 95 % an 3 h/d | sowie 60 % an 21 h/d |
| IV | 95 % an 2 h/d | sowie 60 % an 22 h/d |
| V | 95 % an 1 h/d | sowie 60 % an 23 h/d |
| VI | 95 % an 0,5 h/d | sowie 60 % an 23,5 h/d |

Die Auswertung der Schimmelpilz-Wachstumsintensität erfolgte nach einer 5-stufigen Klassifizierung, deren Definition Bild 13 angibt. Hierbei wurden die mit Schimmelpilz befallenen Flächenbereiche auf der Materialoberfläche mit Hilfe eines Mikroskops auf Intensität des Wachstums hin bewertet, ohne jeweils die einzelnen Pilzspezies zu bestimmen. Bild 14 zeigt meßtechnisch ermittelte Wachstumsintensitäten auf unterschiedlichen Materialien. Betrachtet man beispielsweise Gips bzw. Gipskarton mit Rauhfasertapete oder verschiedenen Anstrichen, so zeigt sich, daß nach 6 Wochen bei 18,5 °C und einer Feuchtelast von 95 % an 6 Stunden pro Tag sowohl ohne als mit starker Verschmutzung Schim-

melpilzbefall auftritt. Bei kürzeren täglichen Feuchtelasten von 1 oder 3 Stunden tritt Pilzbefall nur bei vorhandener Verschmutzung auf. Die Varianten mit fungizider Ausstattung zeigen keinen Pilzbewuchs.



Bild 12 Fotografische Aufnahme des Schimmelpilz-Prüfstandes des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

Die Anlage für Schimmelpilztests auf Bau- und Oberflächenmaterialien ermöglicht eine Variation der Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Oberflächenfeuchte und Oberflächentemperatur.

Klasse	Merkmale	Pictogramm
0	kein Bewuchs feststellbar	
1	Bewuchs nur unter dem Mikroskop sichtbar	
2	Bewuchs mit bloßem Auge sichtbar	
3	deutlicher Bewuchs	
4	starker Bewuchs	
5	Totale Überwucherung	

Bild 13 Definition der Wachstumsintensitätsklassen, wie sie zur Auswertung der Versuchsergebnisse in [37] herangezogen werden.

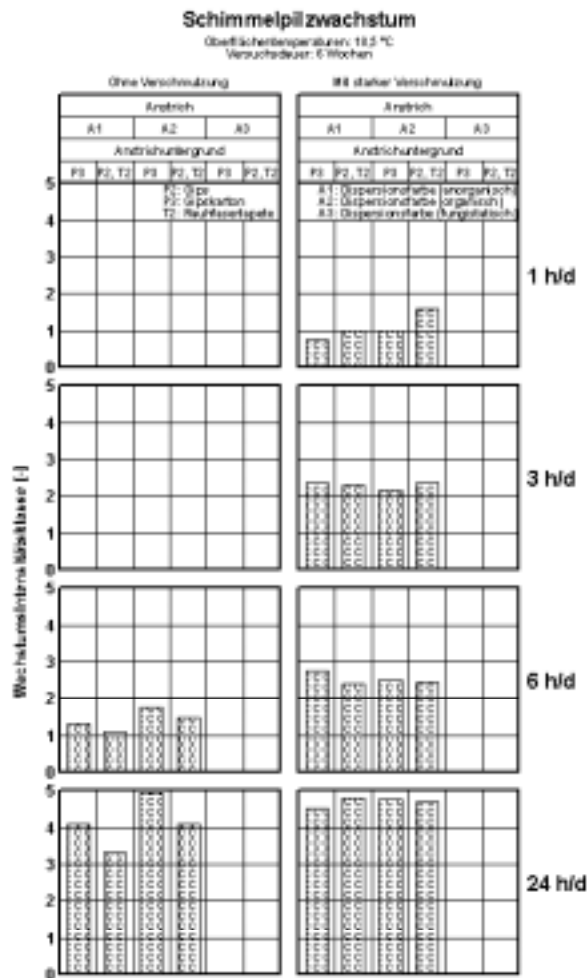


Bild 14 Schimmelpilz-Wachstumsintensität auf unterschiedlichen Anstrichen mit und ohne Verschmutzung bei einer bestimmten Oberflächentemperatur und unterschiedlicher Einwirkzeit nach sechswöchiger Versuchsdauer nach Gertis [37].

Tabelle 5 zeigt im Vergleich zu den Untersuchungen von Gertis [37] eine Zusammenstellung einiger Literaturangaben zur Abhängigkeit des Schimmelpilz

wachstums von der Zeit sowie den entsprechenden Substraten. Die einzelnen Angaben werden im folgenden erläutert:

- Zöld benennt in [147] die Tagesstundenzahl, in der das Schimmelpilzwachstum bei Temperaturen unter 20 °C und relativen Feuchten von über 75 % beginnt. Als ungefährdeter Bereich wird der bezeichnet, an dem, über einen langen Zeitraum, nicht länger als 8 bis 12 Stunden täglich die relative Feuchte von 75 % oder wo nicht mehr als 12 Stunden an 3 aufeinanderfolgenden Tagen die Grenze von 75 % relativer Feuchte überschritten wird. Als gefährdend wird ein Zustand beschrieben, der über einen Zeitraum von mehr als 12 Stunden an 5 aufeinanderfolgenden Tagen diese Grenze überschreitet.
- Gleiche oder etwas geringere Werte für die täglich erforderliche Zeit einer Überschreitung von 75 bzw. 80 % relative Feuchte geben Cziesielski [15] und Richter [105] an. Allerdings wird immer darauf hingewiesen, daß die genannte Bedingung für die relative Feuchte am Wachstumsort über 5 aufeinanderfolgenden Tagen anhalten muß.
- Gemäß Definition des TOW-Wertes (Time-of-wetness: Stunden hoher Feuchte pro Zeiteinheit; siehe Ziffer 2.4) von Adan [1] stellt sich, wenn zunächst auch verzögert, Wachstum ein, wenn relative Feuchte von wenigstens 80 % an 4 Stunden täglich überschritten wird.

Tabelle 5 Zusammenstellung einiger Angaben zu täglichen Dauern von relativer Feuchte und Temperatur, bis Sporenauskeimung und erstes sichtbares Myzelwachstum auftritt, sowie Nennung der entsprechenden Literaturstelle.

Minimale rel. Feuchte [%] ¹⁾	Angaben zur Temperatur [°C]	Zeitdauer [h/d] ²⁾		Bemerkungen	Literaturstelle
		täglich [h/d]	Tage [d] ³⁾		
75	4)	4)	3	verschiedene Materialien	[63]
		12	5		[105]
80	4)	6			[147]
		12	täglich	Gipskarton	[15]
95	14	< 24	6 Wochen	Putze und Anstriche ohne Verschmutzung	[37]
	18,5	6		Putze mit leichter Verschmutzung	
	14	< 24		Dispersionsfarbe, Gipskarton und	
	18,5	1		Rauhfasertapete mit Verschmutzung	

- 1) Ab dieser Feuchte- bzw. Temperaturbedingung wird Wachstum erwartet.
- 2) Ab dieser täglichen Zeiteinheit ist mit Wachstum zu rechnen.
- 3) Anzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit den genannten Bedingungen.
- 4) Es wird keine Angabe gemacht.

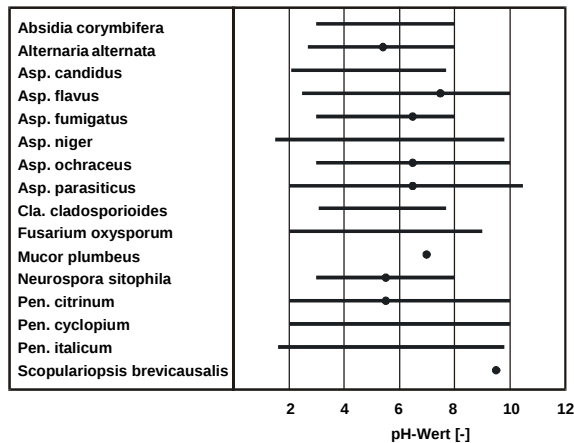


Bild 15 Schematische Darstellung des pH-Wertbereichs für Schimmelpilze an besiedelten Materialoberflächen gemäß Literaturauswertung in Tabelle 4 für repräsentative Schimmelpilze. Die Optima sind jeweils durch Punkte gekennzeichnet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß je nach hygrothermischen Randbedingungen materialspezifisch unterschiedliche Zeitdauern zur Entwicklung von Schimmelpilzen erforderlich sind. Dies bedeutet, daß das neu zu entwickelnde Rechenverfahren zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung neben dem Einfluß verschiedener Substrate von Baustoffen und Verschmutzungen auch instationäre Randbedingungen berücksichtigen muß.

Sonstige Einflußfaktoren

Es bestehen neben den genannten noch weitere Einflußfaktoren auf das Wachstum von Mikroorganismen wie pH-Wert, Salzgehalt des Substrats, Licht, Sauerstoffgehalt, Oberflächenbeschaffenheit und biotische Einflüsse. Zusammenfassend können diese wie folgt beurteilt werden:

pH-Wert

Der pH-Wert stellt für die Beurteilung der Qualität von Nährböden eine weitere Wachstumsvoraussetzung für Schimmelpilzbildung dar. Bild 15 zeigt dazu die Bandbreite dieses Einflußfaktors für unterschiedliche Schimmelpilze auf Basis der Daten in Tab. 4. Während der optimale Wachstumsbereich bei pH-Werten zwischen 5 und 7 liegt, werden insgesamt pH-Werte zwischen 2 und 11 von einzelnen Pilzen toleriert [16]. Die meisten Spezies wachsen in einem Bereich zwischen 3 und 9. Tapeeten und Anstriche weisen beispielsweise einen pH-Wert zwischen 5 (Rauhfasertapete) und 8 (Farbe

neu) auf [10]. Andererseits können verschiedene Baustoffe, wie zum Beispiel 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. Schimmelpilze sind darüber hinaus in der Lage, den pH-Wert ihrer unmittelbaren Umgebung so zu verändern, daß dieser in einem für sie günstigeren Bereich liegt. Das geschieht durch die Aktivierung der „Protonenpumpe“. Der Pilz schüttet verschiedene organische Säuren aus [16, 35] und versauert so den extrazellulären Raum. Aus den genannten Gründen wird der Einflußfaktor pH-Wert bei der Modellentwicklung nur indirekt durch die Bildung von Substratgruppen berücksichtigt.

Salzgehalt des Substrats

Der Salzgehalt des Substrats hat möglicherweise ebenfalls Einfluß auf mikrobiologisches Wachstum. Derzeit sind in der Literatur jedoch keine verwertbaren Daten hierüber vorhanden. Diese Einflußgröße kann daher im folgenden ebenfalls nur indirekt über verschiedene Substratgruppen berücksichtigt werden.

Licht

Licht ist für das Wachstum der Schimmelpilze nicht erforderlich [91]; dies erkennt man daran, daß auch im Inneren opaker Bauteile Pilzbildung auftritt. Warscheid [142] stellte bei der Ausgrabung der Terrakotta-Armee in China fest, daß Licht in einigen Fällen sogar hindernd wirkt. Diese Einflußgröße braucht daher im Sinne einer Wachstumsvoraussetzung nicht berücksichtigt zu werden.

Sauerstoffgehalt

Der Sauerstoffgehalt muß mindestens 0,14 bis 0,25 % betragen [55]. Diese Konzentration liegt auf und in allen Baukonstruktionen vor. Unter diesem Wert können einige der aeroben Pilze sogar auf Gärung umstellen [16, 87]. Ein ausreichender Sauerstoffgehalt als Wachstumsbedingung wird daher als gegeben vorausgesetzt.

Oberflächenrauigkeit

Mikrobielles Wachstum tritt oftmals in Zonen auf, in denen Staubablagerungen verstärkt vorhanden sind. Dies geschieht häufiger auf Materialien mit großer Oberflächenrauigkeit oder an schlecht zugänglichen Stellen wie Ecken und Kanten. Allerdings sind Pilzbildungen auch auf glatten Oberflächen beobachtet worden. Daher ergibt es keinen Sinn, die Rauigkeit als Wachstumsvoraussetzung zu quantifizieren. Häufig wird in Zusammenhang mit Rauigkeit die Porosität bzw. Porenradienverteilung von Baustoffen als Einflußgröße genannt. Deren Wirkung beruht aber ausschließlich auf der Möglichkeit der Feuchtespeicherung im Material. Dieser Effekt wird über die Feuchtespeicherfunktion erfaßt und mithilfe der in Ziffer 2.2 vorgestellten hygrothermischen Berechnungsverfahren berücksichtigt.

Biotische Einflüsse

Unter Biotik versteht man die gegenseitige Beeinflussung der Pilze untereinander bzw. den Wettbewerb mit anderen Mikroorganismen. Da die Vorhersagemethode die Verhinderung der Erstbesiedelung aller Pilze zum Inhalt hat, spielen biotische Faktoren keine Rolle.

2.1.5 Sporenkeimung, Myzelwachstum und Sporulation

Der Lebenszyklus einer Pilzkolonie läßt sich in drei Phasen aufteilen, wie Bild 16 zeigt. Die ersten beiden Lebensabschnitte (Sporenkeimung, Myzelwachstum) zählen zum vegetativen Wachstum, Sporulation zur reproduktiven Phase.

Sporenkeimung

Schimmelpilzsporen sind praktisch überall zu finden, da sie aufgrund einer mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit von nur 0,1 cm/s [102] und durch unterschiedliche Transportvorgänge wie Wind, Mensch und Tier an den Ort ihres Wirkens gelangen. Die Entsendung von Sporen stellt eine optimale Möglichkeit dar, genetisches Material zu verbreiten. Je nachdem um welche Pilzart es sich handelt, können die Sporen ein- oder mehrzellig sein, verschiedene Geometrien annehmen und in unterschiedlicher Anzahl auftreten. Das Innere der Sporen besteht zum größten Teil aus Cytoplasma,

angereichert mit Speicherpolymeren, Fetten und Kohlehydraten. Umgeben wird das zähflüssige Gemisch mit einem Wassergehalt von 10 bis 20 M.-% (bezogen auf Trockengewicht) [49] von einer selektiv permeablen Membran und einer mehr oder weniger starken Zellwand, deren schematische Darstellung Bild 17 zeigt. Die meisten Sporen sind 2 bis 20 µm lang und haben eine Dichte von 1,1 bis 1,4 g/cm³ [102].

Für das Myzel werden von [7, 45, 83] Wassergehalte von 200 bis 400 M.-% genannt. Hinsichtlich Sporen existieren in der Literatur nur wenige Angaben. In [133] werden für den Pilz *Aspergillus fumigatus* Wassergehalte angegeben, die zwischen 70 M.-% bzw. 52 M.-% für eine 4 bzw. 7 Tage alte Spore und 80 M.-% bei Sporenauskeimung liegen. Obgleich nicht genannt wird, welche Umgebungsfeuchten bei diesem Versuch vorherrschten, dürften Sporen nach der Sporulation zunächst trocknen, dann aber zur Keimung wieder Feuchte aufnehmen. Der Wassergehalt hängt zwar von den spezifischen Eigenheiten der Pilzart und dem jeweiligen Alter der Sporen ab [133], kann aber als charakteristische Größe zur Beschreibung der Keimung herangezogen werden. Auch [49] weist darauf hin, daß bei Keimung die Sporen ihr Volumen etwas vergrößern und einen Wassergehalt von maximal 60 bis 80 M.-% (bezogen auf das Trockengewicht) erreichen.

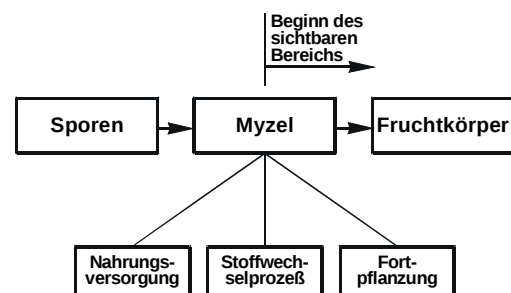


Bild 16 Schematische Darstellung des Ablaufs von Pilzwachstum.

Bei ausreichenden Klimabedingungen keimt die Spore aus. Es bildet sich ein Myzel. Dort finden die Nahrungsaufnahme, die Stoffwechselprozesse und die Fortpflanzung statt. Das Ergebnis der Fortpflanzung ist die Bildung von neuen Sporen (Sporulation) in den Fruchtkörpern.

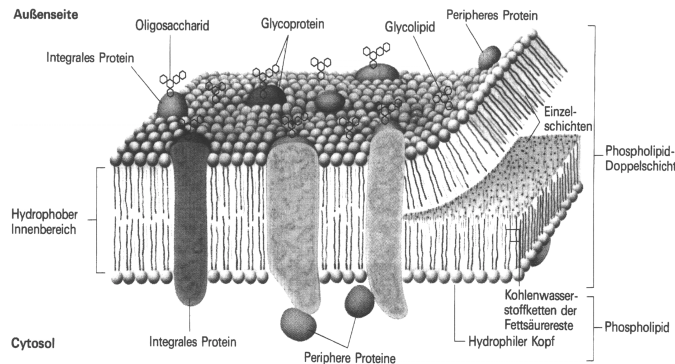


Bild 17
Schematische Darstellung einer biologischen Membran nach [111].

Da Versuche zur Bestimmung der Keimungszeit von Schimmelpilzen relativ aufwendig sind und der Beginn des Wachstums nicht exakt bestimmbar ist, sind genaue Angaben dazu selten zu finden. Systematische Untersuchungen hierzu wurden von Ayerst [4] und Smith [126] auf Vollmedien durchgeführt. Der Beginn der Keimung wurde durch Ausbildung des Keimschlauches definiert. Zur Erkennung wurden die Sporen durch ein, einem Diaprojektor ähnliches optisches System auf einen Schirm projiziert. Die damit gemessenen Keimungszeiten sind in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte in einem Isoplethensystem für Sporenkeimung in Bild 9 aufgezeigt. Die in der Literatur vorgefundenen Angaben zu Sporenauskeimungszeiten verschiedener Schimmelpilze auf optimalem Nährboden (Vollmedien) unterscheiden sich beträchtlich, wie in Bild 18 dargestellt. Dies liegt daran, daß die Versuchsbedingungen nicht standardisiert sind und verschiedene Spezies betrachtet werden [146].

Myzelwachstum

Nach erfolgter Sporenauskeimung beginnt der Pilz bei günstigen Bedingungen sofort mit dem Myzelwachstum. Bei den Angaben der Wachstumsvoraussetzungen wird zwischen den Lebensstadien Sporenkeimung und Myzelwachstum differenziert, wie Tabelle 4 zeigt. Die Feuchteminima für Sporenkeimung sind höher als für vegetatives Wachstum, gefolgt von Sporulation [33, 84, 95, 96, 102, 108, 144]. Dies ist durchaus sinnvoll, da es nur zur Keimung kommt, wenn der Pilz unter diesen Bedingungen auch weiter wachsen kann (Überlebensstrategie).

Zur Beschreibung des Myzelwachstums sind in der Literatur Angaben der Wachstumsraten in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte zu fin-

den, wie Bild 10 für 2 *Aspergilli* zeigt. Weitere derartige Isoplethensysteme zur Beschreibung des Myzelwachstums finden sich auf den folgenden Seiten in den Bildern A bis K. In [63] wird angegeben, daß Schimmelpilze in der Lage sind, große Temperaturüber- oder unterschreitungen dieses Spektrums über einen längeren Zeitraum zu überdauern, d.h. eine einmal vorliegende Kontamination durch Mikroorganismen kann durch ungünstige Bedingungen im Wachstum verlangsamt, im besten Fall zum Stillstand gebracht, aber nicht zerstört werden. Sind die günstigen Bedingungen erneut vorhanden, setzt Wachstum wieder ein. Dies bedeutet, daß zur Beurteilung eines jährlichen maximalen Myzelwachstums bei jeweils günstigen Wachstumsbedingungen die Wachstumszeiten bzw. voranschreitenden Befallsflächen addiert werden sollten.

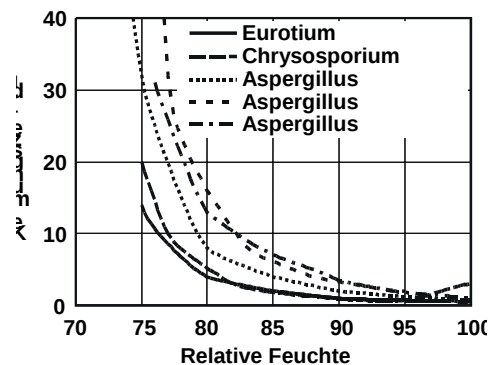


Bild 18
Sporenauskeimungszeiten verschiedener Schimmelpilze in Abhängigkeit von der relativen Feuchte.

Die Angaben variieren je nach Versuchsaufbau, verwendeten Spezies und der anliegenden Temperatur.

Aspergillus repens, auf Gelatine bei 20 °C; Daten nach Snow [127]

Eurotium chevalieri, auf Vollmedium bei 25 °C; Daten nach Pitt [96]

Chrysosporium fasditum, auf Vollmedium bei 25 °C; Daten nach Pitt [96]

Aspergillus restrictus, auf Vollmedium bei 20 °C; Daten nach Smith [126]

Aspergillus versicolor, auf Vollmedium bei 20 °C; Daten nach Smith [126].

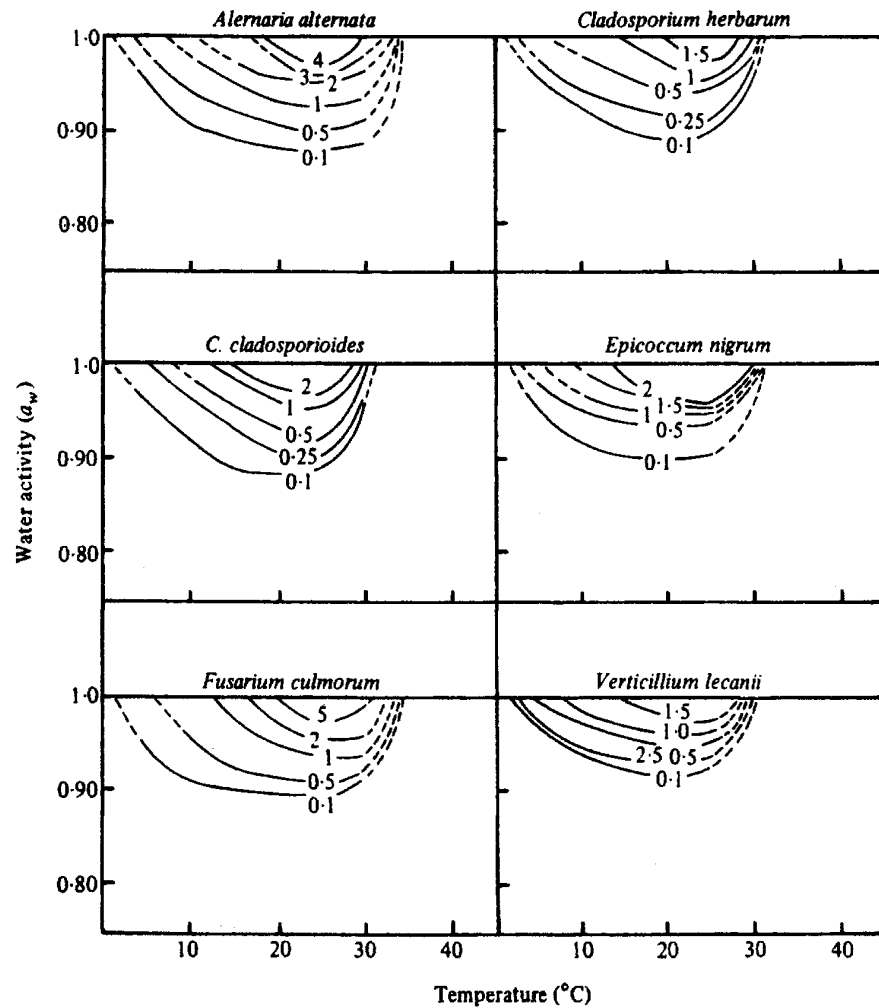


Bild A Isolethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für einige Schimmelpilze nach [89]. Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt.

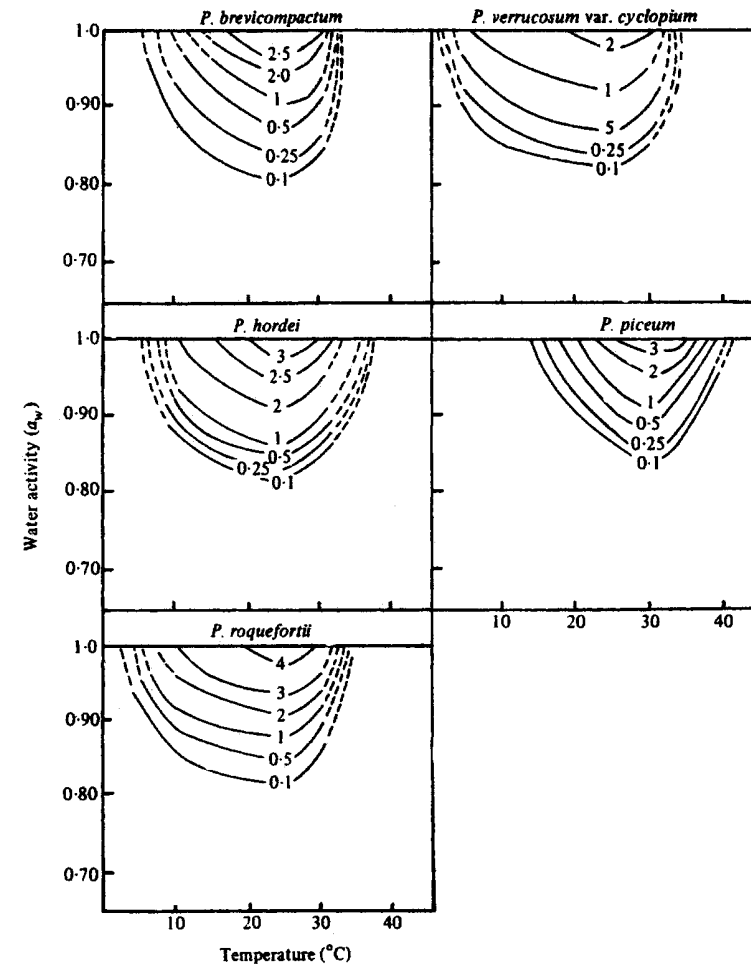


Bild B Isolethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für verschiedene Schimmelpilze der Spezies *Aspergillus* nach [89]. Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt.

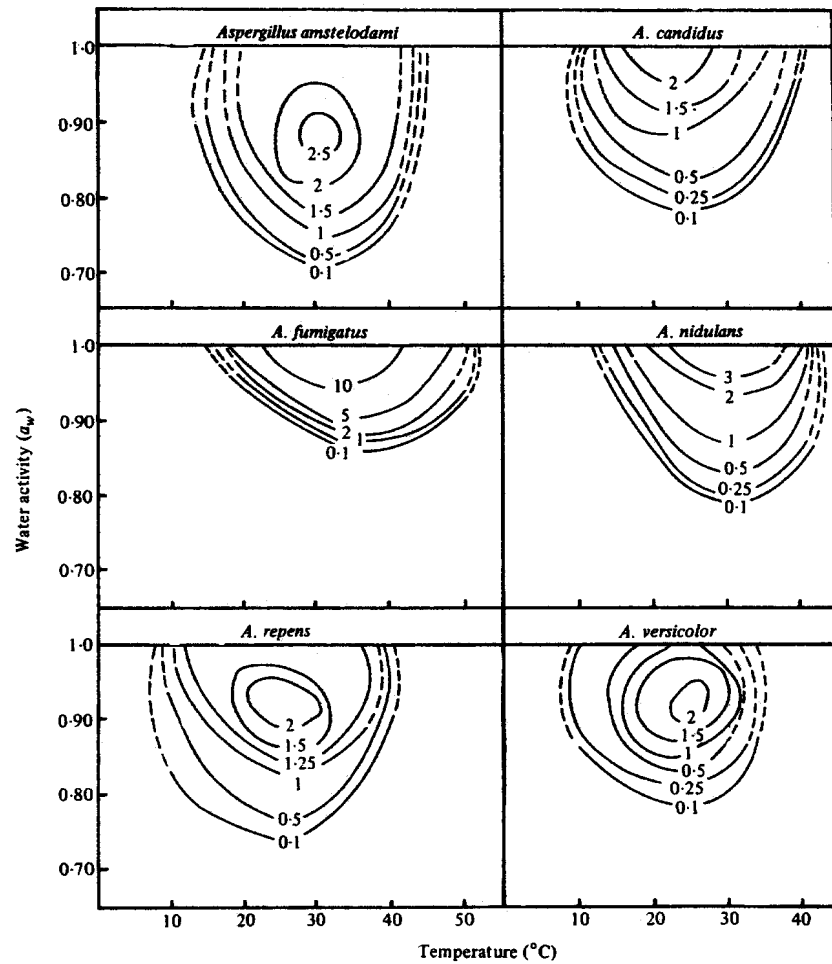


Bild C Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für verschiedene Schimmelpilze der Spezies *Aspergillus* nach [89].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt.

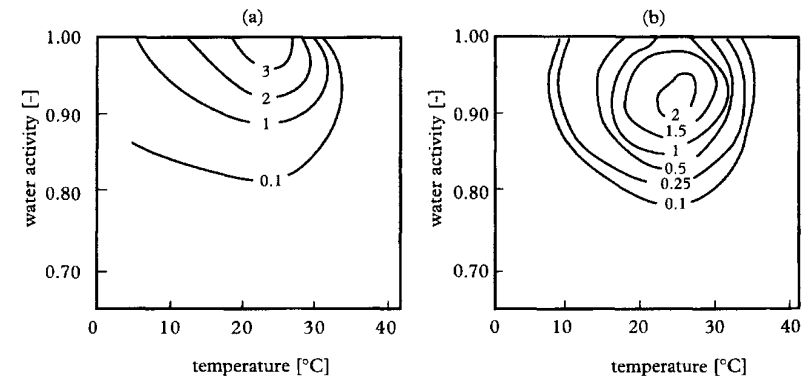


Bild D Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Penicillium martensii* (links) nach [4] und *Aspergillus versicolor* (rechts) nach [89].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt.

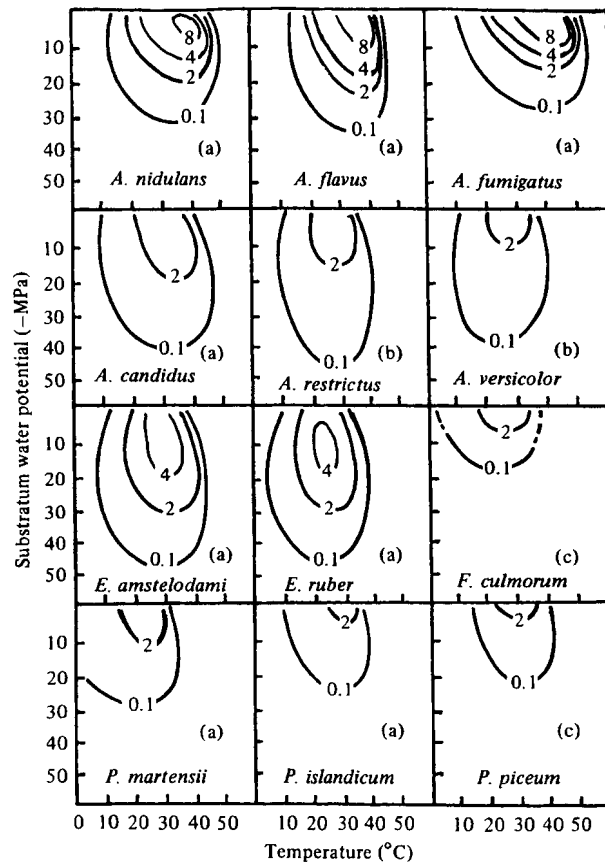


Bild E Isolethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte (angegeben als water potential) für verschiedene Schimmelpilze nach:

- (a) [4]
- (b) [132]
- (c) [89].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt.

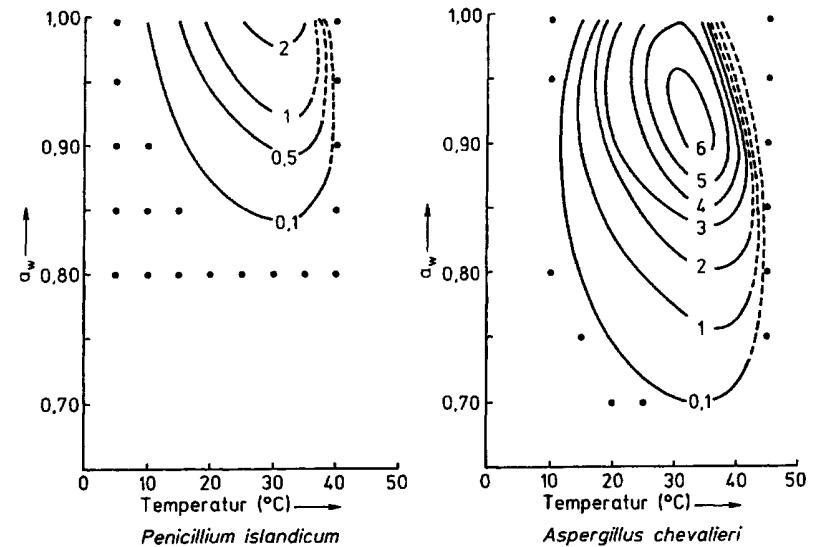


Bild F Isolethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity: a_w) für die Schimmelpilze *Penicillium islandicum* und *Aspergillus chevalieri* nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

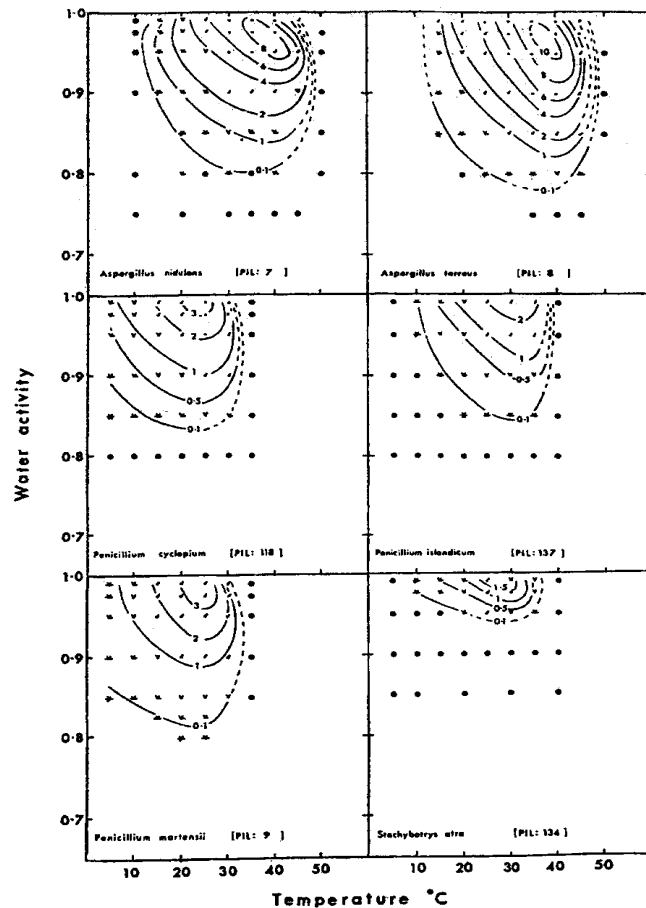


Bild G Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Aspergillus nidulans*, *Aspergillus terreus*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium islandicum*, *Penicillium martensii* und *Stachybotrys atra* nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

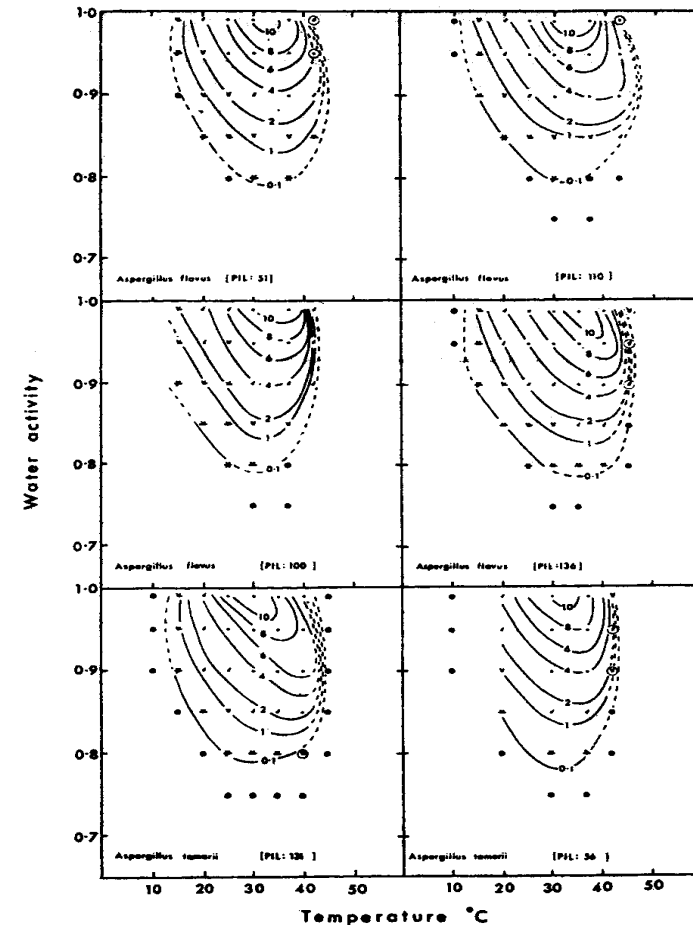


Bild H Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Aspergillus flavus* und *Aspergillus terreus* nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

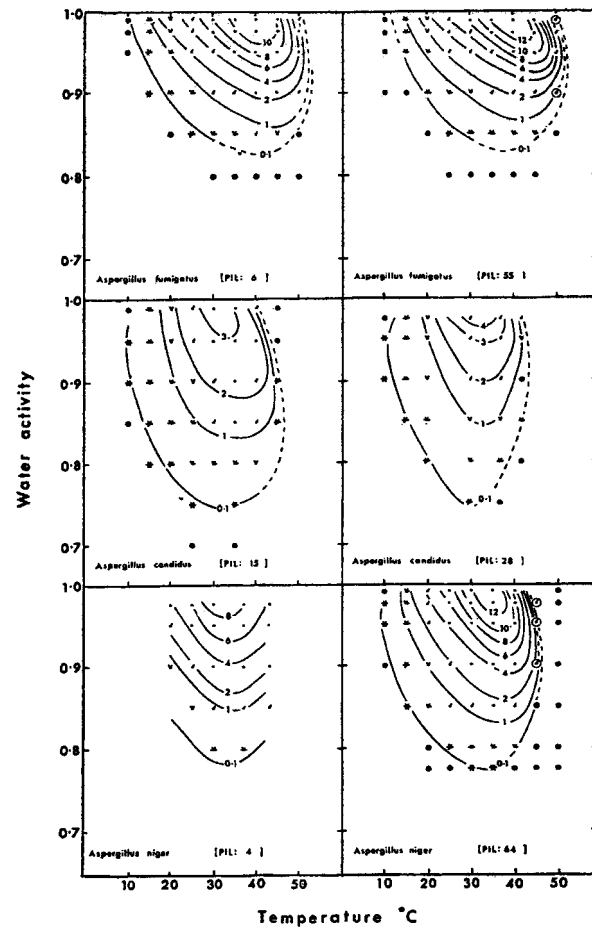


Bild I Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus candidus* und *Aspergillus niger* nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

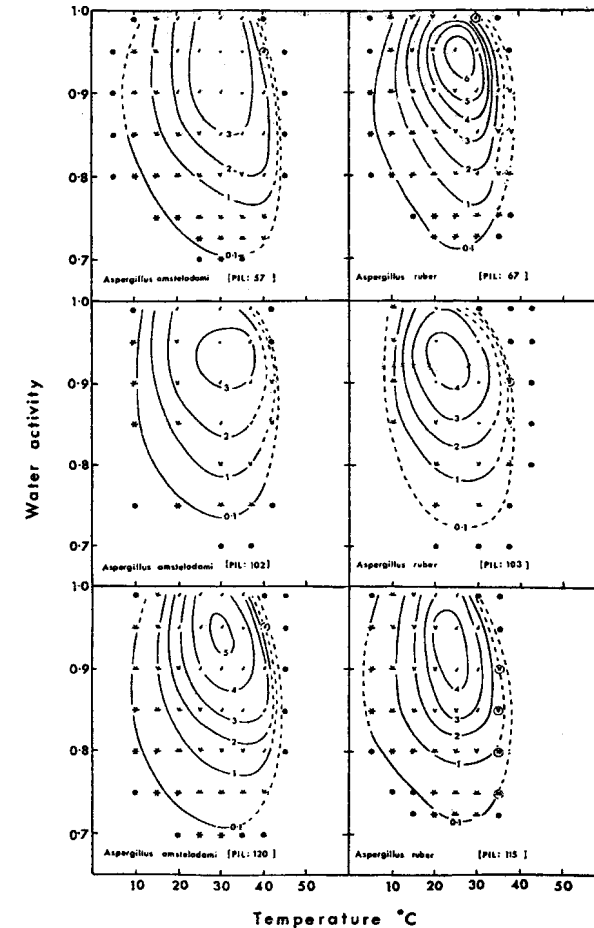


Bild J Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Aspergillus amstelodami* und *Aspergillus ruber* nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

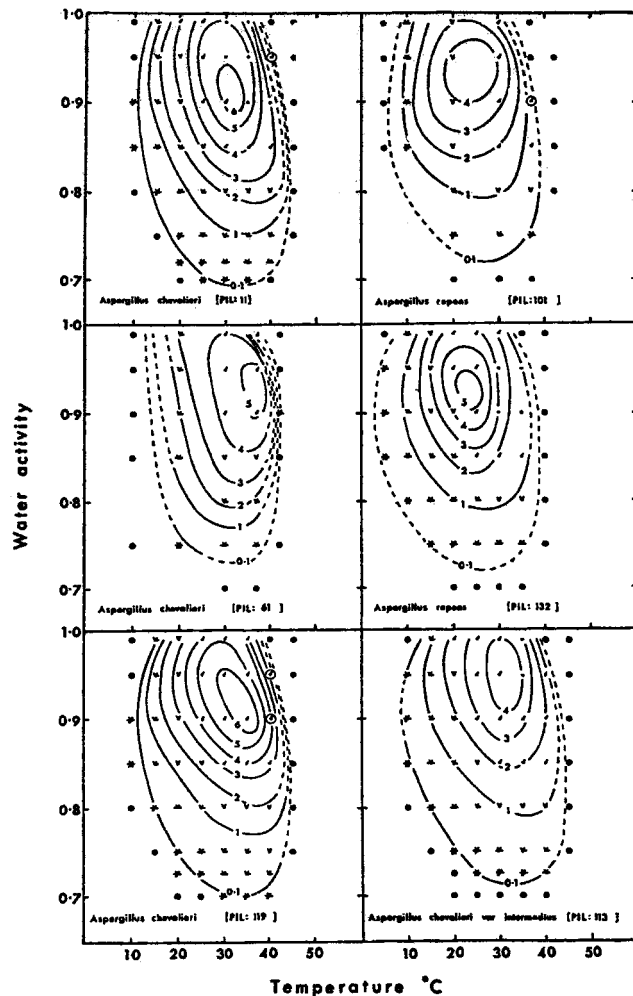


Bild K Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte (water activity) für die Schimmelpilze *Aspergillus chevalieri* und *Aspergillus repens*, nach [4].

Die Zahlen an den Kurven geben die Wachstumsrate in mm/d an. Die Messungen zur Bestimmung der Wachstumsraten wurden jeweils auf optimalen Nährböden (Substratgruppe 0) durchgeführt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen Bedingungen, unter denen selbst nach 95 Tagen keine Sporenkeimung eintritt.

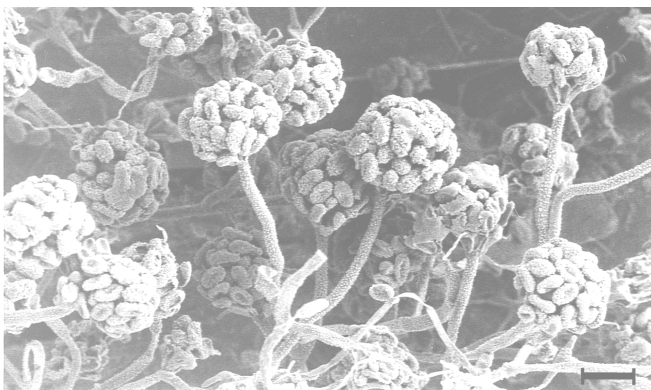


Bild 19 Dichter Bewuchs einer Gipskartonplatte mit Myzel und Konidiosporen von *Stachybotrys* nach Anderson [3]. Der eingezeichnete schwarze Balken im Bild rechts unten entspricht 10 μm.

Sporulation

Die Sporulation (Sporenbildung) dient der Weiterverbreitung der an einen Standort gebundenen Pilze. Bild 19 zeigt dichten mikrobiellen Bewuchs von *Stachybotrys* sp. auf einer Gipskartonplatte. Klar erkennbar sind die Hyphen sowie die Konidiosporen. Sporulation tritt bei ausreichenden Wachstums Voraussetzungen nach einem gewissen Stadium des Myzelwachstums auf. Das Myzel stirbt nach der Sporenbildung nicht ab, sondern wächst weiter und bildet erneut Sporen. Verschlechtern sich die Lebensbedingungen für das Weiterwachsen, tritt die Sporenbildung verstärkt auf. Dies ist eine wichtige Überlebensstrategie der Pilze, die sicherstellt, daß ein Lebenszyklus nicht ohne eine Weiterverbreitung abgeschlossen wird. Dies bedeutet, daß die Aussendung von Sporen verhältnismäßig unabhängig von den Wachstums Voraussetzungen stattfinden kann. Da ferner Sporen ubiquitär sind, braucht, methodisch betrachtet, die Lebensphase der Sporulation bei der Entwicklung einer Vorhersagemethode oder Verhinderungsstrategie bzgl. Schimmelpilzbildung nicht berücksichtigt zu werden.

2.1.6 Wesentliche Ursachen für Schimmelpilze in Gebäuden

Gerichte beschäftigen sich häufig mit Diskussionen um die Ursachen für Schimmelpilzbefall in Gebäuden. Dabei steht meist die Frage im Vordergrund, ob die Bausubstanz, also letztlich der Eigentümer, verantwortlich ist, oder ob falsches Nutzerverhalten vorliegt. Prinzipiell kann Schimmelpilzbildung nur dann auftreten, wenn alle in Ziffer 2.1.4 genannten Wachstumsvoraussetzungen erfüllt sind. Feuchte spielt dabei die wesentliche Rolle. Es ist bekannt (u.a. [134]), daß Feuchte- und Schimmelpilzschäden vor allem hervorgerufen werden durch:

- Feuchteproduktion in Innenräumen,
- Tauwasserbildung durch schlechtes Wärmedämmniveau, insbesondere im Bereich von Wärmebrücken,
- unzureichende Beheizung,
- mangelhaftes Lüftungsverhalten der Bewohner,
- Undichtheiten in der Gebäudehülle,
- Schlagregenpenetration
- sowie Baufeuchte in Konstruktionen.

In diesem Zusammenhang verwundert es nicht, daß Schimmelpilzbefall im Vergleich zu Neubauten vermehrt in Altbauten auftritt, vor allem dann, wenn Fenster erneuert werden, aber keine wärmetechnische Fassadensanierung erfolgt. Dabei kommt es durch die Reduktion des Infiltrationsluftwechsels aufgrund höherer Dichtheit der Fensterfugen zu erhöhten Feuchtelasten in den Räumen, da meist das Lüftungsverhalten nicht verändert wird. Es wird auch bei Mehrfamilien- gegenüber Einfamilienhäusern häufiger Pilzbildung festgestellt [30, 134]. Hinsichtlich der Differenzierung der Räume wird auf Untersuchungen in [28] und [100] zurückgegriffen. Wie Tabelle 6 zeigt, sind mit deutlichem Abstand Schlaf- und Kinderzimmer betroffen und weniger Feuchträume wie Küchen und Bäder.

Schimmelpilzbildung tritt sowohl an Bauteiloberflächen als auch im Inneren von Bauteilen auf. Häufig sind z.B. durch Möbel verstellte Außenwände oder Baukonstruktionen mit Wärmebrücken (hier vor allem auch Fenster) betroffen. Des weiteren sind baufeuchte oder außen dampfdichte Konstruktionen, bei denen sich Feuchte im Bauteil ansammeln kann, sowie Baukonstruktionen mit Innendämmung ge-

fährdet. Darüber hinaus kennt man Schimmelpilzbefall in technischen Anlagen. So können undämmte kühle Rohrleitungen erhöhte Feuchten in ihrer Umgebung verursachen oder es kommt im Inneren der Kanäle von Lüftungsanlagen [91] zu Pilzbildung.

Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze an Bauteiloberflächen

Das Auftreten von Schimmelpilzen auf der Raumseite von Baukonstruktionen hängt von der sich einstellenden Oberflächentemperatur sowie -feuchte ab. Diese werden wiederum beeinflusst vom entsprechenden Wärmedurchgang (beschrieben mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten), eventuellen Wärmebrücken und den Wärmeübergangswiderständen sowie den im Raum herrschenden hygrothermischen Verhältnissen. Unter stationären Bedingungen kann die Temperatur der Oberfläche wie folgt berechnet werden:

$$\vartheta_{Oi} = \vartheta_{Li} - U R_{si} (\vartheta_{Li} - \vartheta_{La}) \quad (2)$$

ϑ_{Oi} [°C] Temperatur der Innenoberfläche

ϑ_{Li} [°C] Temperatur der Raumluft

ϑ_{La} [°C] Temperatur der Außenluft

U [W/(m² K)] Wärmedurchgangskoeffizient

R_{si} [(m² K)/W] Wärmeübergangswiderstand innen

Wärmebrücken

Wärmebrücken sind im Winter durch eine niedrigere raumseitige Oberflächentemperatur als im ungestörten Bereich gekennzeichnet. An diesen Stellen steigt bei konstruktiven Wärmebrücken aufgrund eines

Tabelle 6 Häufigkeit des Auftretens von Schimmelpilzschäden in verschiedenen Räumen nach [134].

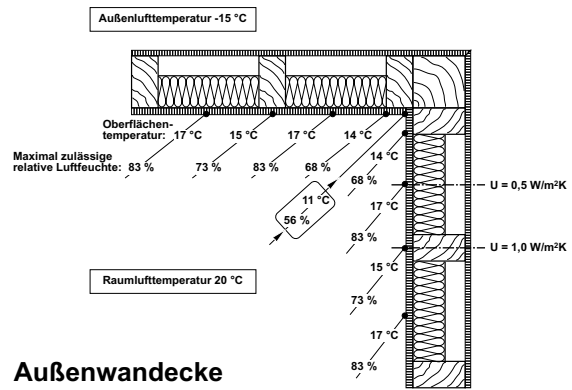
Raum	Häufigkeit in %		
	nach [100]	nach [28]	Mittelwert
Schlafzimmer	40	42	41
Kinderzimmer	30	21	26
Wohnzimmer	11	22	16
Bad	13	2	8
Küche	4	11	8
sonstige (z.B. Flur)	2	2	2

lokal begrenzten erhöhten U-Wertes die relative Feuchte an, im Extremfall bis zum Tauwasserausfall. Dieser Effekt zeigt sich auch bei geometrischen Wärmebrücken, wie Bild 20 am Beispiel einer Außenwanddecke veranschaulicht [60]. Angegeben werden die sich bei einer Außenlufttemperatur von -15 °C einstellenden Innenoberflächentemperaturen im Fall einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem U-Wert an der Dämmung von $0,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ sowie von $1,0\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ im Bereich der Pfosten und die daraus resultierenden maximal erlaubten Raumluftfeuchten, bei deren Überschreitung bei Annahme einer Raumlufttemperatur von 20 °C Tauwasser auftritt. Man erkennt, daß im Bereich der geometrischen Wärmebrücke, also in der Raumecke, die tiefsten Temperaturen (mit einem Pfeil gekennzeichnet) an der Wandoberfläche auftreten.

Erhöhte Wärmeübergangswiderstände

Möbel, Gardinen und dgl. stellen kaum einen Widerstand für die Feuchte dar. Durch verringerten konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergang erhöhen sich aber die Wärmeübergangswiderstände und damit die relativen Feuchten aufgrund der sich einstellenden niedrigeren Temperaturen. In Bild 21 aus [38] sind die Oberflächentemperaturen einer Außenecke mit Durchschnittswärmeschutz bzw. Mindestwärmeschutz in Abhängigkeit vom Abstand zur Außenecke dargestellt. In einem Fall ist die Ecke frei (jeweils obere Linie) und im anderen Fall mit Möbeln verstellt (untere Linien). Rechts dargestellt ist die relative Raumluftfeuchte, ab der es zur Tauwasserbildung kommen kann. Folglich sind hinter Schränken und in Ecken bevorzugt Schimmelpilze anzutreffen, da diese temperaturabhängig schon ab einer relativen Feuchte von deutlich unter 100% wachsen können. Zur Berechnung der Temperaturen nach Gleichung (2) werden in [110] folgende Wärmeübergangswiderstände vorgeschlagen:

Einbauschränke:	$R_{Si} = 1,0\text{ m}^2\text{K/W}$
Freistehende Schränke:	$R_{Si} = 0,5\text{ m}^2\text{K/W}$ und
Gardinen:	$R_{Si} = 0,25\text{ m}^2\text{K/W}$.



Außenwanddecke

Bild 20 Darstellung des Wärmebrückeneffekts in einer Außenwanddecke nach [60].

Angegeben werden die sich bei einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten der Dämmung von $0,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ sowie von $1,0\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ im Bereich der Pfosten ergebenden Innenoberflächentemperaturen bei einer Außenlufttemperatur von -15 °C und die daraus resultierenden maximal erlaubten Raumluftfeuchten, ohne daß bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C Tauwasser auftritt. Man erkennt, daß im Bereich der geometrischen Wärmebrücke, also in der Raumecke, die tiefsten Temperaturen (mit einem Pfeil gekennzeichnet) an der Wandoberfläche auftreten.

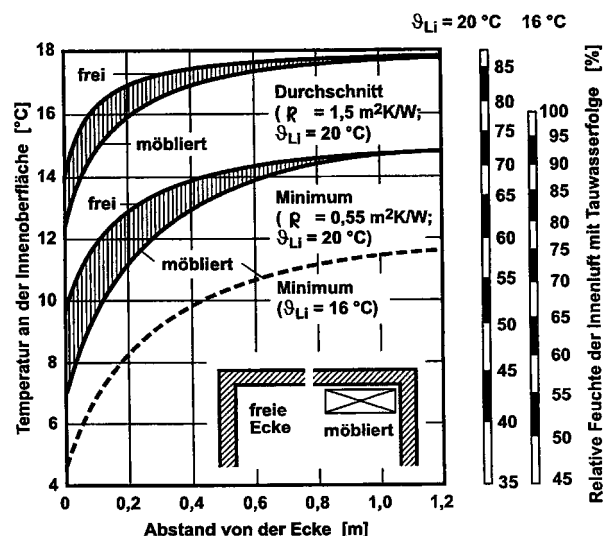


Bild 21 Innenoberflächentemperatur einer Außenwanddecke mit Durchschnittswärmeschutz und mit Mindestwärmeschutz in Abhängigkeit vom Abstand zur Außenecke nach Gertis [38].

In einem Fall ist die Ecke frei, im anderen mit Möbeln verstellt. Rechts dargestellt ist die relative Raumluftfeuchte, bei der es zu Tauwasserbildung kommen kann.

Lage der Heizung

Auch die Lage der Heizung im Raum beeinflusst die Temperaturen, die sich im Raum einstellen. So können sich bis zu 8 K Unterschied zwischen Lufttemperatur und Wandoberflächentemperatur ergeben, wie die Ergebnisse einer im Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführten Messung in [78] zeigen. Besonders betroffen ist die von der Heizung am weitesten entfernte Ecke.

Feuchteproduktion im Raum

Die sich an Außenbauteilinnenoberflächen einstellende relative Feuchte hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Oberfläche ab, sondern auch maßgeblich von der Feuchte im Wohnraum. Diese wiederum wird hauptsächlich geprägt durch den Luftwechsel und die Feuchteproduktion im Raum. Wie Tabelle 7 zeigt, wird die Feuchteproduktion in Gebäuden durch die Bewohner stark beeinflusst.

Lüftung

Die Lüftung des Wohnraumes stellt das wirksamste Mittel dar, um Feuchte aus dem Raum abzuführen [79]. Charakteristische Größe für die Effektivität des Luftwechsels bildet die sog. Luftwechselzahl, welche die Luftmenge, bezogen auf das Raumvolumen, angibt, die pro Stunde ausgetauscht und somit durch Außenluft ersetzt wird. Die verschiedenen Literaturangaben beziehen sich überwiegend auf den hygienisch bedingten Luftwechsel (als Maß gilt die CO_2 -Konzentration). Die hierbei geforderten Angaben variieren stark und liegen zwischen $0,3 \text{ h}^{-1}$ und $1,3 \text{ h}^{-1}$. [44] gibt zur Verhinderung von Schimmelpilzbildung Luftwechselzahlen von $0,15 \text{ h}^{-1}$ bis $0,70 \text{ h}^{-1}$ an. Deren Einhaltung ist nötig, um die erzeugte Feuchte aus dem Raum zu entfernen. Häufig werden, meist bei dichten Fenstern, diese Werte nicht eingehalten. Eine Anleitung zum „richtigen“ Lüften gibt [78]. Vor allem nach kurzen Feuchtelastspitzen sollte gelüftet werden, um akkumulierende Feuchteaufnahme durch sorptive Innenoberflächenmaterialien zu vermeiden.

Tabelle 7 Zusammenstellung der Feuchteabgabe in Räumen bei einer Zimmertemperatur von 20°C .

Feuchtequelle		Feuchteabgabe pro Stunde [g/h]
Mensch, leichte Aktivität		30 – 40
trocknende Wäsche (4,5 kg Trommel)	Geschleudert	50 – 200
	Tropfnaß	100 – 500
Zimmerblumen (z.B. Veilchen)		5 – 10
Topfpflanzen (z.B. Farn)		7 – 15
mittelgroßer Gummibaum		10 – 20
freie Wasseroberfläche (z.B. Aquarium)		ca. 40 ^1

1) Pro Quadratmeter.

Ursachen für Schimmelpilze in Baukonstruktionen

Neben der durch erhöhte Feuchte an Bauteiloberflächen hervorgerufenen Schimmelpilzbildung können im Bauteilinneren andere Ursachen zu hoher Materialfeuchte und damit zu mikrobiellem Wachstum führen. Dazu zählt aus dem Erdreich aufsteigende Feuchte oder drückendes Wasser. Dieses dringt bei einer fehlerhaften Bauausführung vom Erdreich ins Bauteil ein. Meist sind defekte Abdichtungen, schlecht konzipierte Drainelemente, fehlerhaft eingebrachter WU-Beton oder zu feinkörnige Kiesbettungen unter der Bodenplatte daran schuld. Ebenso kann ein nicht gedämmter Fundamentsockel in manchen Fällen für eine Auskühlung der Bodenplatte sorgen, so daß Tauwasser anfällt.

Regen, der durch eine defekte Dachabdichtung eintritt, oder Feuchte aus undichten Rohrleitungen sowie Baufeuchte bzw. Tauwasser kann zu erhöhten Feuchten im Bauteilinneren führen, die je nach Klimarandbedingungen ggf. in die Konstruktion wandern und Schimmelpilze entstehen lassen. Ein typisches Beispiel wird in [77] geschildert. Bei Untersuchungen an einem außen dampfdichten Blechdach kam es infolge sommerlicher Umkehrdiffusion zu Schimmelpilzbildung an der verwendeten Dampfbremse aus Papierfolie (siehe auch Ziffer 5.3).

2.2 Hygrothermische Berechnungsverfahren

Zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung werden die biologischen Wachstumsvoraussetzungen (Soll-Werte) mit den hygrothermischen Bedingungen ver-

glichen. Die Ermittlung dieser „Ist-Werte“ sollte alle einflußnehmenden bauphysikalischen Vorgänge berücksichtigen. Die modernen hygrothermischen Berechnungsverfahren bieten dazu gute Möglichkeiten.

Aus den von Künzel [76] beschriebenen physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports läßt sich ein geschlossenes Differentialgleichungssystem entwickeln, mit dem man das Feuchteverhalten mehrschichtiger Bauteile unter natürlichen Klimarandbedingungen berechnen kann. Die gekoppelten Gleichungssysteme und das numerische Lösungsverfahren, das die Grundlage des ein- und zweidimensionalen EDV-Programms WUFI (Wärme- und Feuchtetransport instationär) bildet, werden kurz erläutert. Anschließend soll auf die erforderlichen Klima- und Materialdaten sowie entsprechende Randbedingungen eingegangen werden.

2.2.1 Grundlagen und Softwaretool

Krus [64] gibt einen Überblick über die Feuchte-transportphänomene, die abhängig vom Aggregatzustand in porösen mineralischen Baustoffen auftreten können. Einige Transporteffekte sind unter praktischen Bedingungen am Bau weniger bedeutsam und werden deshalb nicht berücksichtigt. Folgende Transportmechanismen sind hingegen wesentlich für bauphysikalische Betrachtungen:

- Dampfdiffusion, beruht auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand.
- Oberflächendiffusion stellt den Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe dar.
- Lösungsdiffusion findet nur in nichtporösen Stoffen, z.B. organischen Polymeren statt. Der Wassertransport erfolgt durch An- und Einlagern von Wassermolekülen in die Makromoleküle der Polymere auf der feuchten Seite. Über Quellvorgänge wird das Wasser weitergeleitet.
- Kapillarleitung stellt den Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen dar.

Ableitung der Transportgleichungen

In [76] wird festgestellt, daß zur Berechnung des nichtisothermen Feuchtetransports in porösen Stoffen zwei unabhängige treibende Potentiale erforder-

lich sind. Einfache und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtettriebkkräfte „Dampfdruck“ und „Kapillardruck“. Der schwer meßbare Kapillardruck läßt sich über die Kelvin-Beziehung in die relative Feuchte umwandeln. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotentiale dar, die allgemein bekannt und einfach zu messen sind.

Sowohl für die Wärme als auch für die Feuchte gilt der Erhaltungssatz, d.h. die Änderung der Enthalpie bzw. der Feuchtemenge in einem Volumenelement wird bestimmt durch die Divergenz der Wärme- bzw. Feuchteströme durch die Oberfläche dieses Elements und die Wärme- bzw. Feuchtequellen oder -senken. Für die Wärme ergibt sich daraus folgende Bilanzgleichung, wobei die Wärmequellen oder -senken aus Phasenwechseln resultieren:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla q + S_h \quad (3)$$

H	[J/m ³]	Gesamtenthalpie
q	[W/m ²]	Wärmestromdichte
S _h	[W/m ³]	Wärmequelle oder -senke

Die Feuchtebilanzgleichung läßt sich analog zur Wärmebilanzgleichung wie folgt darstellen, wobei Feuchtequellen und -senken in Baukonstruktionen meist nicht auftreten:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_w + g_v) + S_w \quad (4)$$

w	[kg/m ³]	Wassergehalt des Baustoffs
g _w	[kg/(m ² s)]	Flüssigtransportstromdichte
g _v	[kg/(m ² s)]	Dampfdiffusionsstromdichte
S _w	[kg/(m ³ s)]	Feuchtequelle oder -senke

Resultierendes Gleichungssystem

Die Gleichungen für die Wärmebilanz (3) und die Feuchtebilanz (4) sind durch die Feuchteabhängigkeit der Gesamtenthalpie, der Wärmeleitfähigkeit und des Quellterms in Gleichung (3) sowie durch die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Feuchteströme in Gleichung (4) extrem nichtlinear und aneinander gekoppelt. Daraus folgt für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport:

$$\frac{dH}{d\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla(\delta_p \nabla(\varphi p_{\text{sat}})) \quad (5)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{\text{sat}})) \quad (6)$$

$dH/d\vartheta$ [J/(m³K)]	differentielle Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffs
$dw/d\varphi$ [kg/m³]	differentielle Feuchtespeicherfunktion des Baustoffs
λ [W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
D_φ [kg/(ms)]	Flüssigleitkoeffizient des Baustoffs
δ_p [kg/(msPa)]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
h_v [J/kg]	spezifische Verdunstungsenthalpie des Wassers
p_{sat} [Pa]	Sättigungsdampfdruck
ϑ [°C]	Temperatur
φ [-]	relative Feuchte

Das gekoppelte Gleichungssystem ist mittels des Programms WUFI [76] numerisch lösbar. Die mit dem Programm WUFI ermittelten Feuchte- und Temperaturfelder dienen als Anfangsbedingungen für die weiterführende Berechnung mit dem biohygrothermischen Modell.

Tabelle 8 Zusammenstellung der für eine Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI erforderlichen Daten.

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

2.2.2 Erforderliche Eingabedaten

Eine Zusammenstellung der für eine Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI erforderlichen Datensätze zeigt Tabelle 8. Im wesentlichen ist zunächst die Kenntnis folgender Daten erforderlich:

- Der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter, dessen Elementgrößen dem Schichtaufbau und der zu erwartenden lokalen Klimaeinwirkungen angepaßt werden.
- Die thermischen und hygrischen Stoffkennwerte und -funktionen der am Aufbau beteiligten Baustoffe; d.h. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit, die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung. Die für Berechnungen benötigte Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der Sorptionsisotherme und der Saugspannungskurve zusammen und gibt in Abhängigkeit von der am Baustoff anliegenden relativen Feuchte dessen Wassergehalt an. Die Messung der Sorptionsisotherme ist über die DIN 52 620 [24] geregelt (zukünftig DIN EN ISO 12 571 [22]), aber nur bis zu einer maximalen relativen Luftfeuchte von 95 % technisch möglich. Der darüberliegende Kapillarwasserbereich wird deshalb mithilfe der Saugspannungsmessung erfaßt [64]. Beide Meßergebnisse werden zu einer Feuchtespeicherfunktion zusammengefaßt.
- Die inneren und äußeren klimatischen Randbedingungen sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als außenseitige Klimaparameter dienen Stundenmittelwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte sowie der solaren Einstrahlung, des Normal- oder Schlagregens und der Windgeschwindigkeit. Als typische Verläufe des Außenklimas liegen unterschiedliche, statistisch ausgewertete Jahresverläufe des Klimas vor [72]. Bild 22 zeigt den für die Berechnungen verwendeten Klima-

datensatz [74]. Über das Innenklima wurde von Künzel [73] eine Auswertung von Messungen in einer Vielzahl von Wohnräumen durchgeführt. Daraus werden durchschnittliche Feuchtelasten bei reiner Büronutzung (gering), bei Wohnraumnutzung (normal) und bei hoher Feuchtebelastung, z.B. bei Überbelegung in Sozialwohnungen, definiert. Berechnet man anhand dieser Feuchtelasten die sich im Jahresverlauf einstellenden relativen Raumluftfeuchten, so ergeben sich für die drei Nutzungsfälle die in Bild 23 dargestellten sinusförmigen Verläufe. Die Tiefstwerte liegen dabei immer im Februar und die Höchstwerte im August.

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

2.3 Bestehende Normvorgaben und technische Regeln

Für die Verhinderung von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen existiert in der Literatur eine große Anzahl verschiedener „Leitfäden“ (weit mehr als 100 solcher Veröffentlichungen wurden archiviert), die meist auf die Information der Bewohner zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung abzielen, indem sie Hinweise zu richtigem Lüften oder dem Aufstellen von Möbeln geben. Normative Hinweise findet man in den üblichen Regelwerken zum Wärme- und Feuchteschutz. Speziell auf die Schimmelpilzproblematik ausgerichtete Normen gibt es in Deutschland nicht, obgleich ein entsprechender DIN-Arbeitskreis existiert und ein weiterer Normen-Teil zur DIN 4108 geplant ist. Ausgearbeitete, speziell auf mikrobiellen Befall abgestimmte Sicherheitskonzepte wurden ebenfalls bislang nicht publiziert. Im folgenden werden die einzelnen im Bereich Energieeinsparung und Feuchteschutz üblicherweise herangezogenen Normen, Verordnungen oder technischen Regelwerke hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Vermeidung

von Schimmelpilzbildung kurz beurteilt. Tabelle 9 zeigt dazu eine Zusammenstellung und Bewertung.

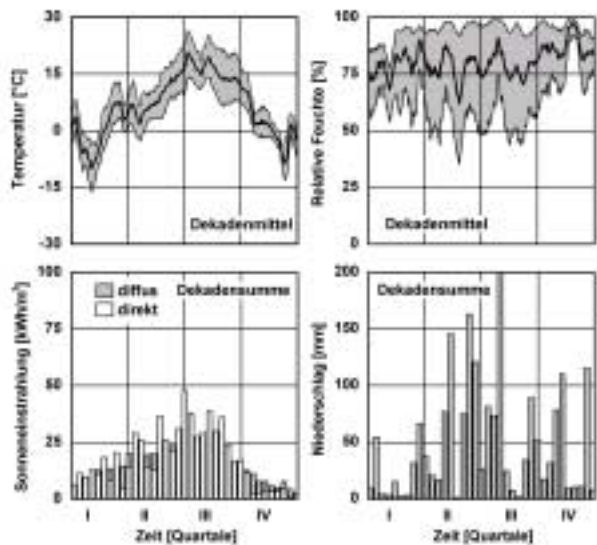


Bild 22 Klimatische Randbedingungen auf der Basis von gemessenen Stundenmittelwerten eines typischen Jahres (Standort Holzkirchen) nach [74].

Die Außenlufttemperatur und -feuchte sind als gleitende Dekadenmittel mit Angabe des täglichen Schwankungsbereichs, die kurzweilige Strahlung und der Niederschlag als Dekadensummen dargestellt.

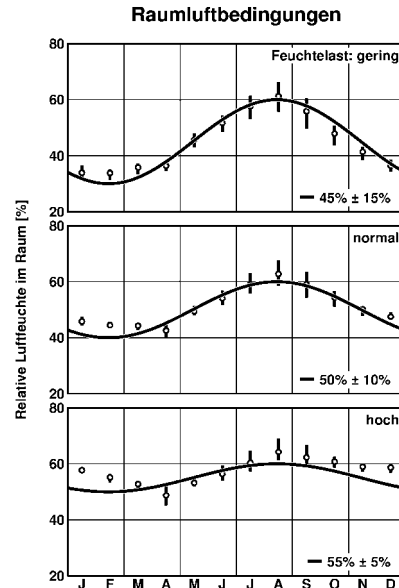


Bild 23 Gemessene und approximierte Verläufe der relativen Luftfeuchte in der Raumluft für 3 unterschiedliche Feuchtelasten nach [73].

Die eingezeichneten Meßpunkte und Balken stellen die bei den Messungen festgestellten Mittelwerte und Streuungen dar. Ferner wird der über das Jahr sich ergebende Mittelwert der relativen Feuchte sowie deren jährliche Schwankung für die Sinus-Approximation genannt.

Tabelle 9 Zusammenstellung und Bewertung der vorhandenen Vorgaben in deutschen Normen, Verordnungen und Richtlinien, die sich auf die Verhinderung von Schimmelpilzbefall beziehen.

Norm	Methodischer Ansatz	Zielsetzung	Kritische Bewertung	Verwendbarkeit ¹⁾
bestehende DIN 4108 [19, 20]	Teil 2: Mindestwärmeschutz	Verhinderung von Oberflächentauwasser	stationäre Methode	nicht verwendbar
	Teile 3 und 5: Glaser-Verfahren	Bewertung von Tauwasser im Regelquerschnitt		
Entwurf DIN 4108 ²⁾ [21]	Angabe von kritischen Feuchten	Verhinderung von Schimmelpilzen	Schimmelpilze wachsen auch ohne Tauwasser	nur überschlägig verwendbar
Wärmebrücken- atlanten (z.B. [85])	Katalogisierung von Wärmebrücken	Verhinderung von Oberflächentauwasser im Bereich von Wärmebrücken		zur Erfassung der Oberflächentempera- tur an Wärmebrücken
Wärmeschutz- verordnung ³⁾ [136]	Energiebilanz	Erfassung des jährlichen Heizwärmebedarfs	kein Bezug zu Schimmelpilzen ⁴⁾	nicht verwendbar
DIN 68 800[25]	Begrenzung der Holzfeuchte	Verhinderung von mikrobiellem Bewuchs	vernünftiger Ansatz	Bewertung der Isoplethen für Holzprodukte
Annex 14 [52]	Angabe von Temperatur und Feuchte	Verhinderung von Schimmelpilzen	keine Abhängigkeit vom Substrat	nur überschlägig verwendbar

¹⁾ Verwendbarkeit hinsichtlich Vorhersage von Schimmelpilzbefall.

²⁾ Neuentwurf DIN 4108, Teil Schimmelpilze.

³⁾ Gilt analog für die EN 832.

⁴⁾ Da die WSchV häufig mit Schimmelpilzbildung in Verbindung gebracht wird, wird sie hier diskutiert.

DIN 4108 – Wärmeschutz im Hochbau

Die DIN 4108 besteht aus mehreren Teilen, wobei im wesentlichen 3 Teile und ein geplanter weiterer Teil zur Schimmelpilzbildung Hinweise geben, nämlich:

Teil 2: Mindestwärmeschutz

Der neue Teil 2 der DIN 4108 [18] fordert auch aus hygienischen Gründen einen gewissen Mindestwärmeschutz. Dazu schreibt diese Norm gegenüber der Fassung von 1981 erhöhte Werte für den Wärmedurchlaßwiderstand (R-Wert) vor. Bei Einhaltung dieser Mindestwerte des Wärmeschutzes werden bei Raumlufttemperaturen und relativen Luftfeuchten, wie sie sich in nicht klimatisierten Aufenthaltsräumen, z.B. Wohn- und Büroräumen einschließlich häuslicher Küchen und Bäder, bei üblicher Nutzung und dementsprechender Heizung und Lüftung einstellen, Schäden durch Tauwasser- bzw. Schimmelpilzbildung im allgemeinen vermieden. Dabei wird als Wachstumsvoraussetzung für Schimmelpilze eine relative Feuchte von 80 % angenommen. Probleme treten dann auf, wenn Möbel vor den Außenwänden stehen oder Zwischentüren offenstehen und Innenluft zwischen verschiedenen Wohnungszonen ausgetauscht wird. In diesem Fall kann es trotz Ein-

halten der Mindestdämmwerte zu Schimmelpilzbildung kommen. Um die verminderte Wärmeübertragung in einem solchen Fall zu berücksichtigen, sind bereits Korrekturvorschläge für den Wärmeübergangskoeffizienten in der Literatur [31] vorhanden.

Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz und Teil 5: Berechnungsverfahren

Die feuchtetechnische Beurteilung der Tauwasserbildung in einem Bauteil, die aufgrund des Dampfdruckgefälles und der Diffusionswiderstände der einzelnen Bauteilschichten auftreten kann, ist nach dem grafischen Verfahren von Glaser möglich [20]. Diese quasistationäre Beurteilungsmethode mit ihren klimatischen „Blockrandbedingungen“ hat sich zur Beurteilung der Tauwassersituation von standardisierten Fällen bewährt. Die nach dem Glaser-Verfahren für die Tauperiode ermittelte Tauwassermenge muß in der Verdunstungsperiode wieder abgegeben werden können. Außerdem darf die Gesamtmenge des Tauwasser 1 kg/m² bzw. 0,5 kg/m² nicht überschreiten. Die erstgenannte Mengenangabe gilt allgemein, die zweite für den Fall, daß Tauwasser an Trennflächen mit kapillar nicht saugfähigen Schichten auftritt, wodurch ein Abtropfen oder Abfließen von Tauwasser vermieden werden soll. Eine Anforderung bei Tauwasserausfall lautet: „Die Baustoffe

(Oberflächen), die mit dem Tauwasser in Berührung kommen, dürfen nicht geschädigt werden (Korrosion, Pilzbefall)“ [19]. Dies deutet darauf hin, daß zwar Überlegungen bzgl. Schimmelpilzbildung eingearbeitet worden sind; ein grundsätzliches Problem dieses Verfahrens liegt aber in der ausschließlichen Betrachtung der Feuchtesituation unter stationären Bedingungen und nur im Regelquerschnitt. Einen weiteren Nachteil der DIN 4108 [19, 20] stellt die Vernachlässigung von Sorptions- und Flüssigtransporteffekten dar. Für Konstruktionen, bei denen diese Effekte dominieren, kann das Glaser-Verfahren deshalb nicht sinnvoll angewendet werden [75], da die gesamten Vereinfachungen den Feuchtehaushalt im Bauteil nur unzureichend widerspiegeln. Zur instationären Ermittlung eignen sich validierte instationäre Rechenverfahren (siehe Ziffer 2.2) besser. Diese finden daher im geplanten Neuentwurf der DIN 4108 im Teil 3 zumindest in Form von Hinweisen auf Effekte und Literatur Berücksichtigung. Ferner wird DIN 4108 Teil 5 durch Teil 3 und andere Normen zukünftig ersetzt.

Entwurfsteil „Schimmelpilze“ zur DIN 4108

Bei der Neufassung der DIN 4108 [21] soll sich ein Teil ausschließlich mit der Vermeidung von Schimmelpilzbildung befassen, wobei folgende Überlegungen diskutiert werden:

- Zunächst werden häufig vorkommende Pilzspezies aufgezählt. Diese sind in Tabelle 1 mit erfaßt.
- Als hauptsächliche Bedingung für das Schimmelpilzwachstum wird die Feuchte angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, daß an der Bauteiloberfläche bei Auftreten von 80 % relativer Luftfeuchte an mindestens 6 Stunden pro Tag Schimmelpilzbildung eintreten kann. Das Optimum für Pilzwachstum wird zwischen 90 % und 98 % relativer Feuchte angegeben. Ebenfalls wird auf xerophile Pilze verwiesen, die ab 65 % gedeihen können.
- Hinsichtlich der Nährstoffanforderungen wird hingewiesen, daß Schimmelpilze genügsam sind und eine oberflächliche Verschmutzung für das Wachstum ausreicht. Der Einfluß der ober-

flächlichen Verschmutzung würde sogar den Einfluß der Untergrundmaterialien überdecken. Es wird also keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Baumaterialien und -oberflächen getroffen.

- Ferner wird beschrieben, welche Maßnahmen erforderlich sind, um eine ausreichende Belüftung der Räume sicherzustellen. Für unterschiedliche Arten von Wohnräumen werden Vorschläge zur sinnvollen Lüftungsregelung gegeben. Dieser Punkt ist in der vorliegenden Entwurfsfassung nicht vollständig ausgearbeitet.
- Des weiteren sind Konstruktionsbeispiele genannt, bei denen Schimmelpilzbildung ausgeschlossen werden kann.

Zusammenfassend kann der Neuentwurf dieses Teils der DIN 4108 zwar als ein relativ weitgehender Norm-Ansatz für die Verhinderung von Schimmelpilzbildung in Deutschland angesehen werden. Für die angegebenen bauphysikalischen und materialtechnischen Anforderungen zur Vermeidung mikrobieller Besiedelung erscheint die vorliegende Entwurfsfassung aber noch nicht ausreichend.

Wärmebrückenatlanten

Die wärmeschutztechnischen Belange bzgl. Wärmebrücken werden in sog. Wärmebrückenatlanten behandelt. In [85] werden beispielsweise für ein dimensionsloses Temperaturdifferenzenverhältnis Θ , das Gleichung (7) angibt, Werte über 0,69 gefordert:

$$\Theta = f_R = (\vartheta_{Oi} - \vartheta_{La}) / (\vartheta_{Li} - \vartheta_{La}) \quad (7)$$

Darin bedeuten:

$\Theta = f_R$	[-]	dimensionsloses Temperaturdifferenzenverhältnis
ϑ_{Oi}	[°C]	Temperatur Innenoberfläche
ϑ_{La}	[°C]	Temperatur Außenluft
ϑ_{Li}	[°C]	Temperatur Raumluft

Bei normaler Nutzung des Raumes kann damit Tauwasserfreiheit auch im Bereich von Wärmebrücken garantiert werden. Dennoch stellt [114] fest, daß dies nicht unbedingt für feuchtebelastete Räume (Küche, Bad) gilt, da üblicherweise von normierten Klimabedingungen in Räumen, also einer Temperatur von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte ausgegangen wird. Ferner muß auch hier beachtet wer-

den, daß Schimmelpilze keinen Tauwasserausfall benötigen, um zu gedeihen. Im Neuentwurf zur DIN 4108 Teil 2 werden, wie oben erläutert, Bedingungen auch für Schimmelpilzbildung genannt.

Wärmeschutzverordnung

Da die Wärmeschutzverordnung [136] immer wieder mit mikrobiellem Bewuchs in Verbindung gebracht wird, soll klargestellt werden, daß die Verordnung auf die Limitierung des maximalen Jahres-Heizwärmebedarfes als Ergebnis einer Energiebilanz [46] abzielt; sie kann daher keinesfalls zur Beurteilung der Schimmelpilzproblematik herangezogen werden.

DIN 68 800 (Holzschutz)

Um Holzbauteile vor tierischen und pflanzlichen Schädlingen – Insekten und Pilze – oder zu hoher Feuchte zu schützen, gibt DIN 68 800 Anforderungen an den vorbeugenden baulichen und chemischen Holzschutz vor. Diese gelten verbindlich für tragende Teile; für nicht tragende stellen sie lediglich Empfehlungen dar. Unter baulichem Holzschutz nach DIN 68 800-2 [25] versteht man alle konstruktiven und bauphysikalischen Maßnahmen, die eine unzuträgliche Veränderung des Feuchtegehalts von Holz- und Holzwerkstoffen oder den Zutritt von holzerstörenden Insekten zu verdeckt angeordnetem Holz verhindern sollen. Dies bedeutet, daß die Feuchte in Holzbauteilen begrenzt wird und somit chemischer Holzschutz vermieden werden kann. Als einzige quantifizierbare Anforderung wird dabei die Gewährleistung einer Holzfeuchte unterhalb von 20 M.-% (bezogen auf das Darrgewicht) genannt. Bei eingebautem baufeuchten Holz mit mehr als 20 M.-% muß die überschüssige Feuchte innerhalb eines Zeitraums von 6 Monaten wieder abgeführt sein. Die Annahme rührt daher, daß man davon ausgeht, daß biologisches Wachstum bei Holzfeuchten unter 20 M.-% nicht auftritt. Dieser Wert stellt also eine kritische Feuchte dar, ab der mit mikrobiologischem Bewuchs gerechnet werden muß. Der überschlägige Grenzwert für den Baustoff Holz kann als ein sinnvoller Schritt in Richtung von materialabhängigen feuchtetechnischen Kennwerten zur Vermeidung von Schimmelpilzen betrachtet werden. Weitere Hinweise zu Angaben in Normen, Regelwerken und Gesetzestexten für die Vermeidung von Schim-

melpilzen auf Bau- und Ausbauholz sind in [58] genannt.

Weitere Angaben

Im Entwurf der DIN EN ISO 13 788 [23] wird als Risikogrenze für den Schimmelpilzbefall das Anhalten einer relativen Oberflächenfeuchte von mehr als „...80 % über einen längeren Zeitraum.“ festgelegt. Hinweise zu kritischen Temperaturen und relativen Oberflächenfeuchten zur Vermeidung von Schimmelpilzen finden sich in [52] und [134]. Die Werte sind vergleichbar mit den Angaben im Entwurfsteil „Schimmelpilze“ der DIN 4108 und als abschätzende Angaben zu verstehen, zumal keine Abhängigkeiten von Materialien genannt sind. Weitergehende Arbeiten, die sich mit den Wachstumsvoraussetzungen, den Möglichkeiten zur Vermeidung von Schimmelpilzen oder deren Vorhersage beschäftigen, sind in Ziffer 2.1.4 bereits dargestellt oder werden in Ziffer 2.4 betrachtet.

Sicherheitskonzepte

Sicherheitskonzepte haben die Aufgabe, potentielle Schäden, die durch eine unsachgemäße Bauweise oder Nutzung entstehen können, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu verhindern. Sicherheitsdenken ist im Ingenieurbau üblich, wenn Leib und Leben gefährdet sind (beispielsweise durch Gebäudeeinsturz). Daher existieren etliche Sicherheitskonzepte im Bereich der Statik und Tragwerkslehre. In den bauphysikalischen Disziplinen, insbesondere hinsichtlich Energie, Wärme- oder Feuchteschutz und vor allem für die Verhinderung von Bauschäden bzw. Vermeidung von Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze fehlen diese.

Cziesielski [15] hat als einziger Sicherheitsüberlegungen für Schimmelpilzwachstum angestellt. Er fordert eine Risikoabschätzung der Mindestoberflächenfeuchtigkeit, ähnlich dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit im Ingenieurbau. Eine Weiterentwicklung über vorgeschlagene Teilsicherheitsbeiwerte hinaus ist bis jetzt allerdings nicht bekannt. Dazu müßten für alle Einzelunsicherheiten statistische Verteilungskurven bekannt sein. Dies scheint nach dem Studium der vorliegenden Literatur aber nicht der Fall zu sein.

Tabelle 10 Zusammenstellung und Bewertung der vorhandenen Schimmelpilzvorhersagemodelle und ihre Verwendbarkeit für biohygrothermische Berechnungen.

Modell	Methodischer Ansatz	Bewertung	Verwendbarkeit
Time of Wetness [1]	Angabe eines Grenzwerts für die relative Feuchte in Stunden pro Tag	keine Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur	zur Festlegung von substratspezifischen Isoplethen
Fuzzy-Logik [91]	mathematische Verknüpfung der Wachstums-voraussetzungen Temperatur und relative Feuchte	keine Berücksichtigung der Substratabhängigkeit	gut als Worst-Case-Abschätzung
Modell von Clarke und Rowan [13, 108]	Isoplethen für unterschiedliche Pilzklassen werden angegeben	keine Aussagen zur zeitlichen Komponente	
Modell von Viitanen und Hukka [137, 138]	Mould-Index wird zeitabhängig mit einer aus Experimenten abgeleiteten Formel ermittelt	gilt derzeit nur für Holzprodukte Sporenkeimung nur pauschal berücksichtigt	zur Festlegung von substratspezifischen Isoplethen

2.4 Vorhandene Schimmelpilzvorhersagemodelle

Um die Verwendbarkeit bestehender Schimmelpilzvorhersagemodelle zu beurteilen, erscheint es erforderlich, die jeweils zugrundeliegenden methodischen Ansätze kurz zu erläutern sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden zu diskutieren. Tabelle 10 gibt einen Überblick und eine kurze Beurteilung der wesentlichen Modelle.

Modell der Time of Wetness (TOW)

Adan [1] beschreibt die Anlauf-, Beschleunigungs- und exponentielle Wachstumsphase (siehe Wachstumskurve in Bild 4) von Schimmelpilzen. Dazu werden Meßergebnisse über Pilzwachstum mathematisch beschrieben. Zunächst wird der Einfluß stationärer Bedingungen erfaßt. Um instationäre Feuchteverläufe auf Bauteilen hinsichtlich Schimmelpilzbildung beurteilen zu können, wird eine Bewertung auf Basis der Time of Wetness vorgeschlagen. Die TOW bezeichnet die Anzahl der Stunden hoher relativer Feuchte (z.B. 80 %) pro Tag, bezogen auf 24 Stunden. Dabei geht man davon aus, daß sich Schimmelpilzwachstum, wenn zunächst auch nur verzögert, einstellt, wenn ein gewisser Grenzwert, angegeben in Stunden pro Tag mit einer relativen Feuchte von z.B. mehr als 80 %, überschritten wird.

Die Auswertung der Experimente zeigt, daß der Pilz *Penicillium chrysogenum* auf Gipsoberfläche bei einer $TOW \leq 0,5$ nur wenig wächst. Ein starker Einfluß ergibt sich hingegen bei Werten über 0,5. Der

Wert der relativen Feuchte während der trockenen Perioden beeinflußt das Pilzwachstum nicht. Bei den Versuchen, die Adan durchführte, um die Auswirkung schneller Wechsel der relativen Feuchte festzustellen, ergab sich, daß auch die Frequenz nahezu keinen Einfluß auf das Pilzwachstum darstellt.

Die oben beschriebene Methode von Adan ist eines der ersten Verfahren, um instationäre hygrothermische Bedingungen bei der Vorhersage von Pilzwachstum zu berücksichtigen. Diese Methode erlaubt es, Myzelwachstum in Abhängigkeit der TOW zu beschreiben. Adan gibt dazu in seiner Arbeit Daten für Gipsoberflächen an. Diese können zur Festlegung der substratspezifischen Isoplethen verwendet werden. Ferner werden auf Basis der TOW auch von anderen Autoren Untersuchungen zu Schimmelpilzbildung auf Baustoffen durchgeführt, wie Tabelle 5 zeigt. Die Angabe des Pilzwachstums in Abhängigkeit von der TOW beruht auf gemessenen Daten und kann daher nicht zur Vorhersage eines Pilzwachstums in Abhängigkeit von beliebigen Temperatur- und Feuchteverläufen dienen. Außerdem sind aus dem in [1] vorgestellten Modell keine physikalischen Begründungen für das Verhalten der Pilze in Abhängigkeit von der TOW ableitbar. Dies gilt insbesondere für die Effekte, die bei schnellen Wechseln der relativen Feuchte auftreten.

Vorhersage auf Basis der Fuzzy-Logik

Bild 24 zeigt die qualitative Beurteilung der Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze in Abhängigkeit

von den Einflußfaktoren. Dabei wird in [91] davon ausgegangen, daß die 3 Wachstumsvoraussetzungen Temperatur, Feuchte und Substrat eine bestimmte Zeitdauer lang simultan gegeben sein müssen, um Schimmelpilzbildung zu ermöglichen. Die funktionalen Zusammenhänge bilden die Grundlage einer Prognosemethode zur Beurteilung und Vorhersage von Schimmelpilzwachstum auf der Basis der Fuzzy-Theorie [2, 112]. Dieses Verfahren wurde für die Beurteilung verschiedener Außenbauteile sowie von Heizanlagen mit offenen Luftkreisläufen bereits erfolgreich angewendet. Es wird in [119] vorgestellt und im folgenden am Beispiel der Beurteilung einer Wandinnenoberfläche erläutert. Zunächst werden ausgehend von den Bauteilkenndaten und abhängig von der Außenlufttemperatur sowie dem Raumklima mithilfe hygrothermischer Rechenverfahren die instationären Temperatur- und Feuchteverläufe auf den raumseitigen Oberflächen berechnet. Für die zur Beurteilung des Schimmelpilzwachstums erforderliche Verknüpfung von Temperatur und Feuchte steht die Fuzzy-Logik zur Verfügung. Sie berücksichtigt die vorhandene Unschärfe bei der Angabe eines für das Wachstum der Schimmelpilze günstigen Feuchtebereichs. Die instationären Funktionsverläufe der einzelnen Einflußfaktoren werden dabei mathematisch verknüpft, wie in Bild 25 für die Verknüpfung von Temperatur und relativer Luftfeuchte dargestellt.

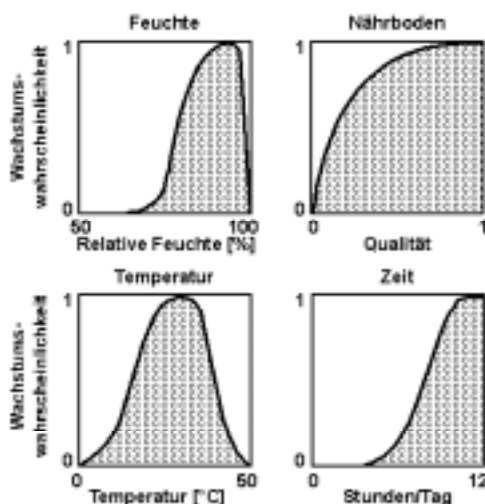


Bild 24 Qualitative Beurteilung der Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußfaktoren nach [91].

Wachstumswahrscheinlichkeit:

0: kein Wachstum

1: optimales Wachstum.

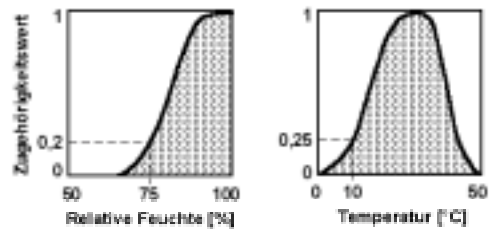


Bild 25 Schematische Darstellung der Zugehörigkeitswerte der Einflußfaktoren Temperatur und relativer Luftfeuchte nach [91].

Die Funktionsverläufe der einzelnen Kenngrößen werden in der Fuzzy-Logik „Zugehörigkeitsfunktionen“ genannt. Sie stellen die Wahrscheinlichkeit dar, mit der das jeweilige Element (Feuchte, Temperatur) zur Menge „Schimmelpilzwachstum“ gehört. Demnach beträgt die Wahrscheinlichkeit für Pilzwachstum bei 0 °C 0; bei 10 °C ergibt sich ein Zugehörigkeitswert von 0,25. Analog wird bei der relativen Feuchte vorgegangen. Daß im Fall einer hinreichenden Wachstumsbedingung beide Bedingungen erfüllt sein müssen, bedeutet in der Fuzzy-Theorie eine UND-Verknüpfung, also eine Minimalfunktion, d.h. daß die kleinere Zugehörigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit beider Faktoren zum Tragen kommt. Ergibt sich beispielsweise bei der Bewertung der Temperatur ein Zugehörigkeitswert von 0,25, hinsichtlich der Feuchte ein Wert von 0,20, wird der letztgenannte als schwächere Wachstumsbedingung übernommen (Bild 25). Daraus werden die Zeiten täglich möglichen Schimmelpilzwachstums ermittelt und mit den in der Literatur vorhandenen Angaben zum Einfluß der Zeit auf das Wachstum (z.B. [37]) verglichen. Üblicherweise ist die betrachtete Zeiteinheit ein Tag, aufgeteilt in 24 Stunden. Für jede Stunde wird eine Wahrscheinlichkeit aus den Randbedingungen (Temperatur und Feuchte) ermittelt, also ein Zugehörigkeitswert angegeben. Für jeden Tag erfolgt die Addition dieser Stundenwerte, d.h. man gibt die Stunden optimalen Wachstums pro Tag an. Beispielsweise bedeuten daher 10 Stunden lang ein Zugehörigkeitswert von 0,2, daß an 2 Stunden ein Zugehörigkeitswert von 1, also optimales Wachstum herrschen würde. Die Rückübersetzung der summierten, verknüpften Werte der Zugehörigkeitsfunktionen nennt man „Defuzzifizierung“. Das Ergebnis ist wieder eine Wahrscheinlichkeit. Hier wird die Qualität, d.h. die Stärke des Wachstums ausgedrückt.

Die Fuzzy-Methode wird dem Anspruch gerecht, eine ja/nein-Entscheidung zu Schimmelpilzbefall zu liefern. Es sind viele Sicherheiten impliziert, so daß eine negative Aussage (kein Befall zu erwarten) mit großer Wahrscheinlichkeit stimmt. Die Fuzzy-Methode ist daher gut geeignet, eine Aussage darüber abzugeben, ob im Zweifelsfall weitere, wirklichkeitsnähere Untersuchungen notwendig sind oder ob bereits in diesem Stadium der Vorsondierung ein Befall ausgeschlossen werden kann. Die Ermittlung der Intensität bei einer positiven Aussage muß allerdings etwas kritischer bewertet werden. Dem Modell zufolge reichen bereits wenige Stunden an geringen Wachstumsvoraussetzungen aus, um 100 % Wachstumsintensität vorauszusagen, was nicht immer mit der Baurealität übereinstimmt. Dies liegt auch daran, daß der Einfluß verschiedener Baumaterialien nicht modellhaft abgebildet wird, sondern davon ausgegangen wird, daß immer (auch aufgrund von Verunreinigungen) genügend Nährstoffe vorhanden sind.

Modell von Clarke und Rowan

Hinter der Bezeichnung ESP-r (Environmental Systems Performance research) verbirgt sich das Modell von Clarke und Rowan, ein klimatechnisches Raummodell, welches an der Universität von Glasgow entwickelt wurde [13, 108]. Zur Vorhersage des Schimmelpilzwachstums werden die benötigten Oberflächentemperaturen und -feuchten an der Baukonstruktion bestimmt und mit den Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen in 6 Klassen, wie in Bild 26 dargestellt, verglichen. Diese Klassen repräsentieren unterschiedliche Feuchtegrenzen der Schimmelpilze, von stark xerophil (Trockenheit liebend) bis stark hydrophil (Feuchte liebend). Vertreter für diese Klassen sind beispielsweise *Aspergillus repens* (stark xerophil), *Aspergillus versicolor* (xerophil), *Penicillium chrysogenum* (mäßig xerophil), *Cladosporium sphaerospermum* (mäßig hydrophil), *Ulocladium consortiale* (hydrophil) und *Stachybotrys atra* (stark hydrophil). Zur Abschätzung des Schimmelpilzbefalls werden die errechneten Klimadaten in Bild 26 eingetragen. Jede Überschreitung der Isolethen wird als Wachstum der entsprechenden Pilze gewertet.

Zwar können mit der von Clarke und Rowan vorgeschlagenen Methode die hygrothermischen Bedingungen an Bauteiloberflächen aus bauphysikalischer Sicht ermittelt werden; der Nachteil der Abschätzung des Schimmelpilzbefalls ist jedoch, daß zeitliche Aspekte nicht berücksichtigt werden. Es wird daher stets von Pilzbildung ausgegangen, wenn eine Überschreitung der in Bild 26 genannten Isolethen vorliegt. Zwar wird hinsichtlich der hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen in einige Pilzklassen unterschieden, nicht aber bzgl. einer möglichen Gesundheitsgefährdung und auch nicht bzgl. der Substratabhängigkeit. Damit ist dieses Modell nur als „Worst-Case“-Abschätzung verwendbar, in dem die unterste der in Bild 26 genannten Kurven einer ultimativen Gesamtbewertung zugrunde gelegt wird.

Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka

Das Modell von Viitanen [137, 138], Ritschkoff [107] und Hukka [51] zur Beschreibung von Schimmelpilzwachstum, beruht auf Laboruntersuchungen an Proben aus verschiedenen Materialien, wobei der Schwerpunkt auf Fichten- und Kiefernholz liegt. Zur Beurteilung des Schimmelpilzwachstums führt Viitanen eine neue Bezeichnung ein, den Mould-Index. Damit wird das Pilzwachstum, gemäß Tabelle 11, in 7 Klassen eingeteilt.

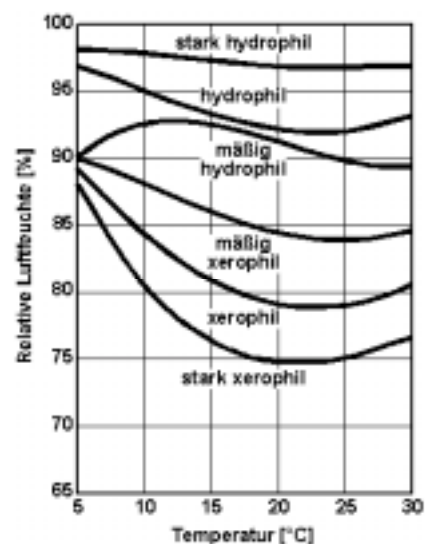


Bild 26 Darstellung der unteren Grenzkurven des jeweiligen Wachstumsbereichs (Isolethen) unterschiedlicher Kategorien von Schimmelpilzen, dargestellt in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte nach Clarke [13].

Für den maximal erreichbaren Mould-Index (MI) gibt Viitanen für Holz in Abhängigkeit von der Feuchte φ folgende Näherungsgleichung an:

$$MI_{\max} = 1 + 7 (\varphi_{\text{krit}} - \varphi) / (\varphi_{\text{krit}} - 100) - 2 ((\varphi_{\text{krit}} - \varphi) / (\varphi_{\text{krit}} - 100))^2, \quad (8)$$

wobei die kritische relative Feuchte mit folgender Formel zu ermitteln ist:

$$\varphi_{\text{krit}} = -0,00267 \vartheta^3 + 0,160 \vartheta^2 - 3,13 \vartheta + 100,0 \quad \text{wenn } \vartheta \leq 20, \\ \text{sonst: } 80 \%. \quad (9)$$

Den Mould-Index beschreibt Viitanen mit folgenden Gleichungen:

$$dMI/dt = k_1 k_2 / (7 \exp(-0,69 \ln \vartheta - 13,9 \ln \varphi + 0,14 W - 0,33 SQ + 66,02)) \quad (10)$$

$$k_1 = 2 / (t_v / t_m - 1) \quad \text{wenn } MI > 1, \text{ sonst: } 1 \quad (11)$$

$$k_2 = 1 - \exp [2,3 (MI - MI_{\max})] \quad (12)$$

$$t_m = \exp(-0,68 \ln \vartheta - 13,90 \ln \varphi + 0,14 W - 0,33 SQ + 66,02) \quad (13)$$

$$t_v = \exp(-0,74 \ln \vartheta - 12,72 \ln \varphi + 0,06 W + 61,50) \quad (14)$$

Dabei bedeuten:

MI	[-]	Mould-Index
ϑ	[°C]	Temperatur
φ	[%]	relative Feuchte
φ_{krit}	[%]	relative Luftfeuchte, ab der Schimmelpilzwachstum auf den Holzproben möglich ist
$k_{1,2}$	[-]	Korrekturfaktoren zur Anpassung des Modells an instationäre Bedingungen
t	[d]	Zeit
t_m	[h]	Zeitdauer, bis zum Erreichen des Mould-Index 1
t_v	[h]	Zeitdauer bis erstes Myzelwachstum mit dem Auge sichtbar wird
SQ	[-]	Oberflächenqualität (0 = nach Trocknung gesägt, 1 = kammergetrocknet)
W	[-]	Holzart (0 = Kiefer, 1 = Fichte)

Tabelle 11 Mould-Index in Abhängigkeit von der prozentualen Flächenbelegung und verbale Charakterisierung.

Mould-Index	Flächenbelegung in [%]	Charakterisierung
0	0	kein Wachstum
1	≤ 1	geringes Wachstum, nur unter dem Mikroskop sichtbar
2	≤ 10	moderates Wachstum, nur unter dem Mikroskop sichtbar
3	≤ 30	visuell sichtbares Wachstum
4	≤ 70	
5	> 70	
6	100	

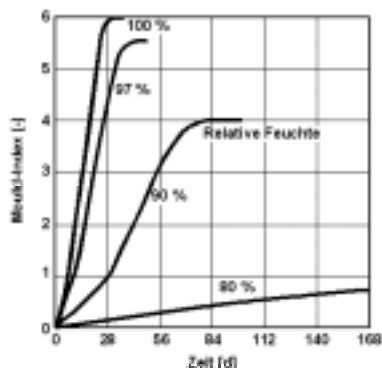


Bild 27 Zeitverlauf des berechneten Mould-Index in Abhängigkeit von der relativen Feuchte. Dargestellt wird der Mould-Index für Kiefernholz bei 20 °C nach Viitanen [138]. Der Mould-Index wird in Tabelle 11 erläutert.

Bild 27 zeigt rechnerische Ergebnisse auf Basis dieser Gleichungssysteme. Es wird darin der Mould-Index beispielsweise für Kiefernholz bei einer Temperatur von 20 °C und konstanten relativen Feuchten in Abhängigkeit von der Zeit angegeben. Man stellt fest, daß es je nach Feuchte und Temperatur nur zu einem bestimmten maximalen Mould-Index kommt. Ferner wird aus den Untersuchungen in [51, 107, 137, 138] erkenntlich, daß die temperaturabhängige Grenze der relativen Feuchte, bei der gerade noch Mould-Index 1 erreicht wird, bei etwa 80 % liegt.

Es wurden auch Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum unter wechselnden Klimabedingungen durchgeführt. So zeigt Bild 28 den Einfluß von schnellen (Stunden; Bild oben) und langsamen Fluktuationen (Tagen; Bild unten) der relativen Feuchte auf den zeitlichen Verlauf des Mould-Index bei einer jeweils konstanten Temperatur von 20 °C. Man erkennt, daß, im Unterschied zu konstanten Bedingungen, also einer TOW von 1, bei geringeren TOW-Werten längere Zeiten erforderlich sind, um einen entsprechenden Mould-Index zu erreichen. Dies stimmt qualitativ mit den Ergebnissen von Gertis [37] überein und ist plausibel.

Das Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka wurde speziell für Holz entwickelt und wird derzeit für einige Bauprodukte erweitert. Es werden Gleichungssysteme zur rechnerischen Bestimmung der Entwicklung des Mould-Index angeboten. Ausgehend von der relativen Feuchte und der Temperatur kann mit diesem Verfahren die zeitliche Entwicklung des Pilzwachstums ermittelt werden. Das Verfahren funktioniert gut für stationäre hygrothermische Randbedingungen. Um den Einfluß instationärer Klimarandbedingungen – vor allem trocknende Zeitabschnitte – auf das Schimmelpilzwachstum abzuschätzen, wird zwar eine Näherungsformel angegeben, ein physikalisches Modell liegt dem Verfahren aber nicht zugrunde [146]. Es werden ausschließlich Anpassungen an Meßergebnisse vorgenommen. Die vorliegenden Ergebnissen können aber, wie in Ziffer 3.3.1 beschrieben, zur Erstellung der substratspezifischen Isoplethensysteme herangezogen werden.

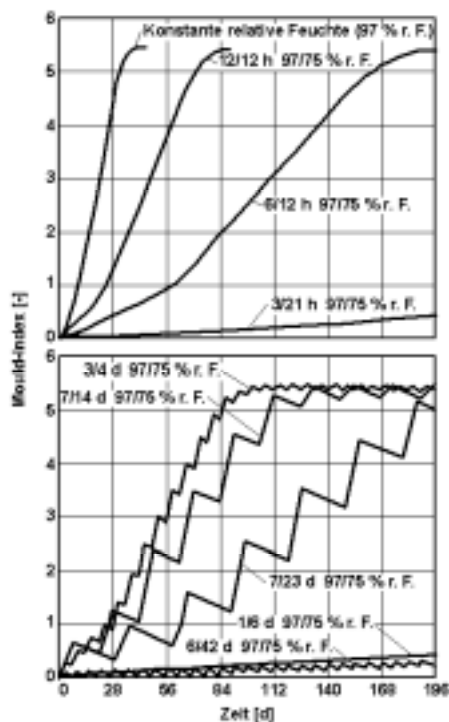


Bild 28 Zeitverlauf des berechneten Mould-Index in Abhängigkeit von verschiedenen Klimarandbedingungen.

Oben: Schnelle Wechsel (Stunden).

Unten: Langsame Wechsel (Tage).

Dargestellt wird der Mould-Index für Kiefernholz bei 20 °C und fluktuierenden Klimarandbedingungen nach Ritschkoff [107]. Die Zahlenangaben an den Kurven stellen die Klimarandbedingungen dar. Der Mould-Index wird in Tabelle 11 erläutert.

3. Neue Ansätze zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung

Schimmelpilze besitzen hinsichtlich der Wachstums-voraussetzungen (Temperatur und relativer Feuchte) im Vergleich zu anderen Mikroorganismen ein breites Spektrum und übernehmen daher häufig die Rolle des Erstkolonisierers. Außerdem bildet ihr Myzel u. U. die Nahrungsgrundlage für andere Kleinstlebewesen (z.B. Milben), die ihrerseits ein weiteres gesundheitliches Risiko und Schadenspotential darstellen können [106, 141]. Um mikrobiellen Bewuchs in Gebäuden zu verhindern, reicht es deshalb, sich auf Schimmelpilze zu konzentrieren und die Vorhersagemethoden darauf abzustellen. Zunächst werden im folgenden die für das Modell wichtigen Schimmelpilzspezies festgelegt und in Gefährdungsklassen für mögliche Gesundheitsgefahren eingeteilt. Nach einer Analyse und Bewertung der Einflußfaktoren auf Schimmelpilzbildung und Angabe der wesentlichen Parameter erfolgt die Beschreibung der beiden Teile des Vorhersagemodells, nämlich des Isoplethenmodells und des biohygrothermischen Modells.

3.1 Auswahl von Schimmelpilzen und Einteilung in Gefährdungsklassen

Bei der Ermittlung der Wachstumsvoraussetzungen bzgl. Temperatur und Feuchte sind Schimmelpilze zu betrachten, die am Bau anzutreffen und gesundheitsgefährdend bzw. schädigungsrelevant sind. Um eine Auswahl verschiedener Schimmelpilzspezies zu erreichen, deren Daten für die Vorhersagemodelle verwendet werden sollen, sind in Tabelle 1 alle im Bau vorgefundenen Pilze (etwa 200 Spezies) zusammengestellt worden. Ferner wurden in dieser Übersicht Angaben gemacht, ob Gesundheitsgefahren bei einzelnen Spezies vorliegen [55]. Im weiteren werden nur solche Pilze berücksichtigt, die beide Kriterien (gesundheitsgefährdend bzw. schädigungsrelevant und „in Gebäuden anzutreffen“) erfüllen.

Eine mögliche Gesundheitsgefahr für den Menschen und eine verwertbare Einteilung von Schimmelpilzen in Gefährdungsklassen liegen in der Literatur nicht vor. Daher erfolgt in Abstimmung mit Warscheid [142] eine Eingruppierung in 3 unterschiedliche Ge-

fährdungsklassen auf Basis der bisher nicht veröffentlichten Vorschläge des Landesgesundheitsamtes (LGA) Stuttgart [81] folgendermaßen:

- A. Pilz oder Stoffwechselprodukte sind erheblich gesundheitsgefährdend und dürfen in einem Wohnraum nicht auftreten. Entspricht in den meisten Fällen der LGA-Wichtung 3.
- B. Pilz oder Stoffwechselprodukte sind bei längerer Exposition in Räumen gesundheitsgefährdend (d.h. pathogen) oder besitzen ein allergenes Potential.
- C. Pilz ist nicht gesundheitsgefährdend, ein Bewuchs führt aber ggf. zu wirtschaftlichem Schaden.

Man erkennt aus Tabelle 1, daß nur für verhältnismäßig wenige Pilzspezies Daten vorhanden sind. Tabelle 4 zeigt für diese Spezies die entsprechenden Angaben zu den minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstumsvoraussetzungen hinsichtlich Temperatur, relativer Feuchte und pH-Wert. Die aufgelisteten Werte reichen aus, um für die 3 Gefährdungsklassen untere Wachstumsvoraussetzungen für Sporenkeimung und Myzelwachstum angeben zu können. Bei der Einteilung der Pilze in die 3 Gefährdungsklassen in Tabelle 4 wird deutlich, daß sich die Werte von Klasse C nur unwesentlich von B unterscheiden. Daher reicht es aus, im Isoplethenmodell nur in die Gefährdungsklassen A und B/C zu unterscheiden.

Die Unsicherheiten der entsprechenden Datensätze für einen Pilz werden mit etwa 2 K bzw. 2 % relative Feuchte angegeben [55]. Vergleicht man die Angaben in verschiedenen Literaturstellen zu einem bestimmten Pilz miteinander, ergeben sich allerdings noch größere Unterschiede. Die Zusammenstellung der in Tabelle 4 dargestellten Wachstumsvoraussetzungen berücksichtigt daher aus Sicherheitsaspekten die breiten Schwankungen der Literaturangaben für jede Pilzspezies in der Weise, daß stets die kleinsten Minimalwerte und die größten Maximalwerte verwendet werden.

3.2 Einflußfaktoren und Bewertung

Eine Aufstellung der Parameter, die das Wachstum von Schimmelpilzen beeinflussen, zeigt Tabelle 12. Eine Bewertung dieser Einflußfaktoren ergibt, daß sowohl Temperatur und Feuchte als auch die Nährstoffverfügbarkeit im Substrat die entscheidenden Einflüsse auf das Pilzwachstum darstellen. Diese drei für das Wachstum erforderlichen Voraussetzungen müssen gleichzeitig für eine bestimmte Zeitperiode vorhanden sein. Dies stellt die Begründung dar, weshalb die Zeit mit zu den wichtigsten Einflußgrößen gehört und daher eine instationäre Betrachtung der Schimmelpilzbildung erforderlich ist.

Die Einflußgrößen Licht, Sauerstoff und Sporenflug werden dahingehend bei der Vorhersage berücksichtigt, in dem stets von optimalen Bedingungen ausgegangen wird. Weil auch auf glatten Oberflächen Pilze wachsen, wird der Einfluß der Oberflächenrauigkeit nicht betrachtet. Da das Modell auf die generelle Vermeidung von Pilzbefall abzielt, spielt es keine Rolle, ob eine Spezies durch andere verdrängt wird. Biotische Einflüsse werden daher nicht berücksichtigt.

Tabelle 12 Zusammenstellung und Bewertung der Einflußfaktoren auf das Schimmelpilzwachstum und deren Berücksichtigung in den Vorhersagemodellen.

Einflußfaktor	Bewertung	Berücksichtigung der Einflussfaktoren im		
		Isoplethenmodell	instationäres Modell (biohygrothermisches Modell)	
Feuchte	Wesentlichstes Wachstumskriterium	Kombination von Temperatur und relative Feuchte mittels Isoplethen	Diffusionskinetik, d.h.: Feuchtespeicherfunktion s_d -Wert der Sporenwand	
Temperatur	Starke Beeinflussung		Zeitangaben in den Isoplethen enthalten	instationärer Verlauf der Wassergehalte in den Sporen
Zeit				
Nährstoffverfügbarkeit	Einfluß durch Substanz und Verschmutzung	Substratgruppen	indirekte Berücksichtigung durch Verwendung der Substratgruppen zur Bestimmung des Grenzwassergehalts	
Salzgehalt		indirekt in den Substratgruppen enthalten		
pH-Wert	Wird vom Pilz selbst verändert			
Licht	Wachstum ohne Licht möglich	keine Berücksichtigung im Modell; wird stets als ausreichend vorhanden betrachtet		
Sauerstoff	Immer vorhanden			
Sporenflug	Sporen sind ubiquitär			
Oberflächenrauigkeit	Einflüsse gering	über die Substratgruppen enthalten		
Biotik	Einflüsse vorhanden	Berücksichtigung mittels LIM		

Wie die Auswertung der Literatur ergibt, beeinflussen Temperatur und relative Feuchte die Wachstumsvoraussetzungen auf verschiedene Weise, nämlich:

- Je nach Pilzspezies ergeben sich unterschiedliche Wachstumsvoraussetzungen. Im Modell werden daher für die beiden Gefährdungsklassen A bzw. B/C temperaturabhängig immer die geringsten Feuchten herangezogen.
- Da sich die Wachstumsvoraussetzungen auch bei den einzelnen Lebensphasen unterscheiden, werden für Sporenkeimung und Myzelwachstum jeweils eigene Bewertungskurven aufgestellt. Sporulation wird im Modell nicht berücksichtigt, da gute und schlechte Wachstumsbedingungen den Pilz gleichermaßen zum Sporulieren bringen.
- Zur Berücksichtigung des erheblichen Einflusses des Substrates (Nährstoffverfügbarkeit oder Salzgehalt im Baumaterial bzw. in der Verschmutzung sowie der entsprechende pH-Wert) auf das Pilzwachstum werden sog. „Substratgruppen“ gebildet.

3.3 Neue rechnerische Methode

Im folgenden werden die beiden zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung verwendeten aufeinander aufbauenden Modelle dargelegt:

- Isoplethenmodell: Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums auf Basis sog. Isoplethensysteme, die für verschiedene Gefährdungsklassen sowie einzelne Substratgruppen gelten und somit eine Berücksichtigung des Substrateinflusses bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung ermöglichen. Ein Isoplethensystem benennt dabei die Sporenauskeimungszeiten oder das zu erwartende Myzelwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Feuchte.
- Biohygrothermisches Modell: Berechnung des Feuchtehaushalts (Wasseraufnahme und -abgabe) einer Spore mithilfe eines instationären biohygrothermischen Rechenverfahrens. Damit

kann ermittelt werden, bei welchen klimatischen Randbedingungen es zur Sporenauskeimung kommt. Um die dafür erforderlichen physikalischen Kennwerte anpassen und den Einfluß des Substrats berücksichtigen zu können, wird auf die Isoplethensysteme für die einzelnen Substratgruppen, die im Isoplethenmodell festgelegt werden, zurückgegriffen.

3.3.1 Isoplethenmodell

Mit Hilfe des Isoplethenmodells soll ein Vergleich der hygrothermischen Bedingungen mit den Wachstumsvoraussetzungen für Sporenkeimung und für Myzelwachstum ermöglicht werden. Dazu werden sogenannte Isoplethensysteme verwendet. Diese beschreiben die Sporenauskeimungszeiten bzw. Wachstumsraten in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte. In der Literatur werden aber nur für einige wenige Pilzarten vollständige Isoplethensysteme angegeben. Diese unterscheiden sich je nach Spezies erheblich und besitzen nur Gültigkeit für Vollmedium als Nährboden. Zur Vorhersage einer Schimmelpilzbildung auf unterschiedlichen Substraten ist es daher erforderlich, neuartige Isoplethensysteme zu entwickeln. Diese müssen die Wachstumsvoraussetzungen der in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze erfassen. Als Basisdaten stehen dazu nur singuläre Messungen zur Schimmelpilzbildung auf Baustoffen zur Verfügung. Um zu einer brauchbaren Vorhersagemethode zu kommen, sind die wenigen vorhandenen Meßdaten entsprechend auszuwerten und die Isoplethensysteme durch ein möglichst einfaches Verfahren zu erstellen. Um bei der Modellbildung stets auf der sicheren Seite zu liegen, werden zunächst für alle Pilzspezies einer Gefährdungsklasse geltende Isoplethensysteme für optimalen Nährboden entwickelt. Dabei werden sämtliche in der Literatur vorhandenen Daten zu den hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, daß diese Isoplethen für den gesamten betrachteten Temperaturbereich die für Pilzbildung erforderlichen niedrigsten relativen Feuchten beinhalten.

Um Isoplethensysteme für unterschiedliche Substrate (z.B. Baustoffe oder Verschmutzungen) auf Basis der wenigen Literaturdaten zu generieren, wird

angenommen, daß die für optimalen Nährboden geltenden Systeme immer die geringsten Feuchten, die temperaturabhängig zur Pilzbildung erforderlich sind, berücksichtigen. Daher bietet es sich an, diese, wenn weniger oder ein ungünstigeres Substrat vorhanden ist, einfach zu höherer Feuchte zu verschieben. Jede kompliziertere Art der Entwicklung wäre aufgrund der schlechten Datenlage nicht begründbar. Die gewählte Verschiebung gestattet ferner, die Datensatzformen, die für optimalen Nährboden gelten, zu verwenden. Die zur Entwicklung der einzelnen Isoplethensysteme notwendigen Schritte sind in Tabelle 13 zusammengestellt und werden im folgenden erläutert. Insgesamt wird zwischen 8 Isoplethensystemen – resultierend aus zwei Gefährdungsklassen, zwei Substratgruppen und dies jeweils für Sporenauskeimung und für Myzelwachstum – unterschieden, deren jeweilige unterste Isolinie LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt wird:

- a) Gefährdungsklasse B/C (LIM B/C): Diese Systeme beziehen sich auf biologische Vollmedien als Nährboden und bilden daher das untere Limit bzgl. Wachstumsvoraussetzungen aller Isoplethensysteme, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die Wachstumsgrenze. Dies bedeutet, daß auch Schimmelpilzbildung der Gefährdungsklasse A ausgeschlossen ist, wenn für die Klasse B/C die Wachstumsvoraussetzung nicht erfüllt ist, da aufgrund der vorhandenen Daten stets geringere Werte für die relative Feuchte für B/C als für A vorliegen.

Tabelle 13 Erforderliche Schritte zur Generierung von stationären Isoplethensystemen zur Vorhersage von Schimmelpilzwachstum.

Schritt	Sporenauskeimung	Myzelwachstum
1	Ermittlung der LIM-Kurven unter Berücksichtigung entsprechender Pilze für die Gefährdungsklassen A, B/C	
2	Festlegung repräsentativer Schimmelpilze durch Vergleich des LIM mit den Isoplethen des einzelnen Pilzes	
3	Isoplethensysteme für optimale Substrate, die Isolinien bedeuten dabei:	
	Sporenauskeimungszeiten	Wachstum pro Zeiteinheit
	repräsentativer Pilz	für alle Schimmelpilze auf Basis des LIM B/C
	Aspergillus versicolor	Festlegung der Isolinien (Sporenauskeimungszeiten) durch Parallelverschieben des LIM B/C
4	Aufstellen von substratspezifischen Isoplethensystemen	

Tabelle 14 Einstufung von verschiedenen Materialien in Substratgruppen.

Angaben zu den oberflächennahen Bauteilschichten			Zuordnung zur Substratgruppe in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad ²⁾	
Substratgruppe ¹⁾		Typische Repräsentanten	nicht	stark
0	optimaler Nährboden	biologische Vollmedien	0	0
I	biologisch verwertbare Substrate ³⁾	Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Material für dauerelastische Fugen	I	I
II	Substrate mit porigem Gefüge	Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer, Dämmstoffe, die nicht unter I fallen	II	I
III	inerte Substrate ⁴⁾	Metalle, Folien, Gläser, Fliesen	III	I

- 1) Je nach Grad der Verschmutzung kann sich die Einteilung in die Substratgruppe verschieben.
 - 2) Der Verschmutzungsgrad wird in nicht verunreinigt („nicht“) und stark verunreinigt („stark“) eingeteilt.
 - 3) Entweder können diese Substrate biologisch verwertbare Einlagerungen besitzen oder sie werden abgebaut.
 - 4) Diese Substrate können weder abgebaut werden noch enthalten sie Nährstoffe.
- b) Gefährdungsklasse A (LIM A): Analog zu a), ist nur für alle Pilze der Gefährdungsklasse A gültig.
- c) Substratgruppe I (LIM_{Bau} I): Analog zu a), beziehen sich hinsichtlich Nährboden nicht auf Vollmedium, sondern auf die in Tabelle 14 genannten Materialien in Substratgruppe I. Da nur für Pilze der Gefährdungsklasse B/C in der Literatur Untersuchungen an Baustoffen zu finden sind, ist derzeit die Bildung eines substratabhängigen Isoplethensystems für Gefährdungsklasse A nicht möglich. Aber auch hier gilt die diesbezügliche Aussage in a).
- d) Substratgruppe II (LIM_{Bau} II): Analog zu c), nur für die Materialien, die in Substratgruppe II fallen, gültig.

Lowest Isopleth for Mould (LIM)

Auf welche Art verschiedene Kriterien bei der Festlegung der Wachstumsvoraussetzungen Temperatur und relative Feuchte zu berücksichtigen sind, wurde in Ziffer 3.2 erläutert. Daraus wird deutlich, daß bei der Ermittlung der für alle Pilze gültigen Isoplethensysteme zunächst unterschiedliche Spezies betrachtet werden müssen, da jede ihre „eigenen“ spezifi-

schen Isoplethen besitzt. Um Sporenauskeimung oder Myzelwachstum – auch auf Vollmedium – auszuschließen, bildet man für sämtliche minimalen Wachstumsvoraussetzungen aller derzeit bekannter Schimmelpilze die unterste Einhüllende und erhält so den sog. Lowest Isopleth for Mould, bei dessen Unterschreitung, also hin zu geringeren Feuchten, keine biologische Aktivität mehr auftritt.

Die Festlegung der LIM-Kurven für die Gefährdungsklassen A bzw. B/C wird in Bild 29 für Sporenauskeimung und Bild 30 für Myzelwachstum gezeigt. Die einzelnen Linien basieren auf den in Tabelle 4 zusammengestellten Wachstumsvoraussetzungen verschiedener Pilze. Dabei wird die Temperatur nur im bauphysikalisch interessanten Bereich für den Innenraum von 0 °C bis 30 °C betrachtet. Die unterste Linie stellt jeweils die Grenze jeglicher Pilzaktivität dar, d.h. bei ungünstigeren hygrothermischen Bedingungen kann Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum ausgeschlossen werden. Der LIM bedeutet, daß auf dieser Linie die Sporenauskeimungszeit theoretisch unendlich groß ist bzw. die Wachstumsrate 0 mm/d beträgt.

Bei der Festlegung der LIM-Kurven werden Sicherheiten derart eingebaut, daß mikrobielle Aktivität unterhalb des LIM für sämtliche im Bau auftretende Spezies für die jeweiligen Gefährdungsklassen A bzw. B/C ausgeschlossen werden kann, zumal der bei der Bestimmung der Isoplethen zugrunde gelegte Nährboden (meist: Vollmedium) als optimal anzusehen ist. Es ergeben sich insgesamt nur geringe Unterschiede im Vergleich der LIM für Sporenauskeimung und Myzelwachstum, wobei aber festgestellt werden kann, daß der LIM für Sporenauskeimung, vor allem bei niedrigen Temperaturen, um wenige % relative Feuchte über dem LIM für Myzelwachstum liegt. Dies bedeutet, daß es in den meisten Fällen erst dann zur Sporenauskeimung kommt, wenn ein Weiterwachsen gewährleistet werden kann.

Zur mathematischen Generierung dieser Grenzkurven wird angenommen, daß die LIM-Kurve einer hyperbolischen Kurve entspricht. Dies stimmt gut mit den in der Literatur gefundenen Isoplethen überein (siehe auch die Bilder A bis K verschiedener Isople-

thensysteme im Anhang). Zur mathematischen Erfassung des Verlaufs der Grenzkurve wird die links vom unteren Scheitelpunkt liegende Halbkurve einer hyperbolischen Cosinuns-Funktion für den bauphysikalisch interessanten Bereich zwischen 0 °C und 30 °C entsprechend Gleichung (15) verwendet:

$$\varphi = a \cdot \cosh(\vartheta - \vartheta_{\text{opt.}}) + b \quad (15)$$

Dabei bedeuten:

- a, b [-] Koeffizienten
- φ [-] relative Feuchte
- ϑ [°C] Temperatur
- ϑ_{opt} [°C] optimale Temperatur für Pilzbildung

Der Verlauf der Kurve wird dabei durch folgende 2 Punkte

- f_{LIM} (optimale Temperatur) = minimale relative Feuchte im betreffenden Temperaturbereich
- f_{LIM} (minimale Temperatur) = optimale relative Feuchte im betreffenden Temperaturbereich

sowie durch die Randbedingung

$$df_{\text{LIM}}/d\vartheta \text{ (optimale Temperatur)} = 0$$

festgelegt.

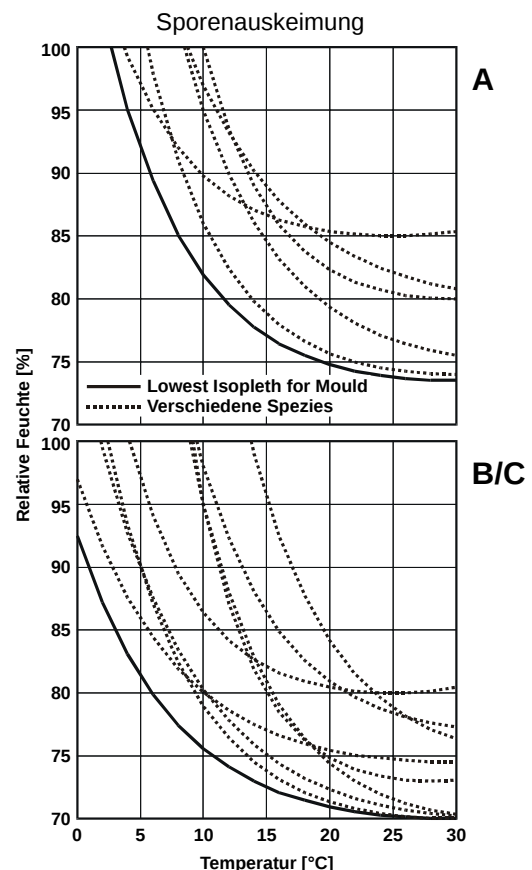


Bild 29 Isoplethen für Sporenauskeimung verschiedener im Modell berücksichtigter Pilzspezies (siehe Tabelle 4) und der sich damit ergebende Lowest Isopleth for Mould (LIM). Das obere Bild gilt für Pilze der Gefährdungskategorie A, das untere Bild für Gefährdungskategorie B/C.

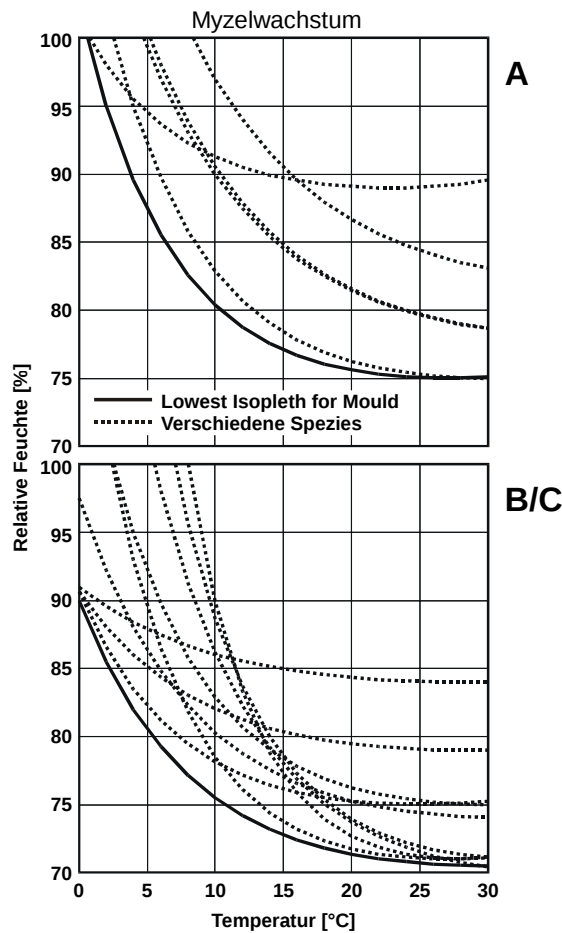


Bild 30 Isoplethen für Myzelwachstum verschiedener im Modell berücksichtigter Pilzspezies (siehe Tabelle 4) und der sich damit ergebende Lowest Isopleth for Mould (LIM). Das obere Bild gilt für Pilze der Gefährdungsklasse A, das untere Bild für Gefährdungsklasse B/C.

Isoplethensysteme für optimalen Nährboden

Ein Isoplethensystem besteht aus der von Temperatur und relativer Feuchte abhängigen unteren Grenzlinie (LIM) und einer Schar von analogen Isolinien, die im Falle der Vorhersage von Sporenkeimung die „Sporenauskeimungszeiten“, im Fall der Beschreibung des Myzelwachstums das „Wachstum pro Zeiteinheit“ parameterisieren. Um die Vorhersage der Schimmelpilzbildung möglichst einfach zu gestalten, ist es erforderlich, Isoplethensysteme angeben zu können, die für alle Pilze einer Gefährdungsklasse gelten. Dazu ist eine Reihe methodischer Schritte durchzuführen, die Tabelle 13 auflistet. Nach Aufstellung der LIM-Kurven werden zunächst repräsentative Schimmelpilze ausgewählt. Im jeweiligen für bauphysikalische Betrachtungen interessanten Temperaturbereich nah am Verlauf der LIM-Kurven liegende pilzspezifische Isoplethen besitzen für die

Gefährdungsklasse A der Pilz *Aspergillus versicolor*, für die Klasse B/C die Pilze *Aspergillus amstelodami*, *Aspergillus candidus*, *Aspergillus ruber* und *Wallemia sebi*. Deren Isoplethensysteme sollen zur Entwicklung entsprechender, für alle Pilze einer Gefährdungsklasse geltender Isoplethensysteme bei optimalem Nährboden herangezogen werden. Dabei wird zwischen den beiden Modellsystemen für Sporenauskeimung und Myzelwachstum unterschieden.

Isoplethensysteme für Sporenauskeimung

Durch Kenntnis eines kompletten Isoplethensystems für Sporenauskeimung, d.h. der von verschiedenen Temperaturen und relativen Feuchten abhängigen Sporenauskeimungszeiten, kann mithilfe eines Vergleichs mit den im Gebäude auftretenden instationären hygrothermischen Zuständen ermittelt werden, ob die Sporen genügend lange Wachstumsbedingungen vorfinden, um auskeimen zu können. Unter Sporenauskeimungszeiten werden die Zeiträume bezeichnet, die erforderlich sind, bis die Ausbildung eines Keimschlauches als erstes Zeichen des Myzelwachstums unter dem Mikroskop sichtbar wird. Das beispielsweise in Bild 9 gezeigte Isoplethensystem gibt also in den einzelnen Isolinien die Zeiten an, die Sporen unter entsprechenden stationären hygrothermischen Bedingungen benötigen, um auszukeimen und sichtbar zu werden. Diese gelten für optimalen Nährboden, da bei den zugrundeliegenden Messungen Vollmedien verwendet werden.

Um ein vollständiges Isoplethensystem für Sporenauskeimung, das alle Pilze berücksichtigt, zu erzeugen, werden, ausgehend von gemessenen Isoplethensystemen der repräsentativen Pilze, die beiden LIM-Kurven der entsprechenden Gefährdungsklassen in Bild 31 jeweils so weit nach oben verschoben, bis sie die Linien in den gemessenen Systemen, die unterschiedliche Sporenauskeimungszeiten beschreiben, wenigstens an einer Stelle berühren. Dies soll an folgendem Beispiel erläutert werden: Wurde für einen der repräsentativen Pilze bei 10 °C und 80 % relativer Feuchte eine Sporenauskeimungszeit von 8 Tagen gemessen, so muß die LIM-Kurve, die diese Sporenauskeimungszeit beschreibt, so weit verschoben werden, bis sie als Isolinie durch diesen Punkt verläuft.

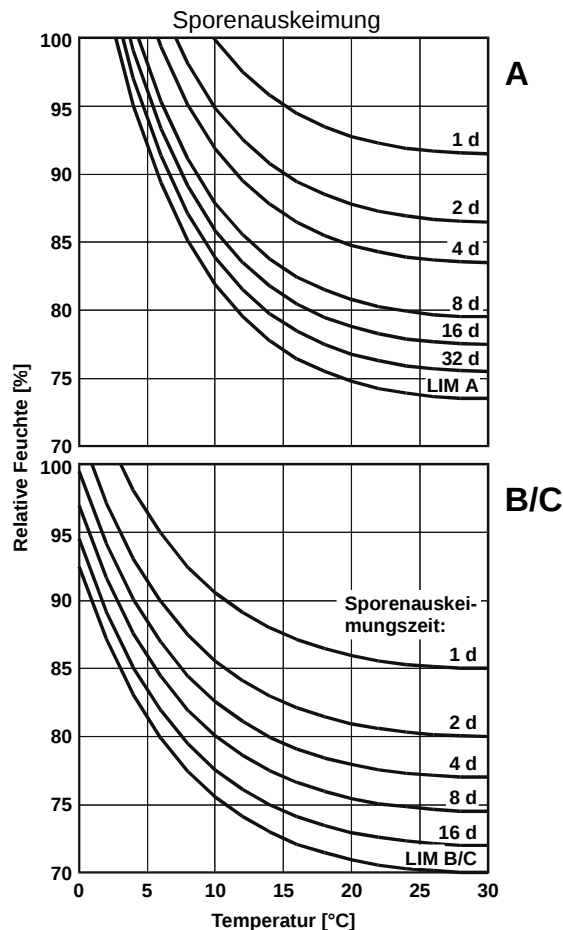


Bild 31 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung, das für alle Pilze der Gefährdungsklasse A (Bild oben) und B/C (Bild unten) gilt.

Die Lage des Lowest Isopleth for Mould (LIM) wird aus Bild 29 übernommen und stellt die unterste Grenze der biologischen Aktivität in einer Gefährdungsklasse dar. Die angegebene Zahl der Tage charakterisiert die Zeitdauer, nach welcher erste Auskeimungen auftreten.

Durch Wiederholung dieses Vorgehens entsteht ein neues, für alle Pilze einer Klasse gültiges Isoplethensystem, das Bild 31 oben für die Gefährdungsklasse A, Bild 31 unten für die Klasse B/C zeigt. Die Beibehaltung der Form der LIM-Kurve bei deren Verschiebung gewährleistet, daß die für verschiedene Temperaturen und relativen Feuchten geltenden Sporenauskeimungszeiten für alle Pilze Gültigkeit besitzen. Als repräsentative Pilze wurden dazu *Aspergillus versicolor* für die Gefährdungsklasse A und *Aspergillus amstelodami* für B herangezogen. Mithilfe eines Vergleichs mit den Isoplethensystemen weiterer Pilze (siehe Bilder A bis K) wird sichergestellt, daß die in Bild 31 dargestellten Isoplethensysteme stets die geringsten Sporenauskeimungs-

zeiten für einzelne hygrothermische Bedingungen enthalten.

Isoplethensysteme für Myzelwachstum

Nach dem Auskeimen beginnt der Pilz mit seinem Wachstum, sofern dafür hygrothermisch ausreichende Bedingungen vorliegen. Auch nach einer Zeitperiode mit ungünstigen Klimabedingungen kann wieder Wachstum einsetzen. Um vorhersagen zu können, mit welchem Wachstum maximal zu rechnen ist, muß ein für alle Schimmelpilze gültiges Isoplethensystem für Myzelwachstum entwickelt werden. Die Wachstumsgeschwindigkeiten werden in mm/d in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte angegeben und in den entsprechenden Isoplethensystemen in Bild 10 für 2 *Aspergilli* gezeigt. Die üblicherweise angegebenen Wachstumsraten in mm/d oder entsprechende Flächenbelegungen (z.B. 70 % einer Petrischale) können bei der Beurteilung von Wachstum auf Bauteilen nur im übertragenen Sinn derart verwendet werden, daß man die Werte vergleichend analysiert.

Zur Erstellung von, für alle Schimmelpilze gültigen, Isoplethensystemen für Myzelwachstum werden auch wieder gemessene Isoplethensysteme repräsentativer Pilze verwendet. Im Vergleich zur Sporenauskeimung gibt es bei Myzelwachstum für mehrere Pilze gemessene Systeme, wie den Bildern A bis K zu entnehmen ist. Für Myzelwachstum existiert in Bild 30 bei beiden Gefährdungsklassen je eine LIM-Kurve, welche die unterste Grenze bzgl. Wachstum für alle Pilze einer Gefährdungsklasse darstellt. Ausgehend vom entsprechenden LIM werden die einzelnen Isolinien so erzeugt, daß für jede Bedingung von Temperatur und relativer Feuchte die höchste Wachstumsrate aller Pilze ausgewählt und berücksichtigt wird. Dazu wird ein analoges Vorgehen wie für Sporenauskeimung angewendet, d.h. die LIM-Kurve wird, in ihrer Form unverändert, nach oben verschoben, bis sie, von unten kommend, die Isolinie für jeweils eine bestimmte Wachstumsrate in dem für den repräsentativen Pilz gemessenen Isoplethensystem berührt. Eine Überprüfung erfolgt anhand der Bilder A bis K. Bild 32 zeigt die beiden Isoplethensysteme für die Gefährdungsklassen A bzw. B/C, die für optimalen Nährboden Gültigkeit

besitzen. Mithilfe dieser Abbildungen ist es möglich, für alle Pilze die maximalen Wachstumsraten in Abhängigkeit von hygrothermischen Randbedingungen zu ermitteln. Selbstverständlich können auch die entsprechenden Isoplethensysteme für einzelne Pilze im Anhang zur Bestimmung des Myzelwachstums herangezogen werden.

Da nicht für alle Pilze gemessene Isoplethensysteme vorliegen, braucht man ein Verfahren, um diese aus vorhandenen Literaturdaten zu erstellen. Zur Festlegung der Isolinien in solchen Isoplethensystemen können die in den Bildern 5 bzw. 7 dargestellten Wachstumsraten einzelner Pilze in Abhängigkeit von Temperatur bzw. relativer Feuchte herangezogen werden. Mithilfe dieser Abhängigkeiten erfolgt eine Projektion der gemessenen temperatur- wie

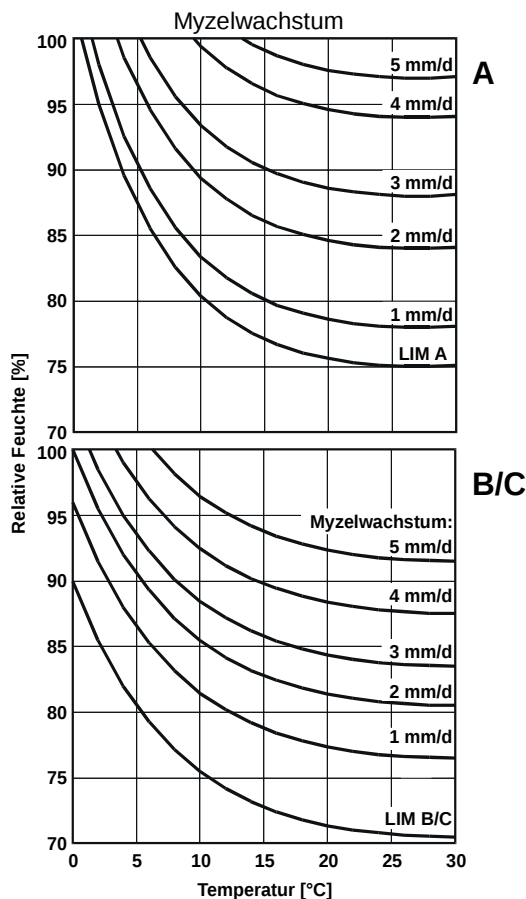


Bild 32 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Myzelwachstum, das für alle Pilze der Gefährdungsklasse A (Bild oben) und B/C (Bild unten) gilt.

Die Lage des Lowest Isopleth for Mould (LIM) wird aus Bild 30 übernommen und stellt die unterste Grenze der biologischen Aktivität in einer Gefährdungsklasse dar. Die angegebene Zahl in mm/d charakterisiert das zu erwartende Wachstum.

feuchteabhängigen Wachstumsraten auf das Isoplethensystem, wie es schematisch Bild 33 zeigt. Eine Temperatur von 28 °C und 97 % relative Feuchte werden in diesem Beispiel als optimale Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum angesehen. Bild 33 links zeigt die Wachstumsrate bei optimaler Temperatur in Abhängigkeit von der relativen Feuchte. Diese Werte werden abgegriffen und auf der Isotherme bei 28 °C im Isoplethensystem eingezeichnet (rechter unterer Teil des Bildes 33). Die Zuordnung der von der Temperatur abhängigen Wachstumsraten bei optimaler relativer Feuchte (siehe Bild 33 oben rechts) wird auf der Linie bei optimaler relativer Feuchte (z.B. bei 97 % im rechten unteren Teil des Bildes 33) eingetragen. Eine Verbindung der 3 Punkte mit jeweils gleicher Wachstumsrate mithilfe einer cosh-Funktion ergibt die entsprechende Isolinie im Isoplethensystem für Myzelwachstum in Bild 33 unten rechts. Die Erstellung weiterer Isolinien für Myzelwachstum erfolgt analog.

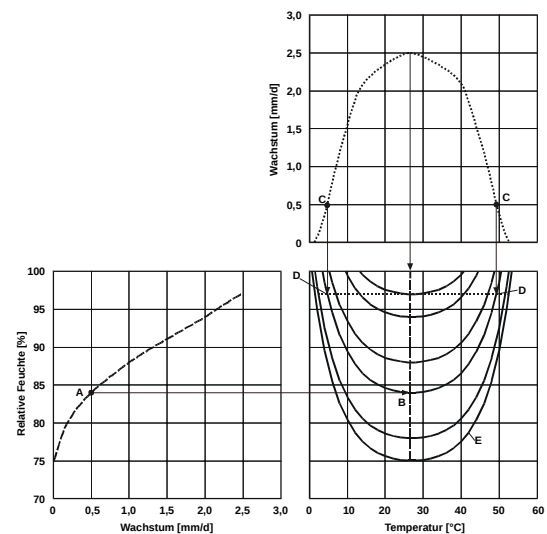


Bild 33 Schematische Darstellung des Verfahrens zur Isoplethengenerierung durch Projektion der gemessenen temperatur- wie feuchteabhängigen Wachstumsraten (vgl. Bilder 5 und 7) auf ein Isoplethensystem für Myzelwachstum.

Hinweise zur Nomogrammbenutzung:

- A: Das von der relativen Feuchte abhängige Wachstum wird abgelesen.
- B: Dieser Wert wird bei der für Wachstum optimalen Temperatur eingetragen.
- C: Das von der Temperatur abhängige Wachstum wird abgelesen.
- D: Diese Werte werden bei der für Wachstum optimalen relativen Feuchte eingetragen.
- E: Eine Verbindung dieser 3 Punkte (B, D) mithilfe der gemäß Gl. (15) definierten cosh-Funktion ergibt den Isoplethen für die Wachstumsraten.

Isoplethensysteme für Schimmelpilzbildung auf Bauprodukten

Auf Basis der bisher aufgestellten Isoplethensysteme sind nur Aussagen für Sporenauskeimung oder Myzelwachstum auf optimalem Nährboden möglich. Daher ist zur Vorhersage einer Schimmelpilzbildung auf Bauprodukten eine Umrechnung erforderlich zur Berücksichtigung unterschiedlicher Substrate. Dazu müssen Isoplethensysteme entwickelt werden, die für bestimmte Substrate gelten und im folgenden „substratspezifische“ Isoplethensysteme genannt werden. Da nur wenige Messungen zu Schimmelpilzbildung auf Baustoffen vorliegen, erscheint es sinnvoll, Substratgruppen zu definieren und nur dafür Isoplethensysteme aufzustellen. Eine Einteilung in Gruppen ist bauaufsichtlich ohnehin üblich, z.B. bei Wärmeleitfähigkeitsklassen. Die Angabe von Isoplethensystemen für Substratgruppen hat gegenüber der Berücksichtigung einzelner Baumaterialien bei der Vorhersage der Pilzbildung mit dem Isoplethenmodell den Vorteil, bei der Ergebnisinterpretation nur wenige Kurven vergleichen zu müssen. Außerdem wird durch die Gruppenbildung keine Genauigkeit „vorgetäuscht“, die aufgrund der wenigen vorliegenden Meßdaten bei der Bewertung einzelner Substrate ohnedies nicht vertretbar wäre.

Definition der Substratgruppen

Tabelle 14 zeigt eine Definition der Substratgruppen und die entsprechende Zuordnung von Baumaterialien. Ein eigenes Isoplethensystem wird nur für die mit 0, I und II bezeichneten Gruppen erstellt, wobei für 0 die in den Bildern 31 und 32 dargestellten Systeme für optimalen Nährboden gelten. Für die Substratgruppe III wird kein Isoplethensystem angegeben, da davon ausgegangen werden kann, daß ohne Verschmutzung Schimmelpilzbildung bei diesen Materialien nicht auftreten kann. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets von Substratgruppe I ausgegangen werden. Eine Einstufung in Abhängigkeit vom pH-Wert in eine niedrigere Substratgruppe kann für ein Baumaterial nur dann erfolgen, wenn der pH-Wert langfristig, also über mehrere Jahre, nachweislich unter 2 oder über 10 liegt (siehe Bild 15).

Die zur Entwicklung der substratspezifischen Isoplethensysteme erforderlichen methodischen Schritte

werden im folgenden für die Sporenauskeimung und anschließend für das Myzelwachstum erläutert. Dabei wird ein phänomenologischer Ansatz gewählt, d.h. von der Beobachtung ausgegangen, daß ein Schimmelpilz auf optimalem Nährboden bei bestimmten hygrothermischen Bedingungen auskeimen kann, während er auf einem speziellen Substrat dazu höhere Feuchten benötigt [39]. Dies bedeutet, daß die zur Sporenauskeimung bzw. zum Myzelwachstum erforderliche Feuchte nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Substrat abhängt. Da die dafür verantwortlichen physiologischen Zusammenhänge bisher nicht vollständig aufgeklärt werden konnten [142], wird vereinfachend davon ausgegangen, daß die für die o.g. Substratgruppen geltenden Isoplethensysteme oberhalb der entsprechenden Isoplethensysteme für optimalen Nährboden liegen müssen. Die Isoplethensysteme für optimalen Nährboden (Gefährdungsklasse B/C), wie sie die Bilder 31 und 32 unten zeigen, werden um einen bestimmten Wert nach oben hin zu höheren Feuchten verschoben, ohne daß ihre Form verändert wird. Zwar wäre neben dieser Parallelverschiebung auch eine zusätzliche Dehnung oder Stauchung der Isoplethensysteme denkbar, dazu liegen aber zum derzeitigen Kenntnisstand keine Hinweise vor, so daß eine bloße Parallelverschiebung des gesamten Systems zunächst sinnvoll erscheint. Im folgenden werden, da Literaturdaten zu Schimmelpilzbildung auf Substraten in unterschiedlicher Form zur Verfügung stehen, verschiedene Möglichkeiten zur Parallelverschiebung aufgezeigt.

Substratspezifische Isoplethensysteme für Sporenauskeimung

Sind die unteren Werte für Temperatur und relative Feuchte für die Auskeimung von Schimmelpilzen auf einzelnen Substraten bekannt, so werden die LIM-Kurven und die Isoplethensysteme bei optimalem Nährboden für Sporenauskeimung nach oben verschoben. Auf diese Weise lassen sich die beiden Isoplethensysteme bzgl. Sporenauskeimung für die Substratgruppen I und II sowie die dazugehörigen untersten Wachstumsgrenzen, also die LIM-Kurven für Schimmelpilzbildung auf Bauprodukten ($LIM_{Bau\ I}$ und $LIM_{Bau\ II}$) festlegen.

Die von Block in [11] genannten materialabhängigen Wachstumsvoraussetzungen gestatten, die LIM_{Bau} -

Kurve für die Substratgruppe I an einem Punkt festzulegen. So beginnt Schimmelpilz auf Leder, das der Substratgruppe I zugeordnet wird, bei 30 °C und 76 % relative Feuchte nach etwa 150 Tagen zu wachsen. Zöld gibt in [147] an, daß Schimmelpilzwachstum auf Gipskarton bei Temperaturen um 20 °C und bei relativen Feuchten von über 75 % beginnt. Grant [39] stellt weiterhin fest, daß u.a. die Pilze *Aspergillus versicolor* sowie *Penicillium brevicompactum* und *Penicillium chrysogenum* auf Substraten der Gruppe I bei 12 °C ab 83 % relativer Feuchte, bei 25 °C ab 79 % auskeimen können. Die minimale relative Feuchte beträgt für diese Spezies (LIM B/C) bei optimalem Nährboden 74 % im Gegensatz zur minimalen Feuchte von 70 % für die xerophilsten Pilze der Gefährdungsklasse B/C (vgl. Tabelle 4). Der LIM_{Bau I} sollte daher etwa 4 % relative Feuchte unter den von Block [11] genannten relativen Feuchten liegen. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache erlauben die o.g. Angaben den Verlauf des LIM_{Bau} für die Substratgruppe I in Bild 34 oben festzulegen. Unter Berücksichtigung einer Meßunsicherheit für die relative Feuchte von 2 % wird die Kurve für den LIM_{Bau I} auf Basis der Punkte 12 °C / 79 % relative Feuchte, 25 °C / 75 % und 30 °C / 76 % festgelegt.

Aus der Literatur sind ferner Meßergebnisse bekannt, die für einzelne Baustoffe bei bestimmten Temperaturen und relativen Feuchten im Vergleich zu optimalem Nährboden längere Sporenauskeimungszeiten benennen. Zur Erzeugung substratspezifischer Isoplethensysteme auf Basis dieser Daten werden diejenigen Isoplethensysteme für optimalen Nährboden (Bild 31) als Ganzes so weit nach oben verschoben, bis die Sporenauskeimungszeiten übereinstimmen; man erhält dann die neue Isolinie im verschobenen Isoplethensystem mit der in der Literatur genannten Sporenauskeimungszeit eines Schimmelpilzes auf einem Substrat für eine bestimmte Temperatur und relative Feuchte. Eine neue LIM-Kurve für dieses Substrat (LIM_{Bau I} oder LIM_{Bau II}) ergibt sich dadurch ebenfalls, da der LIM für die Gefährdungsklasse B/C mit verschoben wird.

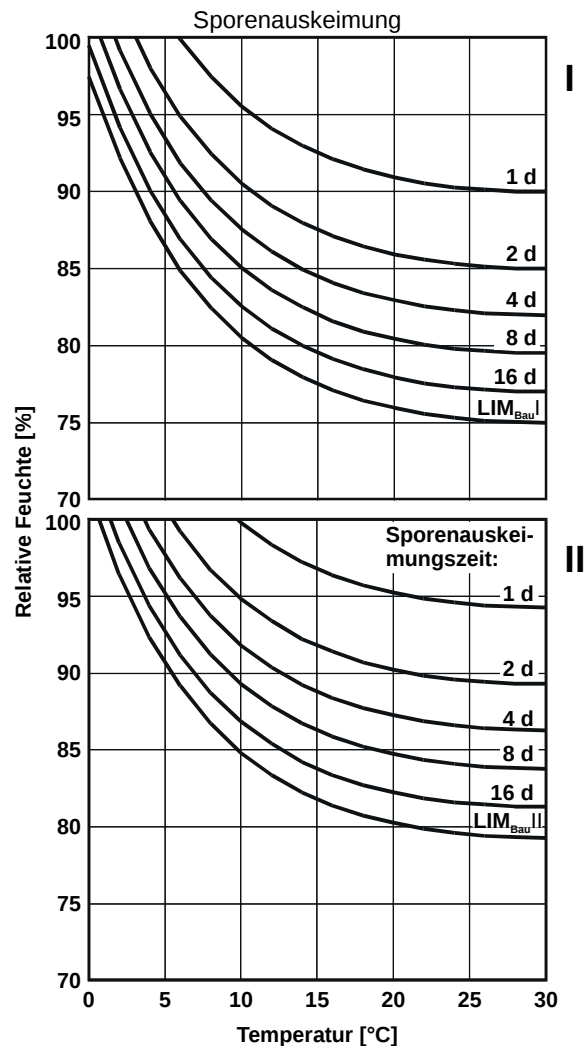


Bild 34 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung, das für alle Pilze der Substratgruppen I (Bild oben) und II (Bild unten) gilt.

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

Um diese Verschiebung durchzuführen, werden die in [107] genannten Substratkurven verwendet. Den zeitabhängigen Mould-Index zeigt Bild 11. Auf Basis dieser Meßkurven kann für jeweils genau ein Paar aus relativer Feuchte und Temperatur die Zeitdauer abgelesen werden, bis sich erste biologische Aktivität abzeichnet. Dabei ist es nicht erforderlich, den Mould-Index 1 (also erstes sichtbares Myzelwachstum) zu erreichen, da bereits davor die Auskeimung stattgefunden haben muß. Da z.T. widersprüchliche Ergebnisse vorliegen, wird zur Verschiebung der Isoplethensysteme ein Mittelwert aus den Grafiken in Bild 11 herangezogen, wobei jeweils die dabei festzustellende kürzeste Zeit berücksichtigt wird. Bei

97 % relativer Feuchte z.B. kann als Zeitpunkt für erste biologische Aktivität bei Gipskarton (Substratgruppe I) in etwa 1 Tag abgelesen werden. Nach diesem Verfahren kann das Isoplethensystem für optimalen Nährboden so weit nach oben verschoben werden, bis die Sporenauskeimungszeiten übereinstimmen. Das sich damit ergebende Isoplethensystem deckt sich mit den Ergebnissen in Bild 34 oben. Allerdings sollten zur besseren Absicherung weitere Messungen solcher Substratkurven durchgeführt werden.

Auf Basis vorliegender instationärer TOW-Meßergebnisse kann ebenfalls eine Verschiebung erfolgen. Damit lassen sich die substratspezifischen Isoplethensysteme festlegen. Auch hierbei sollten stets die für Pilzwachstum kritischen Ergebnisse Verwendung finden. Stellt beispielsweise Gertis in [37] fest, daß bei einer Temperatur von 18,5 °C eine relative Feuchte von 95 % an einem Putz mit Dispersionsfarbe, einem Gipskarton oder einer Rauhfaserpapete – jeweils mit Verschmutzung – 6 Wochen (bzw. 42 Tage) lang jeweils 1 Stunde pro Tag (TOW = 0,04) anliegen muß, bis erstes sichtbares Schimmelpilzwachstum auftritt (siehe Bild 14 oben rechts), so liegt in der Summe etwas mehr als 1 Tag lang diese hohe Feuchtelast an den Probekörpern an. Berücksichtigt man hingegen eine mögliche zwischenzeitliche Austrocknung der Pilzsporen, so ergibt sich kein Widerspruch zu dem in Bild 34 oben gezeigten Isoplethensystem für Substratgruppe I. Die Möglichkeit der Festlegung substratspezifischer Isolines mithilfe solcher zeitabhängiger Messungen wird an dieser Stelle auch deshalb beschrieben, da der Schimmelpilzprüfstand [37] gute Möglichkeiten für weiterführende Untersuchungen bietet. Ferner nennt Adan [1] eine an 12 Stunden pro Tag an Gipskarton anliegende relative Feuchte von 80 % bei Raumtemperatur als ausreichend, um nach einer gewissen Zeit Pilzwachstum festzustellen. Die Angaben in [1] bedeuten, daß nach etwa 2 Wochen bei 20 °C und 80 % relativer Feuchte Sporenauskeimung einsetzt. Dies bestätigt die Lage der entsprechenden Isolinie im Isoplethensystem für Substratgruppe I in Bild 34 oben.

Auf Holz (Substratgruppe II) tritt nach [11] Wachstum nach 35 Tagen bei einer Temperatur von 30 °C

und 80 % relativer Feuchte ein. Daraus läßt sich, zumindest für einen Punkt, der Verlauf des entsprechenden LIM_{Bau} II (dargestellt in Bild 34 unten) fixieren. Er wird für diese Temperatur auf 79 % relative Feuchte festgelegt, da zu erwarten ist, daß bei längerer Beobachtungszeit bei etwas unter 80 % relativer Feuchte Auskeimung gerade noch stattfinden kann. Alle weiteren Ergebnisse aus biologischen Experimenten zur Pilzbildung auf Bauprodukten, die nicht in Substratgruppe I fallen, liegen oberhalb dieser Grenzkurve (z.B. [11, 37, 39]). Zur Absicherung der Festlegung des Isoplethensystems bzgl. Substratgruppe II wären weitere Messungen sinnvoll. Da aber eher eine Verschiebung hin zu höheren Feuchten zu erwarten ist, wie auch die Ergebnisse von Ritschkoff [107] in Bild 11 belegen, ist es zunächst sinnvoll, die getroffene Festlegung des Isoplethensystems für Substratgruppe II solange beizubehalten, bis weitere Daten vorliegen.

Substratspezifische Isoplethensysteme für Myzelwachstum

Zur Bestimmung der sich, abhängig von Temperatur und relativer Feuchte, ergebenden Wachstumsraten auf bestimmten Substraten müssen Isoplethensysteme, die für die Substratgruppen I und II gelten, entwickelt werden. Da aber keine verwertbaren Literaturdaten vorhanden sind, die eine Festlegung der Isoplethensysteme für Myzelwachstum in Abhängigkeit vom Substrat erlauben, wird vereinfachend davon ausgegangen, daß die LIM_{Bau}-Kurven für Sporenauskeimung und Myzelwachstum in guter Näherung übereinstimmen. Diese Annahme erscheint gerechtfertigt, bedenkt man den kleinen Unterschied zwischen den LIM B/C-Kurven für Sporenkeimung und Myzelwachstum. Somit wird das für optimalen Nährboden geltende Isoplethensystem bzgl. Myzelwachstum für Gefährdungsklasse B/C in Bild 32 unten mit dem gleichen Vektor hin zu höheren Feuchten verschoben, wie dies für die Isoplethensysteme bzgl. Sporenauskeimung erfolgte. Bild 35 zeigt die Isoplethensysteme für Myzelwachstum für die Substratgruppe I (Bild oben) und II (Bild unten). Damit kann für die einzelnen Substratgruppen in Abhängigkeit von den hygrothermischen Bedingungen vergleichend ermittelt werden, mit welchem Wachstum zu rechnen ist.

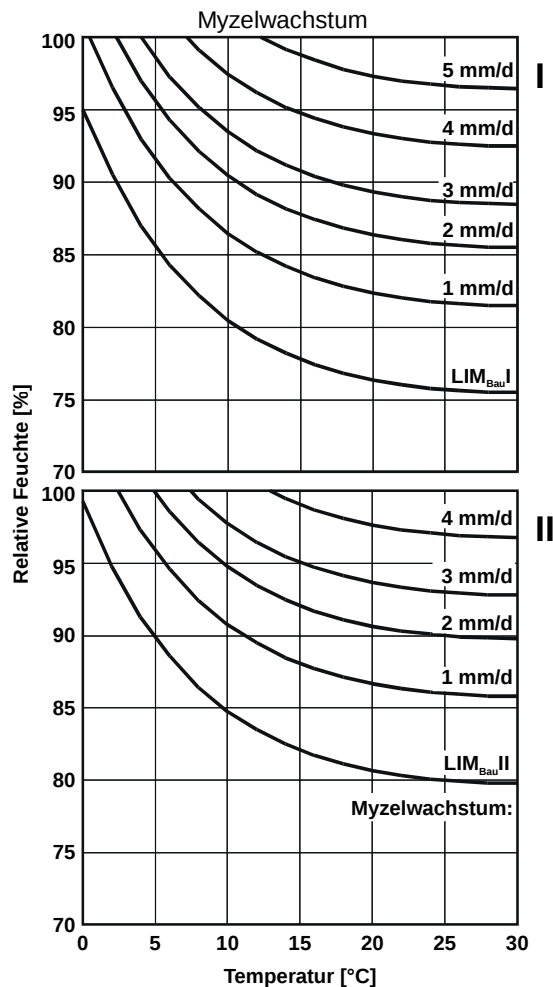


Bild 35 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Myzelwachstum, das für alle Pilze der Substratgruppen I (Bild oben) und II (Bild unten) gilt.

Die Angaben in mm/d bedeuten Myzelwachstum. Unterhalb des LIM_{Bau} ist auf Baustoffen der entsprechenden Gruppe mit keiner biologischen Aktivität zu rechnen.

Zuordnung der Substratgruppen zu den Gefährdungsklassen

Die Bilder 34 und 35 zeigen die LIM_{Bau} -Kurven der in Tabelle 14 mit I und II bezeichneten Substratgruppen. Die einzelnen Isoplethensysteme beziehen sich dabei jeweils auf die Gefährdungsklasse B/C. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Gefährdungsklassen A und B/C kann nur für den Verlauf der LIM-Kurve für optimalen Nährboden erfolgen, weil nur dazu genügend Daten vorliegen. Aufgrund der Verwendung von Mischkulturen verschiedener Pilzspezies bei Messungen auf Baustoffen ist keine Unterscheidung bzgl. einzelner Pilze und deren Zugehörigkeit zu den Gefährdungsklassen möglich. Da Pilze der Gefährdungsklasse B/C geringere Wachstumsvoraussetzungen besitzen, werden damit auch bei Vor-

handensein von A-Pilzen in Pilz-Mixes stets die LIM-Kurven für B/C-Pilze ermittelt.

Insgesamt ergibt sich mit der gewählten Art der Generierung der substratspezifischen Isoplethen eine Vorhersagemethode, deren Ergebnisse stets auf der sicheren Seite liegen. Dies wird vor allem dadurch bewerkstelligt, daß die für alle im Bau auftretenden Pilze geltenden Isoplethensysteme für optimalen Nährboden (schärfste Anforderungen) unter Beibehaltung ihrer Form verschoben werden. Diese Verschiebung erfolgt auf Basis von wenigen vorhandenen Meßdaten dadurch, daß auch wieder jeweils die kritischeren Werte herangezogen werden. Die Anwendung dieser vervollständigten Isoplethen für unterschiedliche Substratgruppen zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung führt zu sehr brauchbaren Ergebnissen, wie später in Ziffer 5 ausgeführt wird.

3.3.2 Instationäres 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. Dazu wird ein neuartiges biohygrothermisches Modell entwickelt, das den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln in der Lage ist. Im folgenden wird, ausgehend von der Modellvorstellung und den getroffenen Modellannahmen, das instationäre biohygrothermische Modell beschrieben. Ferner wird auf die dafür erforderlichen Kennwerte und deren Bestimmung eingegangen.

Modellvorstellung

Wie die Kurve in Bild 4 zeigt, durchläuft das Wachstum von Schimmelpilzen bestimmte Phasen. In Bild 36 sind dazu schematisch die vom Substrat abhängigen Wachstumsvorgänge im Bereich der Anlauf-, Beschleunigungs- und der exponentiellen Wachstumsphase von Schimmelpilzen dargestellt. Aufgetragen wird das Pilzwachstum über die Zeit bei Vollmedium und für die Substratgruppen I und II. Angegeben sind die Zeitpunkte des Stoffwechselbeginns von Schimmelpilzen sowie die vom Substrat beein-

flußte Sporenauskeimungszeit, die durch das erste sichtbare Schimmelpilzwachstum, d.h. die Ausbildung des Keimschlauches, definiert wird. Die in den Isoplethensystemen dargestellten Sporenauskeimungszeiten kennzeichnen genau diesen Zeitpunkt.

Zunächst nimmt, so die Modellvorstellung, die Pilzspore bei hygrothermisch günstigen Umgebungsbedingungen während der Anlaufphase, unabhängig vom Nährboden, Feuchte mittels Diffusion auf, bis ein bestimmter Wassergehalt im Inneren der Spore (im weiteren als Grenzwassergehalt bezeichnet) den Beginn des Stoffwechsels ermöglicht (Bild 36). Die ab diesem Zeitpunkt in der Beschleunigungsphase ablaufende weitere Sporenauskeimung ist entweder von den in der Spore eingelagerten Nährstoffen oder aber vom Nährstoff- bzw. Salzgehalt des Substrats und dem externen pH-Wert abhängig. Zu den Bedingungen, die für einen Beginn der Stoffwechselaktivitäten erforderlich sind, finden sich in der Literatur keine verwertbaren Hinweise. Bevor sich jedoch erstes sichtbares Schimmelpilzwachstum einstellt, wird die Spore offensichtlich vom Substrat beeinflusst, da sich die Sporenauskeimungszeiten auf optimalen Nährboden bzw. auf Substraten mit wenig Nährstoffen deutlich unterscheiden (gestrichelte Linien in Bild 36). Die sog. Wachstumsphase schließt sich an. Sie dient der Vermehrung der vegetativen Einheiten und der Produktion von Biomasse der Pilze. Wachstum kann nun in mm/d angegeben werden, wie Bild 10 zeigt. Die Steigung der Kurven (dW/dt) in Bild 36 ist abermals abhängig vom Substrat.

Wie in Ziffer 2.1.5 dargelegt, bestimmt der sich in der Spore einstellende Wassergehalt den Prozeß der Auskeimung. Im Modell wird davon ausgegangen, daß erst ab dem Grenzwassergehalt biologische Stoffwechselvorgänge beginnen und die Pilzspore anfängt zu wachsen (Bild 36). Bis dahin wird sie als nicht physiologisch aktives Material betrachtet, dessen Eigenschaften mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten und damit der Feuchtetransport durch die Sporenwand mithilfe des Fick'schen Gesetzes beschrieben werden können. Beim biohygrothermischen Modell wird daher von der Vorstellung ausgegangen, daß die Wasseraufnahme bis zum Beginn des Stoffwechsels über reine Diffusion statt-

findet. Nach Beginn der Stoffwechselaktivitäten kann der Pilz, ggf. unabhängig von äußeren Bedingungen, seinen Stoffwechsel selbst regulieren. Der umfangreiche Regelmechanismus ist aber weitgehend unbekannt und kann daher nicht physikalisch beschrieben werden. Dies ist auch nicht erforderlich, da im Modell angenommen wird, daß der kritische Wassergehalt (Grenzwassergehalt), ab dem die Stoffwechselvorgänge einsetzen, erst gar nicht überschritten werden darf.

Das instationäre biohygrothermische Verfahren zur Vorhersage der Sporenauskeimung beruht auf dem Grundgedanken, daß eine Pilzspore aufgrund der in ihr vorhandenen Stoffe ein gewisses osmotisches Potential besitzt, mit dessen Hilfe Wasser aus der Umgebung – sowohl aus Materialien als auch aus der Luft – aufgenommen wird. Dieses Potential kann mithilfe einer Feuchtespeicherfunktion beschrieben werden, der Diffusionswiderstand der Sporenwand durch einen feuchteabhängigen s_d -Wert. Die Spore kann aufgrund ihrer Abmessungen isotherm betrachtet werden; somit sind auch andere Transportvorgänge (z.B. kapillares Saugen) über feuchteabhängige s_d -Werte der Diffusion zuzurechnen. Neben den klimatischen Randbedingungen bestimmen also die Feuchtespeicherfunktion und der s_d -Wert die Feuchteaufnahme.

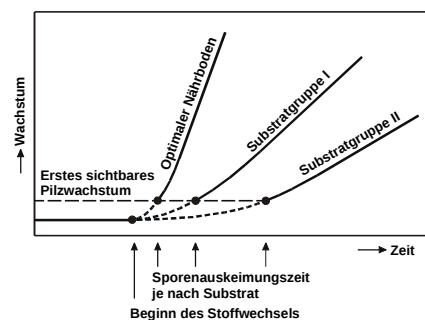


Bild 36 Schematische Darstellung der Modellvorstellung für die vom Substrat abhängigen Wachstumsvorgänge im Bereich der Anlauf-, der Beschleunigungs- sowie der Wachstumsphase (vgl. Bild 4) von Schimmelpilzen.

Aufgetragen wird das Pilzwachstum über der Zeit bei optimalem Nährboden sowie bei den Substratgruppen I und II. Angegeben sind die Zeitpunkte des Stoffwechselbeginns von Schimmelpilzen und die vom Substrat beeinflusste Sporenauskeimungszeit, die allgemein durch das erste sichtbare Schimmelpilzwachstum definiert wird.

Modellannahmen

Das biohygrothermische Modell kann somit die Entwicklung der Spore bis zum Erreichen des Grenzwassergehalts beschreiben. Mit dem Beginn der physiologischen Aktivitäten kann der Pilz durch verschiedene Mechanismen seinen Nährstoff- und Wasserhaushalt selbst beeinflussen. Da zur Modellierung dieser Vorgänge der derzeitige Kenntnisstand nicht ausreicht, soll der Einfluß der Substrate durch folgende vereinfachende Annahmen ermöglicht werden:

- Die Wasseraufnahme der Sporen wird auch nach Beginn der Stoffwechselvorgänge mit dem Diffusionsansatz berechnet.
- Der Grenzwassergehalt wird mithilfe der IsoPLEthen für Sporenauskeimung wie folgt festgelegt: Temperaturabhängig kann aus den entsprechenden LIM-Kurven in den IsoPLEthen die tiefste relative Feuchte abgelesen werden, bei der Sporenauskeimung stattfindet. Mithilfe der für das Sporeninnere zutreffenden Feuchtespeicherfunktion kann damit der Grenzwassergehalt errechnet werden.

Der in Bild 36 dargestellte 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_{Bau} -Kurven in den entsprechenden IsoPLEthen der Substratgruppen 0, I und II.

Modellierung der Schimmelpilzsporen

Für die Berechnung des Wassergehalts in einer Pilzspore mithilfe des biohygrothermischen Modells ist es wünschenswert, daß die instationär ablaufenden hygrothermischen Vorgänge in der Modellsore mithilfe bekannter Rechenverfahren ermittelt werden können. Um das Rechenmodell einfach zu gestalten, sollte die Pilzspore bei der Modellierung als ein „biologischer“ Wandaufbau betrachtet werden. Dabei kann folgendermaßen vorgegangen werden.

Bild 37 oben zeigt eine quasi reale, vergrößerte Spore. Diese kann man sich vorstellen als Kugel mit einer Sporenwand. Die reale Spore berührt den Baustoff, d.h. die hygrothermischen Randbedingungen an dieser Oberfläche beeinflussen die feuchtetechnischen Vorgänge in der Spore. Allerdings beeinflusst die Spore aufgrund ihrer geringen Abmessungen sicherlich nicht die bauphysikalischen Randbedingungen im Bereich der Baustoffoberfläche. Daher ist es nicht sinnvoll, eine Gesamtmodellierung, d.h. den Bauteilaufbau mit der Spore als Wandbelag, wie ihn Bild 37 Mitte zeigt, zu verwenden. Ein derartiges Rechenmodell mit der Spore als Schicht vor einem Bauteil würde sogar zu fehlerhaften Ergebnissen führen, da die Spore einen zusätzlich hohen, unrealistischen Diffusionswiderstand darstellen würde. So wird die Modellsore, wie in Bild 37 unten gezeigt, als von der Wand unabhängig angenommen. Damit können beliebige Temperatur- und Feuchteverläufe als Klimarandbedingungen für das biohygrothermische Modell verwendet werden.

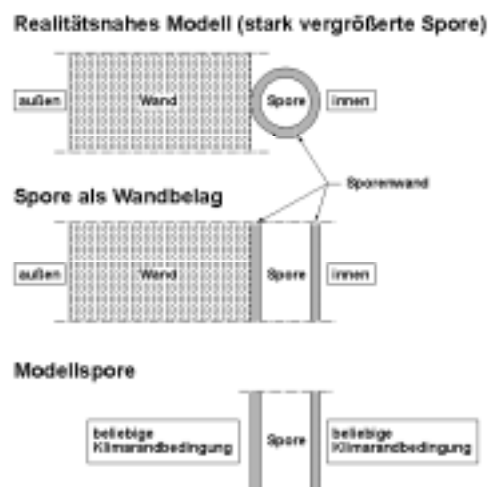


Bild 37 Schematisierte Vergleichsdarstellung einer Spore auf einer Wand (oben), einer Spore als Wandbelag (Mitte) und einer Modellsore (unten).

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

Die Berechnungen auf Basis des biohygrothermischen Modells werden mit dem Programm WUFI [76] durchgeführt. Die geometrischen und materialtechnischen Daten einer kugelförmigen Spore werden in einen eindimensionalen Aufbau umgerechnet (siehe Bild 37). Die verwendeten geometrischen Kennwerte der Modellspore im Vergleich zur natürlichen Spore sind in Tabelle 15 zusammengefaßt.

Für das Modell werden die Abmessungen der Spore (Sporenwand und Sporenninneres), die Permeabilität bzw. der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Sporenwand, die Feuchtespeicherfunktion der Spore und die Feuchtebedingung (Grenzwassergehalt) benötigt, die den Beginn der Keimung bzw. der physiologischen Vorgänge kennzeichnet. Die Wanddicke einer Spore wird in [34] mit etwa 500 nm angegeben. Weiterhin wird für den Durchmesser des Sporenkerns 2 µm angenommen. Damit ergibt sich ein Gesamtdurchmesser von ca. 3 µm für eine reale Spore. Für die Modellspore wird mit einem Durchmesser von $1,0 \cdot 10^{-2}$ m gerechnet. Die in der Literatur [109] für Bakteriensporen angegebene Feuchtespeicherfunktion kann auch zur Beschreibung von Pilzsporen verwendet werden [49]. Eine Umrechnung der Einheiten ist erforderlich, da die o.g. Feuchtespeicherfunktion in $g_{H_2O}/g_{Bakterienspore}$ angegeben ist und für die Berechnung mit dem Programmsystem WUFI die Feuchtespeicherfunktion in Vol-% benötigt wird, und kann mittels der Rohdichte von Pilzsporen erfolgen, die nach [45] im Bereich von 1,1 bis 1,2 g/cm³ liegt. Daher wird eine mittlere Rohdichte von 1,15 g/cm³ für Pilzsporen angenommen. Die daraus resultierende Feuchtespeicherfunktion ist in Bild 38 angegeben. Sie wurde im Bereich oberhalb von 80 % relative Feuchte etwas modifiziert, d.h. nach oben verschoben. Dies ist erforderlich, um zusammen mit der Festlegung des s_d -Wertes eine Modellierung zu erreichen, mit der das hygrothermische Verhalten der Modellsporen für alle 3 Substratgruppen einheitlich ermittelt werden kann.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand einer Sporenwand wird für die WUFI-Berechnungen als feuchteabhängige diffusionsäquivalente Luftschichtdicke benötigt. Diese konnte aufgrund der geringen geometrischen Dimensionen der Sporen bisher nicht direkt gemessen werden. Für das Modell erfolgt daher

eine Anpassung des s_d -Wertes durch Rückrechnungen auf Basis der Keimungszeiten in den Isoplethen für Sporenauskeimung bei Gefährdungsklasse B/C (Bild 31 unten) bei den Substratgruppen I und II in Bild 34. Bei dieser Rückrechnung [146] werden die s_d -Werte feuchteabhängig, aber unter isothermen Bedingungen solange angepaßt, bis die beiden folgenden Zeiten miteinander übereinstimmen:

- Die mit dem biohygrothermischen Modell ermittelte Zeitdauer, die eine Spore mit einem anfänglichen Ausgleichsfeuchtegehalt entsprechend 50 % relativer Feuchte benötigt, um den Grenzwassergehalt zu erreichen, ab dem sie zu keimen beginnt, und
- die im Isoplethensystem für unterschiedliche Feuchten genannte Sporenauskeimungszeit.

Tabelle 15 Zusammenstellung der für das biohygrothermische Modell benötigten geometrische Kennwerte der Modellspore im Vergleich zur natürlichen Spore.

Kriterium	Einheit	Natürliche Spore	Modellspore
Durchmesser d_{Sp}	m	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Wanddicke d_{Spw}	m	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Volumen V_{Sp}	m ³	$1,4 \cdot 10^{-17}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Oberfläche A_{Sp}	m ²	$2,8 \cdot 10^{-11}$	2,0
Verhältnis: Volumen/Oberfläche	m	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$

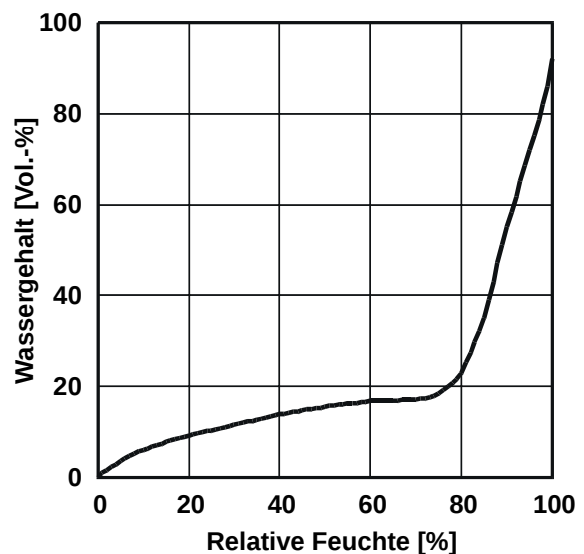


Bild 38 Feuchtespeicherfunktion zur Beschreibung einer Modellspore.

Die Feuchtespeicherfunktion aus Messungen zu Bakteriensporen nach Rubel [109] wird für Schimmelpilzsporen umgerechnet und leicht modifiziert.

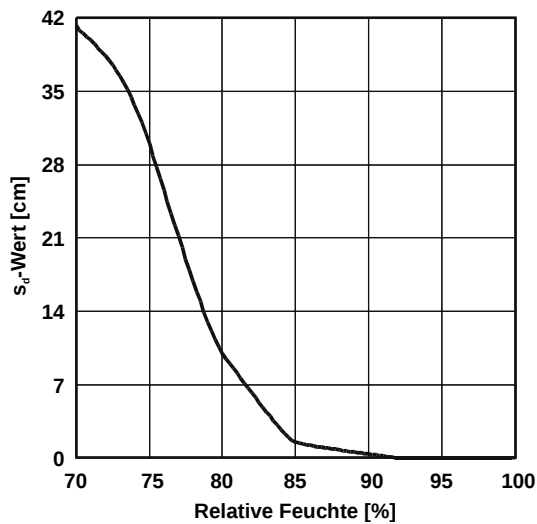


Bild 39 Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) einer Modellspore, wie sie, umgerechnet auf die entsprechenden Maßstäbe (siehe Tabelle 15), für die im biohygrothermischen Modell verwendete Sporenwand angesetzt wird.

Die mit dieser Methode festgelegte feuchteabhängige s_d -Kurve zeigt Bild 39 für den Bereich oberhalb 70 % relativer Feuchte. Diese Kurvenform entspricht derjenigen von Materialien, bei denen Lösungsdiffusion auftritt; d.h. bei hohen relativen Feuchten wird der s_d -Wert kleiner. Durch Anpassen der s_d -Werte der Sporenwand kann eine Modellierung der Sporen gegeben werden, die für alle 3 Substratgruppen Gültigkeit besitzt. Zur Ermittlung des Grenzwassergehalts in der Spore muß aus dem LIM B/C oder LIM_{Bau} I bzw. LIM_{Bau} II für die entsprechende Temperatur die relative Luftfeuchte abgelesen werden. Mithilfe der Feuchtespeicherfunktion erhält man so den entsprechenden Wassergehalt, der den Beginn der Stoffwechselaktivitäten kennzeichnet.

3.4 Sicherheitsannahmen

Bei der Entwicklung der beiden Modelle werden an einigen Stellen, an denen keine Daten in der Literatur vorhanden sind oder eine physikalische Modellierung aufgrund fehlender Grundlagen nicht möglich ist, Annahmen getroffen, die bei der Vorhersage stets „auf der sicheren Seite“ liegen. Dies bedeutet, daß mit dem entwickelten Gesamtmodell eher Schimmelpilzbildung vorhergesagt wird, als es in der Realität der Fall sein wird.

Als weitere wesentliche Sicherheitsannahmen werden Licht und Sauerstoff als „optimal vorhanden“

vorausgesetzt. Ferner werden Sporen als ubiquitär angenommen und es sind die geringsten in der Literatur bekannten Sporenauskeimungszeiten je Pilz verwendet worden. Da beispielsweise die Sporenauskeimungszeiten wesentlich vom Alter der Sporen oder deren Anpassungsfähigkeit abhängen, erscheint dieser Ansatz sinnvoll. Biotische Einflüsse werden nicht betrachtet. Außerdem werden alle auch am Bau selten vorkommenden Spezies in den Modellen berücksichtigt. Dies wird durch die Bildung der LIM-Kurven erreicht. Zur Erstellung der substratspezifischen Isoplethensysteme werden die in der Literatur vorhandenen ungünstigsten Bedingungen verwendet. Liegen beispielsweise für ein Material bei gleichen Randbedingungen unterschiedliche Sporenauskeimungszeiten vor, so werden auch hierbei jeweils die kleineren Zeiten berücksichtigt. Die Zuordnung verschiedener Baumaterialien zu den Substratgruppen wird so durchgeführt, daß stets eine Einstufung in die ungünstigere Gruppe erfolgt. Im Zusammenwirken all dieser Sicherheitsannahmen manifestiert sich ein Sicherheitskonzept, das Schimmelpilzvorforsagen somit als „auf der sicheren Seite liegend“ ausweist.

4. Umsetzung in ein Rechenverfahren

Wie die Verfahrensstruktur aussieht, welche Vorgehensweise zur Vorhersage angewendet werden soll und wie das Isoplethen- sowie das instationäre biohygrothermische Modell rechenstechnisch funktionieren, soll im folgenden erläutert werden.

4.1 Verfahrensstruktur und Vorgehensweise

Das Rechenverfahren beruht auf einer Verfahrensstruktur, welche die erläuterten Modelle miteinander verbindet. Die Vorgehensweise zeigt Bild 40 schematisch. Zunächst werden mit dem Softwaretool WUFI die zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung erforderlichen Mikroklima-Randbedingungen ermittelt oder aus externen Datenquellen eingelesen. Nach Festlegung der Substratgruppe erfolgt mithilfe der entsprechenden Isoplethensysteme für Sporenauskeimung eine Abschätzung, ob die an einer Spore anliegenden hygrothermischen Bedingungen ausreichen, um Sporenauskeimung zu ermöglichen. Für den Fall, daß Pilzbildung angezeigt wird, erfolgt eine Prognose mithilfe des instationären biohygrothermi-

schen Modells, das ein Austrocknen der Sporen berücksichtigen kann und die aus hygrothermischer Sicht kritischen Zeitperioden (z.B. Wärmebrückenwirkung aufgrund winterlicher Frostperiode) anzeigt. Wird mit dem biohygrothermischen Teilmodell wiederum Pilzbildung prognostiziert, kann mit veränderten Material- oder Konstruktionsannahmen erneut gerechnet werden. Ist auch in diesem Fall Sporenauskeimung nicht ausgeschlossen, wird mit dem Isoplethenmodell ausgewertet, in welcher Weise Myzelwachstum auftritt. Dabei können verschiedene Konstruktionen miteinander verglichen werden. Da die beiden Modelle – Isoplethenmodell sowie biohygrothermisches Modell – unabhängig voneinander angewendet werden können, erscheint es sinnvoll, deren Funktionsweise als Rechenverfahren einzeln zu erläutern.

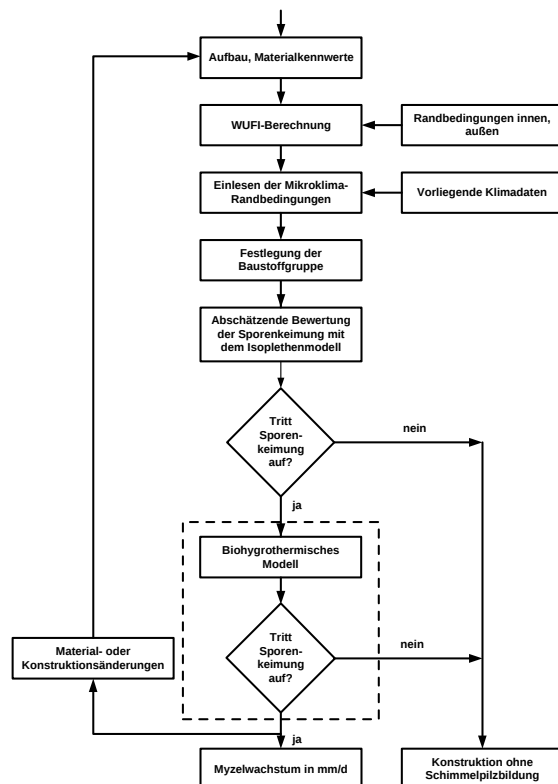


Bild 40 Flußdiagramm zur Vorgehensweise bei der Vorhersage von Schimmelpilzbildung mit dem Isoplethenmodell und dem biohygrothermischen Modell.

Der gestrichelte Kasten bezieht sich auf die Vorgehensweise bei den biohygrothermischen Berechnungen und wird später in Bild 42 näher erläutert.

4.2 Instationäre hygrothermische Wachstumsbedingungen

Das biohygrothermische Verfahren zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen kommt mit einfachen Ausgangsdaten zurecht. Zum einen sind Angaben zu den Materialien und einem möglichen Verschmutzungsgrad vonnöten, um eine Zuordnung zu den Substratgruppen durchführen zu können. Andererseits benötigt das Rechenverfahren instationäre Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte an den Stellen einer Baukonstruktion, an denen eine Schimmelpilzbildung möglich erscheint. Dazu stehen im wesentlichen 3 Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Datensätze aus Messungen an bestehenden Bauteilaufbauten werden eingelesen.
2. Daten aus instationären wärmetechnischen Berechnungen, z.B. mit Gebäudeberechnungsprogrammen wie SUNCODE [92] oder dreidimensionalen Finite-Differenzen-Programmen [130], können Verwendung finden. Dabei muß aber beachtet werden, daß man Einflüsse seitens Sorption oder Baufeuchte nicht berücksichtigt (siehe Ziffer 2.2). Dafür können bei Verwendung von dreidimensional rechnenden Programmen komplizierte Konstruktionen wie Wand-Decken-Anschlüsse, Raumecken oder Fensterkonstruktionen abgebildet werden.
3. Mit dem hygrothermischen Rechenprogramm WUFI können ein- oder zweidimensionale Konstruktionen modelliert und beliebige Klimarandbedingungen eingelesen werden. Die Angabe des Innenklimas erfolgt auf Basis vorhandener Datensätze.

Für kompliziertere Baukonstruktionen erscheint es sinnvoll, die Möglichkeiten 2 und 3 iterativ zu nutzen, so daß beispielsweise Einflüsse von Wärmebrücken mit dreidimensionalen Wärmeberechnungsprogrammen ermittelt und diese Ergebnisse als Randbedingungen für die Temperatur im WUFI-Programm eingelesen werden. Für die meisten Fälle sind aber ein- oder zweidimensionale Berechnungen ausreichend. Um eine sinnvolle Bewertung der Baukonstruktion vorzunehmen, muß die Zeitauflösung der Klimarandbedingungen so genau vorliegen, daß

die signifikanten instationären hygrothermischen Zustände ausreichend fein erfaßt und somit kurzzeitige hohe Feuchten nicht „weggemittelt“ werden. In der Regel reicht es, wenn Stundenmittelwerte vorliegen (siehe Ziffer 5.6).

Sporen, die auf eine feuchte Oberfläche treffen und dort zu keimen beginnen, haben zunächst keinen Kontakt zum Inneren des Untergrundmaterials. Daher reicht es zur Beurteilung der Sporenauskeimung aus, die hygrothermischen Bedingungen an den Bauteiloberflächen zu betrachten. Zur Ermittlung der Myzel-Wachstumsraten hingegen dürfen nicht ausschließlich die Verhältnisse an der Oberfläche berücksichtigt werden; es müssen vielmehr auch die hygrothermischen Bedingungen bis etwa 3 mm im Bauteil herangezogen werden. Damit wird man der Tatsache gerecht, daß Schimmelpilze ab einem gewissen Wachstumsstadium in Materialien hineinwachsen und damit Feuchte auch aus tieferen Bauteilschichten verwerten können.

4.3 Funktionsweise des Isoplethenmodells

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 in der Bauteiloberfläche mit den Angaben der Sporenauskeimungszeiten bzw. des Myzelwachstums in den entsprechenden Isoplethensystemen verglichen werden. Hierzu liegen jeweils für die Gefährdungsklassen A bzw. B/C auf optimalem Nährboden sowie für die Substratgruppen I und II Isoplethensysteme vor, wie die Bilder 31, 32, 34 und 35 zeigen. 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. Mit dem Rechner lassen sich die Bewertungen auf Basis des Isoplethenmodells automatisch durchführen. Dazu werden die einzelnen Isoplethensysteme auf Basis der Gleichung (15) beschrieben. Analog werden die einzelnen Isolinien erfaßt. Die Bereiche zwischen den Isolinien werden interpoliert. Liegen die Wachstumsbedingungen für eine be-

stimmte Zeitdauer oberhalb der entsprechenden LIM-Kurve, kann es je nach Gefährdungsklasse bzw. Substratgruppe zu Schimmelpilzaktivität kommen. Im folgenden wird diese Funktionsweise des Isoplethenmodells zur Beurteilung der Sporenauskeimung und des Myzelwachstums detailliert erläutert.

Sporenauskeimung

Sporenauskeimung ist immer dann möglich, wenn eine gewisse Temperatur und relative Feuchte über eine bestimmte Zeitdauer anhält. Die Zeitdauern sind durch die Isolinien in den Isoplethensystemen festgelegt und für einzelne Substratgruppen angegeben. Damit ist materialabhängig die Aussage möglich, ob Sporenauskeimung bei entsprechenden stationären hygrothermischen Wachstumsbedingungen auftreten kann. In der Regel treten aber instationäre Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf. Um diese Verläufe, die aus bauphysikalischen Untersuchungen stammen, mithilfe des Isoplethenmodells ebenfalls erfassen und bewerten zu können, werden auf Basis der entsprechenden Isoplethensysteme für Sporenauskeimung die zeitlichen Beiträge, die einzelne hygrothermische Zustände zur Sporenauskeimung liefern, aufsummiert; d.h. es wird mithilfe der einzelnen Isolinien (z.B. 4 Tage) angegeben, welchen Beitrag ein Stundenwert, der beispielsweise auf dieser Isolinie liegt, zur Sporenauskeimung beiträgt, nämlich $1 / (4 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ Stunden}) = 0,01$. 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 also angegeben werden, ob es in einem bestimmten Zeitraum zu Sporenauskeimung kommt. In Bild 41 unten sind die derart ermittelten Ergebnisse für die 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. Eine eingehende Betrachtung dieses Anwendungsbeispiels erfolgt unter Ziffer 5.4.

Die Beurteilung der Sporenauskeimung auf Basis des Isoplethenmodells hat den Nachteil, daß es bei instationären Mikroklima-Randbedingungen ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen nicht berücksichtigen kann. Daher wird dieses Verfahren bei instationärem Klima eher Sporenauskeimung vorhersagen als das biohygrothermische Modell.

Myzelwachstum

Analog kann mithilfe der substratspezifischen Isoplethensysteme für Myzelwachstum angegeben werden, wie stark Pilze maximal wachsen. Das Myzelwachstum wird in analoger Weise auf Basis der entsprechenden Isoplethensysteme ermittelt. Dabei werden die einzelnen Stundenwerte für Temperatur und relative Feuchte jeweils gewertet. 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 Std., also um 0,25 mm wächst. Es erfolgt auch hierbei wieder die Bildung eines Summenwertes, der als Verlauf in der oberen Graphik des Bildes 41 dargestellt wird. Wie man erkennt, wächst der Pilz beispielsweise hinter der Möbliierung wesentlich schneller als in der Raumecke.

Die Angabe in mm/d stammt aus biologischen Untersuchungen, bei denen eine Petrischale mit Vollmedium in der Mitte mit Pilzsporen beimpft wird und sich ein kreisförmiger Bewuchs einstellt. Daher kann 1 mm/d so gedeutet werden, daß ein Pilzbewuchs um 1 mm in seinem Durchmesser pro Tag zunimmt. Da auf der Oberfläche einer Wand in der Regel aber eine unbekannte Anzahl von Pilzsporen auskeimen und wachsen werden, sind die Angaben eines Myzelwachstums nach einem bestimmten Zeitraum nur qualitativ zu betrachten. Daher wird in Bild 41 ein „äquivalentes“ Myzelwachstum angegeben. Dennoch können Vergleiche zwischen unterschiedlichen Substraten oder klimatischen Randbedingungen durchgeführt werden. Eine Anlaufzeit für Myzelwachstum nach längerem Stillstand der Pilzaktivität durch ungünstige Wachstumsbedingungen wird nicht berücksichtigt, um stets den kritischeren Fall zu erfassen.

4.4 Funktionsweise des biohygrothermischen Modells

Der erste Schritt ist die meßtechnische oder rechnerische Ermittlung der instationären Temperatur- und Feuchteverläufe als Randbedingungen. Anschließend erfolgen die eigentlichen Berechnungen mit dem biohygrothermischen Modell. Durch das Einlesen beliebiger Klimadaten können in einfacher Art bauphysikalische Einflußgrößen auf das instationäre Feuchte- und Temperaturverhalten der Bauteile und Bauteiloberflächen bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung berücksichtigt werden.

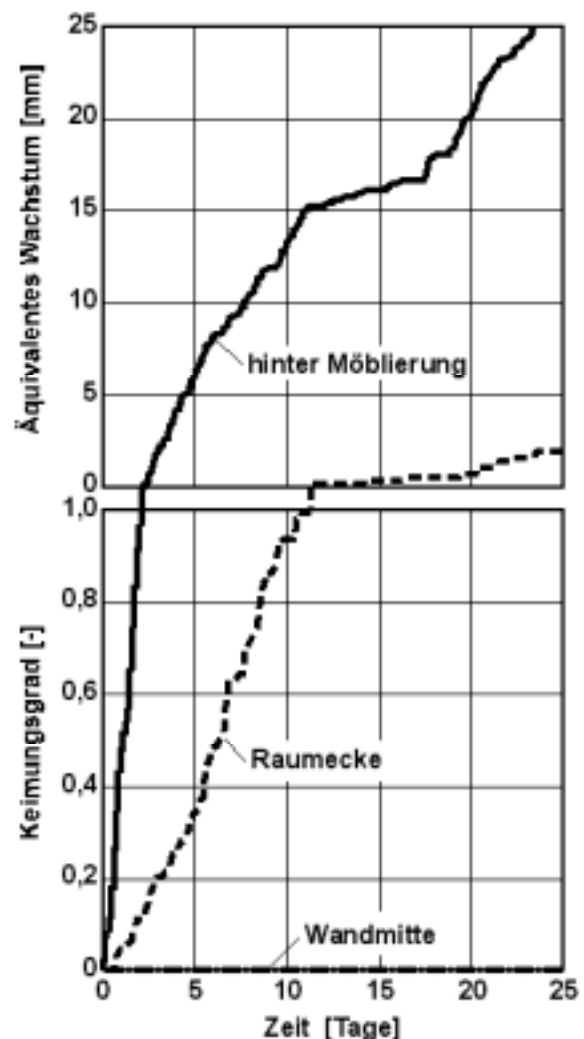


Bild 41 Zeitverlauf von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für 3 verschiedene Stellen (Wandmitte, Ecke und hinter Möbliierung).

Oberer Bildteil: Äquivalentes Myzelwachstums in mm.

Unterer Bildteil: Keimungsgrad.

Zugrunde gelegte Daten: Substratgruppe II gemäß Bild 34 unten und 35 unten.

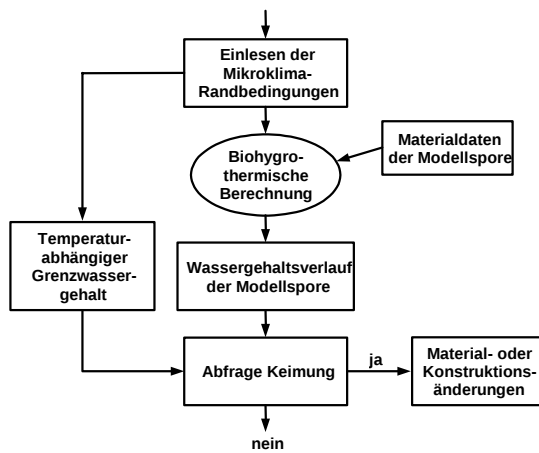


Bild 42 Flußdiagramm zur Vorgehensweise bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung mit Hilfe biohygrothermischer Berechnungen.

Zunächst werden die Klimarandbedingungen sowie die Materialdaten für die Modellspore in das Rechenprogramm WUFI eingelesen und der Verlauf des Wassergehalts in der Spore biohygrothermisch berechnet. Die Abfrage zur Keimung erfolgt durch Vergleich des Wassergehalts in der Spore mit dem temperaturabhängigen Grenzwassergehalt.

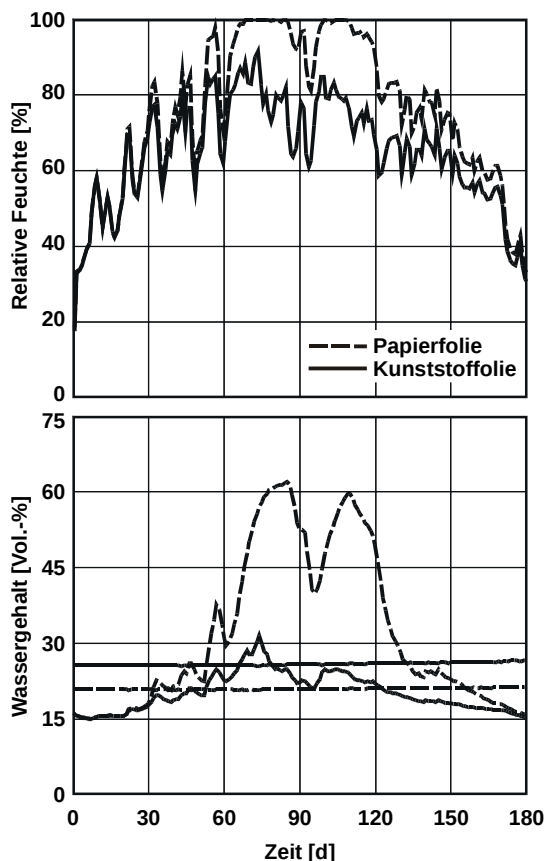


Bild 43 Zeitverläufe der mit dem Rechenprogramm WUFI ermittelten relativen Feuchten an den Dampfbremsen aus Papierfolie und Kunststoffolie (Bild oben) sowie des Wassergehalts in den auf den Dampfbremsen sich befindlichen Sporen (Bild unten).

Im unteren Diagramm sind zusätzlich die Grenzwassergehalte, ab denen Keimung eintritt, eingetragen.

Bild 42 zeigt ein Ablaufschema zur Funktionsweise des biohygrothermischen Modells. Zunächst werden die Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte als Mikroklima-Randbedingungen für die biohygrothermische Berechnung der Modellspore eingelesen. Mithilfe der ins Programm WUFI eingegebenen Modellierung der Spore erfolgt in Abhängigkeit von den Mikroklima-Randbedingungen die Ermittlung des Wassergehalts in der Modellspore. Der Wassergehalt wird mit dem Grenzwassergehalt, ab dem die Sporenauskeimung beginnt, verglichen, wie Bild 43 für den Fall einer Schimmelpilzbildung auf der Dampfbremse in einem dampfdichten Satteldach zeigt. Übersteigt der Wassergehalt in der Modellspore den Grenzwert, setzt Sporenauskeimung ein und die Berechnung kann ggf. mit veränderten Materialdaten oder Konstruktionsaufbauten bzw. Klimarandbedingungen erneut erfolgen.

5. Validierung des entwickelten Verfahrens

Zur Überprüfung des entwickelten Verfahrens ist eine gründliche Validierung unerlässlich. Dazu werden zunächst Plausibilitätsbetrachtungen angestellt. Sodann werden die Berechnungsergebnisse des biohygrothermischen Modells durch Vergleich mit Laborversuchen, Freilanduntersuchungen und Erhebungen in bewohnten Objekten verglichen. Eine experimentelle Verifizierung des Isoplethenmodells zur Bewertung der Sporenkeimung und des Myzelwachstums wird ergänzend durchgeführt. Der Vergleich mit anderen Verfahren zur Vorhersage der Schimmelpilzbildung sowie Daten aus der Literatur und eine Sensitivitätsanalyse schließen die Validierung ab.

5.1 Plausibilitätsbetrachtungen

Im Zuge der Plausibilitätsbetrachtungen werden bekannte Schimmelpilzerscheinungen „im täglichen Leben“ herangezogen und überprüft, ob sie mit dem Isoplethenmodell zu erklären sind. Tabelle 16 zeigt eine Zusammenstellung solcher Plausibilitätsbetrachtungen und die Überprüfung mit den Kurven im Isoplethenmodell.

Ermittelt man für freistehende Gegenstände in einem Raum und außerhalb von Gebäuden die Möglichkeit einer Schimmelpilzbildung unter Verwen-

dung eines typischen Jahresverlaufs der Klimabedingungen und vergleicht die Ergebnisse mit den Isoplethenresultaten, so zeigt sich in Bezug auf Wohnräume keine mikrobielle Aktivität für die Substratgruppen I und II. Nimmt man allerdings optimalen Nährboden an, so ergibt sich auf Basis des Isoplethenmodells Pilzbefall, was auch mit der täglichen Erfahrung übereinstimmt. Bei diesen Vergleichen wird auf die in [73] dargestellten Ergebnisse von Messungen der Temperatur und relativen Feuchte in mehreren Wohnungen zurückgegriffen. Dabei liegen im 3. Quartal (Juli, August und September) bei einer Temperatur von 20 °C die höchsten relativen Feuchten in Wohnungen bei 70 % oder etwas darüber. Diese Klimabedingungen reichen bei optimalem Nährboden (Bild 31) aus, um Sporen auskeimen zu lassen; bei Substratgruppen I und II (Bild 34) tritt jedoch keine Auskeimung auf.

Im Jahresgang liegen die Tagesmittel der Außenlufttemperatur und relativen Feuchte [67] in den Monaten August bis November oberhalb des LIM für optimalen Nährboden (Bild 31). Die Werte im Herbst überschreiten sogar den LIM_{Bau} der Substratgruppe I (Bild 34 oben), was bedeutet, daß beispielsweise ungeschütztes Holz in einigen Fällen verschimmeln könnte. Putze, die zur Substratgruppe II gehören, dürfen gemäß Festlegung der LIM_{Bau}-Kurve in Bild 34 unten keinen Pilzbefall aufweisen. Diese Vorhersagen stimmen mit Beobachtungen in der Natur ebenfalls überein.

Tabelle 16 Zusammenstellung der unterschiedlichen Plausibilitätsbetrachtungen zur Überprüfung des Isoplethenmodells.

Betrachtungsgegenstand	Durchgeführte Bewertung	Erwartetes Ergebnis	Übereinstimmung
Freistehende Gegenstände im Raum und im Freiland	Vergleich des Jahresverlaufs der Innen- sowie Außenklimadaten mit den Isoplethen	Schimmelpilzbefall nur bei starken Verunreinigungen	ja
Lebensmittel im Kühlschrank	Vergleich des Kühlschrank-Innenklimas mit Isoplethen	Schimmelpilzbefall	ja
Raumecke bzw. Wärmebrücke	Vergleich eines typischen Jahresverlaufs der entsprechenden Klimadaten mit den Isoplethen	Schimmelpilzbefall	ja
Regelquerschnitt (Bauteil-Mitte)		kein Schimmelpilzbefall	ja

Tabelle 17 Zusammenstellung von Daten für die Validierung des Isoplethenmodells anhand von Klimakammer-Beobachtungen. Verglichen werden die hygrothermischen Daten eines festgestellten Schimmelpilzbefalls in 2 Klimakammern des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik mit der Schimmelpilzvorhersage nach dem Isoplethenmodell.

Meßorte	Substratgruppe	Raum		Wandoberfläche		Schimmelpilzwachstum	
		Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	Temperatur [°C]	relative Feuchte [%]	beobachtet	mit Isoplethenmodell ermittelt
A1	I	23,0	80	17,5	100	ja	ja
A2				19,0		ja	ja
A3				23,0		teilweise	1)
B1	I	20,0	65	16,0	84	ja	ja
B2				17,3	77	nein	nein
B3				17,7	75	nein	nein

1) Dieser Wert liegt exakt auf der Grenzlinie (LIM_{Bau} II für Substratgruppe II).

Rechnet man unter Annahme der Klimabedingungen in einem Kühlschrank eine mögliche Schimmelpilzbildung auf Lebensmitteln (LIM für optimalen Nährboden) oder auf dem Kunststoff des Kühlschranks (Substratgruppe II) nach, so ergibt sich im erstgenannten Fall Pilzbildung, im zweiten keine. Auch dies stimmt mit den täglichen Erfahrungen überein. Dabei wurde eine Temperatur von 10 °C und 80 % relative Feuchte in den Kühlfächern zugrunde gelegt. Umgerechnet auf Wohnraumbedingungen entspräche dies einer Temperatur von 20 °C und etwas weniger als 50 % relative Feuchte.

Die bauphysikalisch interessanten Fälle einer Pilzbildung hinter Schränken, in Raumecken oder bei Wärmebrücken wurde ebenfalls mit dem entwickelten Modell überprüft. Tabelle 17 zeigt die in einer Klimakammer durchgeführten Messungen der Temperaturen und relativen Feuchten im Raum sowie an den Oberflächen. An einigen Meßorten wurde Schimmelpilzbefall festgestellt. Nimmt man die gemessenen hygrothermischen Daten als Randbedingungen für das Isoplethenmodell und ordnet die Wandmaterialien den Substratgruppen zu, so deckt sich die Vorhersage mit den Beobachtungen bzgl. Pilzbildung (rechte Spalte in Tabelle 17). Ergebnisse weiterer Berechnungen zu einer möglichen Schimmelpilzbildung an Wandoberflächen mit unterschiedlichen Innenklimarandbedingungen werden später in Ziffer 7.1 erläutert.

5.2 Laborversuche

Zur Validierung des biohygrothermischen Modells werden biologische Laborversuche herangezogen. Zunächst erfolgt ein Vergleich der mit dem biohygrothermischen Modell berechneten Sporenauskeimungszeiten mit in Isoplethensystemen dargestellten gemessenen Daten aus der Literatur. Ferner werden Untersuchungsergebnisse, die im Schimmelpilzprüfstand des Fraunhofer-Institut für Bauphysik ermittelt wurden, als Vergleichsbasis verwendet.

Das biohygrothermische Modell basiert auf der Annahme, daß Schimmelpilzsporen aufgrund ihres eigenen osmotischen Potentials Wasserdampf aus ihrer Umgebung aufnehmen können. Zur Modellierung werden das Pilzzinnere mittels der Feuchtespeicherfunktion und die Sporenwand durch einen feuchteabhängigen s_d -Wert beschrieben. Die Feuchteaufnahme muß bei höheren Temperaturen schneller ablaufen als bei niedrigen, da der Wasserdampfpartialdruck das treibende Potential für Diffusionsvorgänge darstellt und sich während der Keimung bei höheren Temperaturen größere Wasserdampfpartialdruckdifferenzen zwischen der Umgebung der Spore und dem Sporeninneren ergeben als bei niedrigeren Temperaturen. Um dies nachzurechnen, wurden in [146] die s_d -Werte für die Pilzart *Aspergillus restrictus* angepaßt. Diese Anpassung erfolgte für 24 °C, indem die für diese Temperatur, in dem von Smith [126] ausgemessenen Isoplethensystem (Bild 9), angegebenen Sporenauskeimungszeiten für unterschiedliche relative Feuchten mit den Berechnungsergebnissen verglichen und die s_d -Werte sukzessive angepaßt wurden. Ermittelt man mit dem biohygrothermischen Modell die Sporenauskeimungszeiten, so müßten diese für niedrigere Temperaturen (z.B. 20 °C und 15 °C) länger werden. Ein Vergleich mit den im o.g. Isoplethensystem genannten Sporenauskeimungszeiten für 20 °C und 15 °C ist in Bild 44 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung beträgt bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Feuchte von 80 % beispielsweise nur 0,6 Stunden bei einer Sporenauskeimungszeit von etwa 8 Tagen; die Abweichung liegt also unter 1 %. Dies deutet darauf hin, daß die im Modell getroffenen Annahmen die in

einer Spore tatsächlich ablaufenden biohygrothermischen Vorgänge gut wiedergeben.

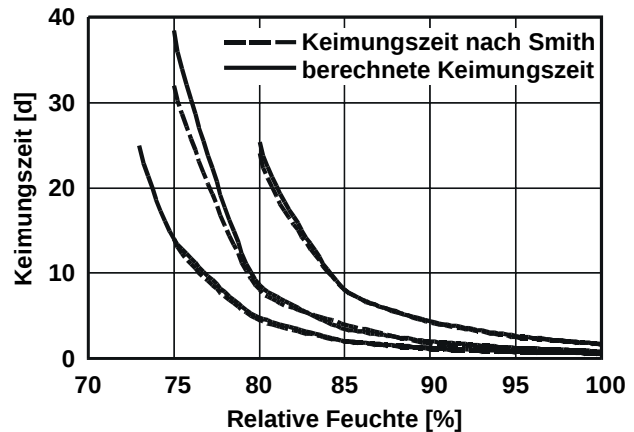


Bild 44 Sporenauskeimungszeit in Abhängigkeit von relativer Feuchte und Temperatur als Vergleich zwischen den Angaben von Smith [126] und biohygrothermischen Berechnungsergebnissen für den Schimmelpilz *Aspergillus restrictus*.

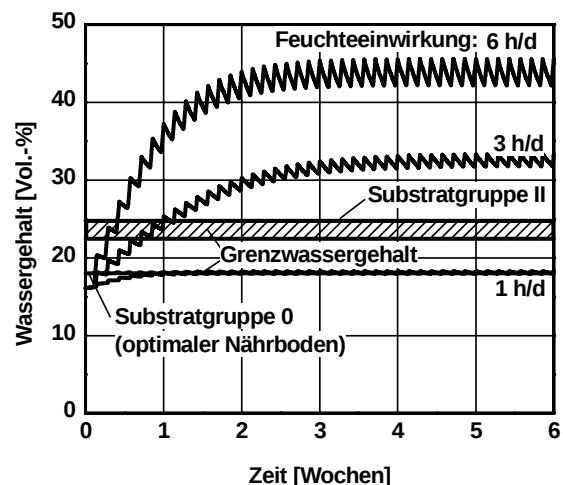


Bild 45 Zeitliche Verläufe der mit dem biohygrothermischen Modell berechneten Wassergehalte in den sich im Schimmelpilzprüfstand [37] befindlichen Sporen bei verschiedenen langen Feuchteeinwirkungen pro Tag mit Angabe der Grenzwassergehalte.

Zugrunde gelegte Daten:

Randbedingungen (wie im Prüfstand [37]):

Relative Feuchte: 95 %

Temperatur: 18,5 °C

Einwirkdauer pro Tag: 1 h, 3 h, 6 h (variiert)

Sonstige Zeit: 60 % relative Feuchte und

26,1 °C.

Grenzwassergehalt, ab dem Keimung eintritt:

Substratgruppen 0 bzw. II

Schraffierter Bereich: Kennzeichnet den Grenzwassergehalt, der sich im Temperaturbereich zwischen 18,5 °C (oberer Wert) und 26,1 °C (unterer Wert) im Prüfstand ergibt.

In der in Bild 12 gezeigten Versuchsanlage für Schimmelpilztests an Bau- und Oberflächenmaterialien können die Parameter Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Oberflächenfeuchte und -temperatur variiert werden. Deshalb eignen sich die in diesem Schimmelpilzprüfstand ermittelten Ergebnisse [37] gut zur experimentellen Verifizierung des biohygrothermischen Modells. Bei den Untersuchungen werden in einer Versuchsreihe abwechselnd 95 % relative Feuchte bei 18,5 °C und dazwischen 60 % und 26,1 °C für eine gewisse tägliche Zeitdauer an die Proben angelegt. Rechnet man für den Fall starker Verschmutzung (Bild 14 rechts) bei einer angenommenen 1-, 3- oder 6-stündigen Feuchteperiode von 95 % am Tag mit dem biohygrothermischen Modell die Verläufe der Wassergehalte in der Modellspore aus, so erkennt man, wie in Bild 45 dargestellt, ein Aufschaukeln der Sporenfeuchte. Je nach täglicher Zeitdauer der hohen Feuchte (95 %) werden unterschiedliche Wassergehalte erreicht. Verwendet man zur Bestimmung des Grenzwassergehalts den LIM für optimalen Nährboden, was plausibel ist, da die „starke Verschmutzung“ durch eine leicht abbaubare organische Substanz gebildet wird, so zeigt sich bereits bei einer einstündigen Feuchte von 95 % pro Tag Pilzbildung. Dies stimmt mit den Angaben in Bild 14 rechts [37] gut überein. Bei 3 Stunden und vor allem bei 6 Stunden hoher täglicher Feuchte setzt stets Schimmelpilzbildung ein. Bei ungünstigerem Nährboden (Substratgruppe I oder II) werden mindestens 3, eher 6 Stunden pro Tag 95 % relative Feuchte benötigt, um Pilzwachstum zu erzeugen (Bild 14 links). Die Auskeimung wird, wie in [37] erläutert, bei 14 °C verlangsamt im Vergleich zu den Versuchen mit einer Oberflächentemperatur von 18,5 °C. Dies ergeben auch die biohygrothermischen Berechnungen. Vor allem liegt der Grenzwassergehalt bei einer Temperatur von 14 °C bei knapp unter 30 Vol.-% und damit höher als für 18,5 °C. Bei dieser Temperatur beträgt er, wie in Bild 45 dargestellt, für Substratgruppe II 25 Vol.-%. Das dargestellte schraffierte Band veranschaulicht den Temperaturwechsel zwischen 18,5 °C (oberer Wert) und 26,1 °C (unterer Wert). Insgesamt erkennt man eine gute Übereinstimmung zwischen den Vorhersagen aus biohygrothermischen Berechnungen und den im Schimmelprüfstand durchgeführten Messungen.

Cziesielski schreibt in [15], daß zum Wachstum von Schimmelpilzen die relative Feuchte an den Bauteiloberflächen während einer Zeit von 6 Stunden täglich über mindestens 5 Tage hinweg den Wert von 80 % überschreiten muß. Rechnet man diese Bedingungen mit dem biohygrothermischen Modell nach, so setzt bei einer angenommenen Temperatur von 20 °C Pilzbildung bei einem Feuchtwechsel von 18 Stunden mit 60 % relativer Feuchte und 6 Stunden mit 90 % tatsächlich nach etwa 5 Tagen ein. Werden 16 Stunden lang 60 % relative Feuchte zugrunde gelegt, reichen 80 % Feuchte an 6 Stunden täglich nicht zur Sporenauskeimung aus. Bei täglich an 8 Stunden vorliegenden Luftfeuchten von 85 % setzt erst nach ca. 20 Tagen Pilzbildung ein. Bei konstant 80 % relativer Feuchte liegt die Sporenauskeimungszeit bei 12 Tagen, wie aus Bild 34 oben abgelesen werden kann. Dabei wird jeweils die Substratgruppe I vorausgesetzt. Insgesamt kann damit die etwas pauschalierende Aussage von [15] mit den Ergebnissen des neuen Modells bestätigt bzw. sogar differenziert werden.

5.3 Freilanduntersuchungen

Zur Validierung des biohygrothermischen Modells anhand von Freilandexperimenten wird auf meßtechnische Untersuchungen des Austrocknungsverhaltens von unbelüfteten, außen dampfdichten Satteldächern in [77] zurückgegriffen, die in einer Variante Schimmelpilzbildung im Inneren eines Bauteilaufbaus ergaben [70]. Bild 46 oben zeigt eine fotografische Aufnahme des Versuchsgebäudes. Bei Dächern mit Blecheindeckung kann aufgrund ihres hohen äußeren Dampfdiffusionswiderstandes praktisch keine Feuchte nach außen entweichen. Aufgrund hoher Sonneneinstrahlung auf der Südseite und damit erhöhter Temperaturen im Bereich der Blecheindeckung kommt es zeitweise zur sogenannten „Umkehrdiffusion“. Dies bedeutet, daß in Richtung des Temperaturgradienten Feuchte von der Außenseite nach innen wandert. Bei diffusionsoffenen Dampfbremsen erfolgt die Austrocknung eines Daches vor allem in den warmen Sommermonaten dann nach innen, also zum Raum hin. Vorübergehend ergibt sich dadurch an den Dampfbremsen eine erhöhte Feuchtelast. Dies wurde näher untersucht.

Die Versuchsfelder des Satteldaches bestehen aus einer Eindeckung aus Blech auf einer Holzschalung, Dämmung aus Mineralwolle und verschiedenen Dampfbremsfolien (Bild 46 unten). Der s_d -Wert der Papierfolie beträgt 3 m, der der feuchteadaptiven Kunststoffolie variiert je nach Klimarandbedingung zwischen 0,4 m bei hoher sommerlicher Feuchte (80 % relative Feuchte) und 4 m bei etwa 30 % relativer Feuchte im Winter. Zur meßtechnischen Simulation eines hohen Anfangsfeuchtegehaltes wurde das Holz vor dem Einbau befeuchtet und während der Messung regelmäßig bestimmt. Die Untersuchungsvarianten und hygrothermischen Ergebnisse sowie deren Interpretation werden in [77] diskutiert. Die bauphysikalischen Untersuchungen zeigten, daß bei der Folie aus Kunststoff [71] die geringsten Holzfeuchten auftraten. Bei der Untersuchungsvariante mit Papierfolie wurde bei Versuchsende festgestellt, daß neben Modergeruch auch Stockflecken, d.h. umfangreiche Schimmelpilzbildung im Dachaufbau aufgetreten waren. Mit dem Rechenprogramm WUFI wurden die Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte auf den raumseitigen Oberflächen der Papierfolie und der Dampfbremse aus Kunststoff für einen Beobachtungszeitraum von 180 Tagen nachgerechnet (Bild 43 oben). Diese Daten werden dem biohygrothermischen Modell zugrunde gelegt. Die Ergebnisse sind in Bild 43 unten dargestellt. Die beiden relativ konstant verlaufenden Kurven stellen die Grenzwassergehalte in der Modellschicht dar. Bei Überschreitung dieser Werte muß von Schimmelpilzbildung ausgegangen werden. Der gestrichelt dargestellte Verlauf gilt für die Dampfbremse aus Papierfolie, der durchgezogene für die verwendete Kunststoffolie. Die Kurve des Grenzwassergehalts für Kunststoff (Substratgruppe II zugeordnet) liegt über der für Papierfolie, die der Substratgruppe I angehört. Die mit dem biohygrothermischen Modell berechneten Wassergehalte in den Sporen, die sich auf den Dampfbremsen befinden, sind mit den Grenzwassergehalten zu vergleichen. Auf der Papierfolie ergeben sich aus der Rechnung im Vergleich zur Kunststoffolie deutlich höhere Wassergehalte. Man erkennt ferner, daß der Feuchtegehalt der Spore auf der Papierfolie über einen relativ langen Zeitraum über dem Grenzwassergehalt liegt. Nach rund 60 Tagen ist demzufolge mit

Schimmelpilzwachstum zu rechnen, was mit den Beobachtungen während der Messung im Freigelände gut übereinstimmt [121]. Bei der Kunststoffolie ist lediglich eine kurzfristige Überschreitung zu beobachten; ein großflächiges Schimmelwachstum ist nicht zu erwarten. Dies wurde auch nicht beobachtet, zumal Kunststoff eher noch ungünstigere Wachstums Voraussetzungen aufweist, als dies durch den LIM für Substratgruppe II beschrieben wird.

5.4 Erhebungen in genutzten Objekten

An einigen ausgewählten Beispielen einer Schimmelpilzbildung in bewohnten Gebäuden soll eine Überprüfung der neu entwickelten Vorhersagemodelle erfolgen. Dazu wird ein typischer mikrobieller Befall in 2 unterschiedlichen Wohnräumen sowie an einer Außenfassade herangezogen. Seit vielen Jahren werden Sanierungen alter Gebäude durchgeführt, die eine energetische Verbesserung zum Ziel haben. Dabei zeigten sich immer wieder Schimmelpilzschäden in den ungedämmten Wohnungen [28, 29, 31]. In einigen Objekten wurden an Wandaufbauten mit Schimmelbefall die wärme- und feuchte-technischen Zustände meßtechnisch erfaßt; sie können zur Überprüfung des Vorhersagemodells verwendet werden.

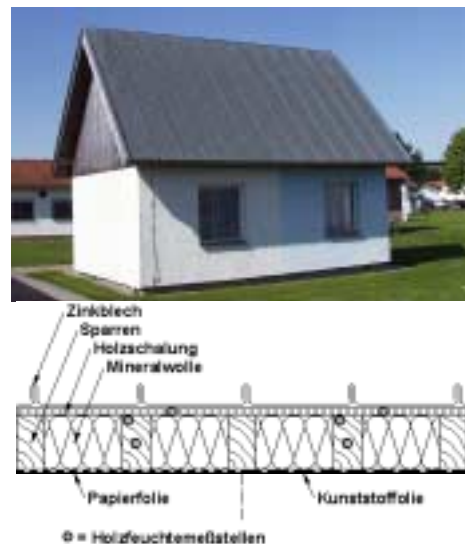


Bild 46 Angaben zu den Satteldachversuchen [70].

Oben: Fotografische Aufnahme des Versuchsbauwerks mit dem Satteldach.

Unten: Schematischer Querschnitt der untersuchten Dachkonstruktion mit Angabe der Materialien und Holzfeuchtemeßstellen.

Zugrundegelegte s_d -Werte:

Papierfolie: 3 m

Kunststoffolie: variabel (0,4 m im Sommer; 4 m im Winter).

In einem Fall zeigte sich auf der zur Außenwand zugekehrten Möbeloberfläche mit Kunststoffbeschichtung Schimmelpilzbefall. In dem Raum lag die mittlere Temperatur bei 20 °C und die relative Feuchte bei 57 %. An der verschimmelten Stelle wurden 14 °C und 84 % relative Feuchte während einer anhaltend kalten Winterperiode mit einer durchschnittlichen Außenlufttemperatur von 0 °C gemessen. Vergleicht man diese Klimarandbedingungen mit dem für beschichtetes Sperrholz geltenden Isoplethensystem der Substratgruppe II in (Bild 34 unten), so ergibt sich, daß sich auf der Platte an der Stelle zur Außenwand Schimmel entwickeln konnte, da die Auskeimungszeit dafür nur etwa 16 Tage beträgt. Bereits wenige Zentimeter von der Wand entfernt ergeben sich aber Klimabedingungen, die keine Keimung mehr gestatten. Von der kalten Wand ungestört, liegt die Temperatur auf der Arbeitsplatte bei etwa 20 °C. Für Schimmelpilzbildung müßten dazu mehr als 80 % relative Feuchte vorhanden sein.

In einem zweiten 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 Einbauschränk festgestellt [104]. Die Wärmeströme durch die Außenwand, die innere und äußere Oberflächen- sowie Lufttemperatur wurden während einer kalten Periode über eine längere Zeitspanne gemessen und ausgewertet [115]. Des weiteren war die relative Feuchte im Schlafraum meßtechnisch erfaßt worden. Entsprechende Datensätze liegen vor und werden zur Überprüfung des Isoplethenmodells herangezogen. An den Außenwandstellen ergibt sich im zeitlichen Mittelwert eine gemessene Oberflächentemperatur von 12,0 °C und 69 % relative Feuchte in der Mitte der Wand sowie 9,2 °C und 83 % relative Feuchte in den Außenwandecken. Vergleicht man diese mittleren (für eine Wintersituation typischen) hygrothermischen Zustände mit den Isoplethen für Putz (Substratgruppe II) in Bild 34 unten, so ist festzustellen, daß bei Wandmitte kein Pilzbefall zu erwarten ist. An den nicht von Möbeln bedeckten Stellen im Schlafzimmer trat im untersuchten Objekt auch kein Pilzbefall auf, was die Modellbetrachtung bestätigt. In der Außenwandecke hingegen liegt die LIM_{Bau} II-Kurve

für 9,2 °C bei etwa 85 %, also nur knapp über dem gemessenen Wert der relativen Feuchte. Unter Zugrundelegung eines Wärmeübergangswiderstandes von 1 m² K/W für Einbauschränke nach [110] ermittelt man für die Oberflächentemperatur 7,3 °C auf dem Putz hinter dem Schrank und eine mittlere relative Feuchte von 94 %. Gemäß den Isoplethen für die Substratgruppe II in Bild 34 unten muß dieser hygrothermische Zustand nur etwa eine Woche anhalten, um Pilzbildung hervorzurufen, was auch mit der Beobachtung im beschriebenen Fall übereinstimmt. Die in 10-Minuten-Werten vorliegenden instationären Randbedingungen wurden mithilfe der Isoplethen für Sporenauskeimung und Myzelwachstum instationär ausgewertet. Es zeigt sich gemäß Bild 41, daß die Klimarandbedingungen in Wandmitte nicht für eine Sporenauskeimung ausreichen. In der Raumecke hingegen 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. Bei Verwendung des biohygrothermischen Vorhersagemodells erhält man analoge Ergebnisse. Nur im Fall der Raumecke wird – entgegen den Ergebnissen des Isoplethenmodells – bei den biohygrothermischen Berechnungen keine Sporenauskeimung prognostiziert. Dies liegt daran, daß ein Austrocknen der Sporen durch zwischenzeitig auftretende niedrigere Feuchten im biohygrothermischen Modell mit berücksichtigt werden.

An den Außenfassaden einer Wohnanlage, die im Sommer bis Herbst fertiggestellt wurden, zeigte sich nach kurzer Zeit ein sichtbarer biologischer Aufwuchs. Wie in [68] 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“ [69]). 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. Dabei wird von folgendem Wandaufbau (von innen nach außen) ausgegangen:

Wandbildner:	150 mm Beton
Dämmmaterial:	160 mm Polystyrol in Wandmitte bzw. 160 mm Mineralwolle im Fenstersturz
Putz:	5 mm Kunstharzputz bzw. zum Vergleich 10 mm mineralischer Putz.

Zwischen den Polystyrolplatten wird ein Luftspalt mit 3 mm Dicke angenommen. Der Berechnung werden die Materialkennwerte der WUFI-Datenbank zugrunde gelegt. Es wird von einer normalen raumseitigen Feuchtelast ausgegangen. Als Außenklima dient das in Stundenmittelwerten vorliegende Testreferenzjahr für den Standort [53]. Die berechnete Wand hat eine Ausrichtung nach Norden, da diese aufgrund niedriger Sonneneinstrahlung am langsamsten austrocknet. Es werden, beginnend am 1. Oktober, Berechnungen über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt. Um die Rechenzeit im sinnvollen Rahmen zu halten, wird mit Tagesmittelwerten gerechnet. Diese sind deshalb geeignet, weil im vorliegenden

Fall weder eine Schlagregenbelastung noch direkte solare Einstrahlung von Bedeutung sind. Bei Beton wird von einem Anfangswassergehalt von 15 Vol.-% und bei Putz von 10 Vol.-% ausgegangen.

In Bild 47 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 Mitte 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 im Vergleich zur Fehlstelle im Putz noch höhere Feuchten [68]. Nimmt man diese Klimadaten als Randbedingungen für Berechnungen mit dem biohygrothermischen Modell, so ist in Bild 47 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 geringere Überschreitungen des Grenzwassergehaltes, was zu einem etwas geringeren Befall führt.

In Bild 48 werden die auf Basis der Isoplethen für Substratgruppe II ermittelten Werte für Sporenkeimung und Myzelwachstum ergänzend zu den Ergebnissen des biohygrothermischen Modells dargestellt. Es wird hier, um den Einfluß der hohen Einbaufeuchte im Spätherbst zu eliminieren, nur der Zeitraum Januar bis Juni ausgewertet. Zur Beurteilung des Myzelwachstums werden die Klimarandbedingungen an der Putzoberfläche sowie in etwa 2 mm Bauteiltiefe herangezogen. Es zeigt sich, daß die Klimarandbedingungen in Wandmitte nicht für eine Sporenauskeimung ausreichen. Im Bereich des Fenstersturzes bzw. beim Plattenstoß wird hingegen ein großflächiger Pilzbefall prognostiziert. Dies stimmt mit den Aussagen des biohygrothermischen Modells und mit den praktischen Beobachtungen am Gebäude überein.

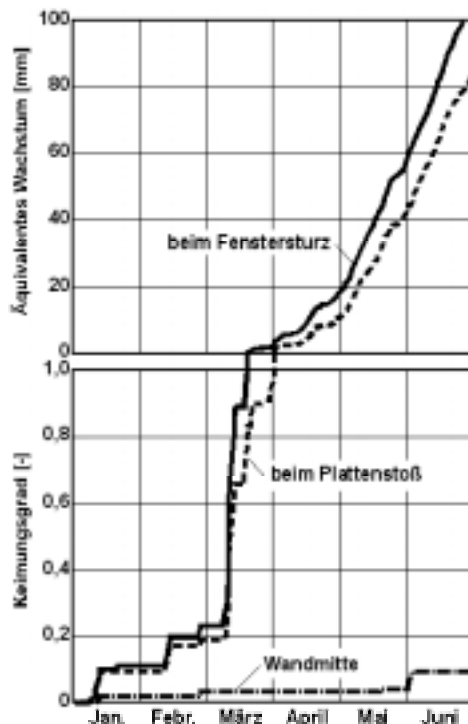


Bild 48 Zeitverlauf von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für 3 verschiedene Stellen (Wandmitte, beim Plattenstoß und beim Fenstersturz).

Oberer Bildteil: Äquivalentes Myzelwachstums in mm.

Unterer Bildteil: Keimungsgrad.

Zugrunde gelegte Daten: Substratgruppe II gemäß Bild 34 unten und 35 unten.

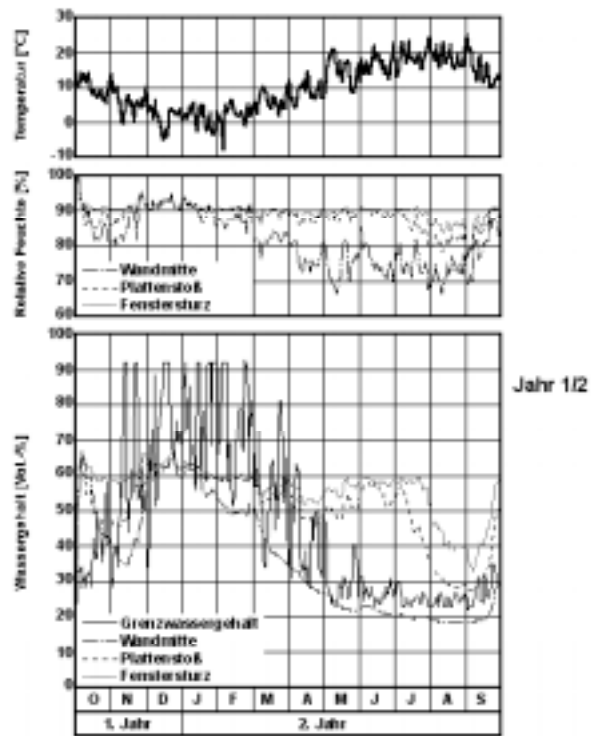


Bild 47 Berechnete Zeitverläufe von Temperatur (oben) und relativer Feuchte (Mitte) sowie des Sporen-Wassergehaltes (unten) an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.

Zugrunde gelegte Daten und Randbedingungen:

Klimadaten: gemäß Datensatz [53]

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.

5.5 Vergleich mit Literaturangaben

Im Rahmen der Validierung soll ein Vergleich der Ergebnisse des Isoplethensystems und des biohygrothermischen Modells mit Literaturangaben zu gemessenen Sporenauskeimungszeiten sowie Rechenergebnissen anderer Vorhersagemethoden durchgeführt werden. Zur Überprüfung des Isoplethenmodells werden die verwendeten Bewertungskurven (LIM A, LIM B/C bzw. LIM_{Bau}) mit entsprechenden Literaturangaben verglichen. Wie Bild 49 oben zeigt, liegt der LIM für Sporenkeimung bzw. Myzelwachstum für Gefährdungsklasse B/C jeweils unterhalb allen anderen Isolinen. Während Hens [47] und Clarke [13] etwa gleich verlaufende Kurven

benutzen, die im Temperaturbereich über 15 °C oberhalb des LIM liegen, verläuft in diesem Bereich die von Smith [126] gemessene Kurve für den Schimmelpilz *Aspergillus restrictus* nah am LIM B/C. Dies liegt daran, daß zur Bildung der eigenen LIM-Kurve alle im Bau auftretenden gesundheitsgefährdenden Pilzspezies berücksichtigt wurden und Pilzaktivität auch auf optimalem Nährboden mit erfaßt wird. Der LIM A liegt oberhalb des LIM B/C. Vergleichbare Literaturangaben dazu existieren nicht, da bisher niemand Gefährdungsklassen definiert hat.

Ein Vergleich der Literaturdaten, die sich meist auf Baumaterialien beziehen, mit den LIM_{Bau} der Substratgruppen I und II wird in Bild 49 unten gezeigt. Man erkennt, daß die vorgeschlagene Kurve der Substratgruppe I für alle Temperaturen die untere Einhüllende darstellt. Ab 20 °C liegt dieser LIM_{Bau} etwas tiefer als die Literaturangaben. Dies hat seine Ursache in der Verschiebung des LIM B/C für optimalen Nährboden nach oben zur Festlegung der LIM_{Bau}-Kurven. Damit werden die aus biologischen Messungen bekannten niedrigen Wachstumsvoraussetzungen bei optimalen Temperaturen (zwischen 25 °C und 30 °C) mit erfaßt; somit wird die Realität besser abgebildet als durch Annahme einer konstanten relativen Feuchte von 80 % oberhalb etwa 15 °C, wie dies Viitanen [137] vorschlägt. Die Angaben zur Substratgruppe II bilden die obere Einhüllende. Insgesamt erkennt man daraus, daß das eigene Verfahren bei der Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums differenzierter vorzugehen gestattet. Vor allem können auch Anwendungsfälle, in denen ein gedeihliches Substrat vorliegt, berücksichtigt werden.

Vergleicht man die sich mit dem biohygrothermischen Modell ergebenden Sporenauskeimungszeiten unter Berücksichtigung der Substratgruppe II mit den nach dem Modell von Viitanen [137] ermittelten Zeiten, ergeben sich Abweichungen zwischen beiden Modellen, wie Bild 50 zeigt. Die mit dem biohygrothermischen Modell ermittelten Sporenauskeimungszeiten liegen unter den nach Viitanen errechneten Werten. Dies ist auf den Einfluß unterschiedlicher Baumaterialien und deren Vorbehandlung zurückzuführen. So muß z.B. vorgetrocknetes Holz bei

Messungen zur Schimmelpilzbildung erst Feuchte aufnehmen, während Pilze auf Holz mit einem praktischen Feuchtegehalt schneller auskeimen. Darüber hinaus können sich je nach Holzart und Probenmaterial unterschiedliche Sporenauskeimungszeiten ergeben. Da das biohygrothermische Verfahren auf den stets kritischeren Annahmen beruht, sind die damit ermittelten Sporenauskeimungszeiten kürzer als sonstige Literaturdaten.

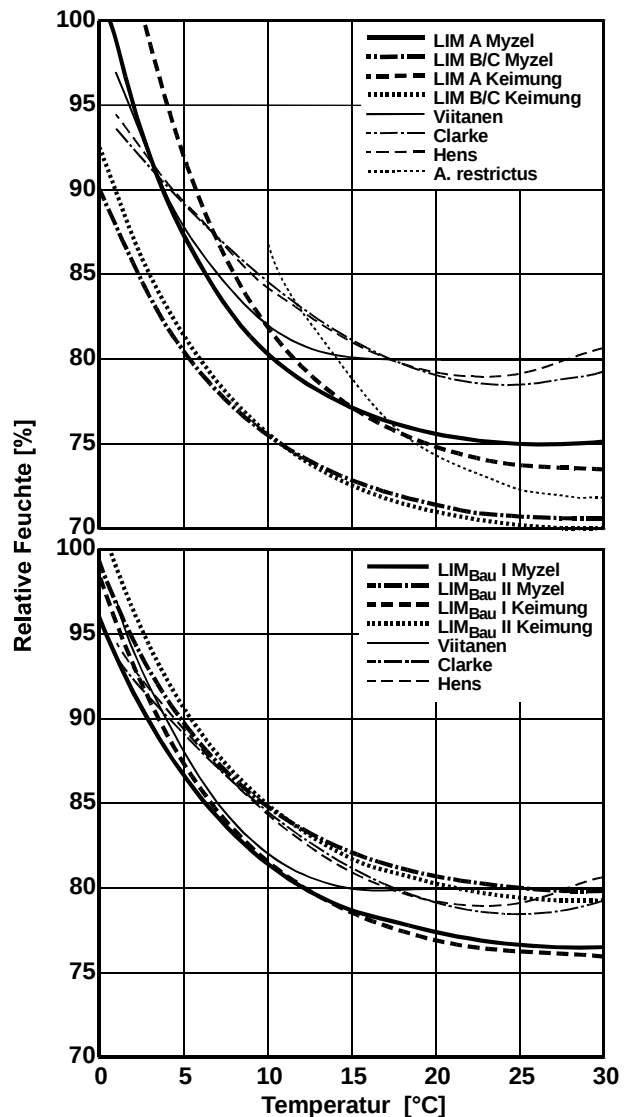


Bild 49 Minimale Wachstumsvoraussetzungen (LIM-Kurven) in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Feuchte, wie sie im Isoplethensystem Verwendung finden, im Vergleich mit den in der Literatur genannten Isoplethen von Viitanen ([137, 138]), Clarke [13] und Hens [47] sowie des Schimmelpilzes *Aspergillus restrictus* nach Smith [126].

Oben: Gefährdungsklasse A bzw. B/C.

Unten: Substratgruppen I und II.

Viitanen verwendet nur wenige Schimmelpilze bei seinen Untersuchungen, während dem biohygrothermischen Verfahren die ungünstigen Wachstums Voraussetzungen aller am Bau auftretender Pilze zugrunde liegen. So betragen die Sporenauskeimungszeiten bei den von Viitanen verwendeten Pilzen (z.B. *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus niger*, *Penicillium sp.*) beispielsweise für 80 % relative Feuchte 8 Tage auf optimalem Substrat, während im eigenen Verfahren der kürzeste Wert mit 2 Tagen Verwendung findet (siehe dazu Tabelle). Vor allem damit lassen sich die Unterschiede in Bild 50 erklären.

Vergleicht man darüber hinaus die mit dem biohygrothermischen Verfahren ermittelten Sporenauskeimungszeiten mit den Angaben von Hens [47] oder Block [11], die ebenfalls Bild 50 zeigt, so kann festgestellt werden, daß die mit dem biohygrothermischen Modell ermittelten Zeiten zwar auf der sicheren Seite liegen, aber nicht stark von diesen Literaturwerten abweichen. Aus den niedrigsten relativen Feuchten, ab denen Pilzaktivität für Materialien beider Substratgruppen einsetzt [39], ergeben sich Werte für hohe Sporenauskeimungszeiten. Diese stimmen ebenfalls gut mit den Ergebnissen des biohygrothermischen Verfahrens überein.

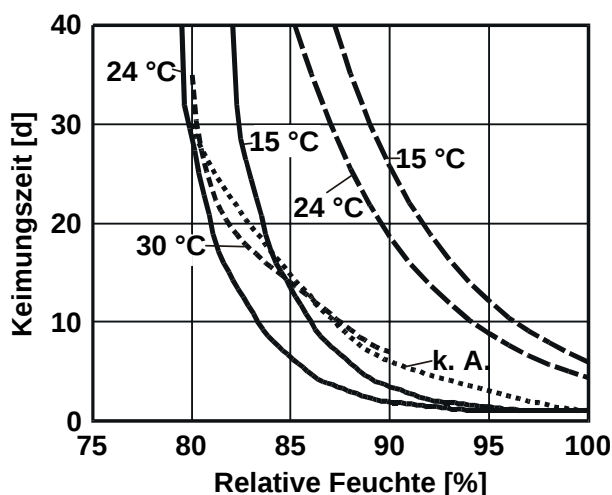


Bild 50 Sporenauskeimungszeiten in Abhängigkeit von der relativen Feuchte.

Dargestellt wird ein Vergleich der sich mit dem biohygrothermischen Modell bei stationären Bedingungen unter der Annahme der Substratgruppe II ergebenden Sporenauskeimungszeiten mit den in der Literatur angegebenen z.T. gemessenen (Block [11], Hens [47]) sowie mit dem Modell von Viitanen [137, 138] berechneten Sporenauskeimungszeiten.

5.6 Sensitivitätsanalyse

Um eventuelle Schwankungen und Unsicherheiten zu überprüfen, die im praktischen Gebrauch bei biohygrothermischen Berechnungen auftreten könnten, werden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Folgende Parameter haben prinzipiell Einfluß auf die beim biohygrothermischen Modell möglichen Schwankungsbreiten für Sporenauskeimungszeiten:

- Die zur Bestimmung des Grenzwassergehalts angenommene Substratgruppe,
- die Feuchtespeicherfunktion zur Beschreibung des osmotischen Potentials des Inneren der Modellspore,
- der zur Beschreibung der Diffusionswiderstände der Sporenwand iterativ bestimmte feuchteabhängige s_d -Wert,
- der bei der Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten unter stationären Bedingungen zugrunde gelegte Anfangswert für die relative Feuchte in der Umgebung der Modellsporen,
- die bei der biohygrothermischen Berechnung mit dem Programmsystem WUFI verwendete Rechenschrittweite.

Der Einfluß der zur Bestimmung des Grenzwassergehalts angenommenen Substratgruppe auf die Sporenauskeimungszeiten läßt sich, da die Modellierung im biohygrothermischen Modell diesen Daten angepaßt wurde, aus den in den Bildern 31 und 34 gezeigten Isoplethensystemen für optimalen Nährboden bzw. die Substratgruppen I und II ablesen. Die Lage der Grenzwassergehalte für die beiden Substratgruppen kann für den in Ziffer 5.3 beschriebenen Fall der Schimmelpilzbildung auf einer Dampfbremse in einem dampfdichten Satteldach dem Bild 43 unten entnommen werden.

Im Zuge der Modellierung einer Spore erfolgte nach Festlegung der Feuchtespeicherfunktion eine Anpassung des s_d -Werts durch Rückrechnungen auf Basis der Keimungszeiten für die Gefährdungsklasse B/C (Bild 31 unten) sowie die Substratgruppen I und II in Bild 34. Es hätte prinzipiell auch die Feuchtespeicherfunktion unter Beibehaltung der s_d -Wert-

Kurve variiert werden können, da sich diese beiden Kennwerte gegenseitig beeinflussen. Weil aber keine Literaturangaben für s_d -Werte vorhanden sind, für die Feuchtespeicherfunktion hingegen schon, wurde erstgenannte Möglichkeit gewählt. Daher werden bei der Sensibilitätsanalyse nur Variationen des s_d -Wertes vorgenommen. Dabei wird die gesamte s_d -Wert-Kurve um $\pm 20\%$ variiert (Variantenplan siehe Tabelle 18). Ein geringerer Wert führte zu einer schnelleren Feuchteaufnahme der Spore und

somit zu kürzeren Sporenauskeimungszeiten. Es ergibt sich für die Sporenauskeimungszeiten unter stationären Umgebungsbedingungen eine relativ geringfügige Streuung bei den verwendeten unterschiedlichen s_d -Werten, wie Bild 51 oben zeigt. Dargestellt sind die Sporenauskeimungszeiten in Abhängigkeit von der an der Spore anliegenden relativen Feuchte für die drei Substratgruppen.

Tabelle D Auskeimungszeiten verschiedener Schimmelpilze bei unterschiedlichen relativen Feuchten und bei der jeweils angegebenen Temperatur.

Schimmelpilze	Auskeimungszeit in Tagen bei verschiedenen relativen Feuchten in %																			Temperatur in °C	Nährboden	Literatur- stelle		
	100	98	95	93	90	88	87	86	85	84	83	82	80	79	78	76	75	73	70				69	68
Aspergillus amstelodami	1		1	1	1				2			4	4		9	12	18					25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus candidus	1											4	7		9	12	15		32			25	Agar	[4]
	1	1	1	1	2				8			8					32		95			25	Agar	[4]
		1	2	2	2	3	3	4	4	5		7	10		34							25	Agar+Glucose/Fructose	[144]
Aspergillus chevalieri		1	1						9													25	Agar+NaCl	[144]
					2							4	7		12	24	53					25	nutrient gelatine	[127]
	1	1	1	1	1	1		2	2			7	7		4		8	16	32			25	Agar	[4]
	1	1	1	1	2	3		5		7		7	7		10	23						25	plain gelatine	[127]
Aspergillus flavus	1	1	1	1	2	2		2		3		5	7		10	19						25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus fumigatus	1	1	2		4				8				32				95					25	Agar	[4]
Aspergillus nidulans	1	1	1		4				16				95									25	Agar	[4]
Aspergillus niger	1				1	2		2		4		18										25	nutrient gelatine	[127]
Asp. penicillioides	1		2		4				8				95									25	Agar	[4]
Aspergillus niger	1		1	2	2	3		4		11												25	nutrient gelatine	[127]
Asp. penicillioides		1			1				2				8									25	Agar	[4]
Asp. penicillioides		1	0,8	0,7	1	1		1	2	2		2	3		4	6	9					25	Agar+NaCl	[3]
Aspergillus repens	1		1	1	1	1			1			4					8		95			25	Agar	[4]
	1		1	1	1	1		2	7	7	7		7	7		8	16					25	plain gelatine	[127]
	1		1	1	1	1	2		2	2	2		3	4		6	14					25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus restrictus			1	1	1	2	2	2		3		4	5		8	7	12	15				25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus ruber		1	1	1	1	1		2	2			4					16	64				25	Agar	[132]
Aspergillus ruber	1		1	1	1	1		2	2			7	12		34		8	8	95			25	Agar	[4]
Aspergillus sydowii					1	2		2	-	4		7	12		34							25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus sydowii			0,8	0,9	1	2		2	3	3		5	6		20	22						25	Agar+Glucose/Fructose	[144]
Aspergillus sydowii		0,6	0,7			1	2		3				11									25	Agar+NaCl	[144]
Aspergillus tamarii					1				2				16				95					25	Agar	[4]
Aspergillus terreus	1		1	1	1				4				16									25	Agar	[4]
Aspergillus versicolor					1	2		2		4		7	9		24							25	nutrient gelatine	[127]
Aspergillus wentii		1	1	2	2	2	3	4	4	5	6	7	10		16		64					25	Agar	[132]
Aspergillus wentii		0,6	0,6	0,7	1	2		2	2	3		4	6		10	18	28					25	Agar	[132]
Botrytis cinerea		0,6	0,6	0,7	1	2		2	2	3		4	6		10	18	28					25	Agar+glycerol	[3]
Botrytis cinerea	1		2	2																		25	nutrient gelatine	[127]
Cladosporium herbarum	1		1	2	2	7																25	nutrient gelatine	[127]
Eurotium amstelodami		0,7	0,8	1	2	2		2	3			3	5		7	12						25	Agar+Glucose/Fructose	[144]
Eurotium amstelodami		0,8	0,6	0,8	1		1		3				12				13					25	Agar+NaCl	[144]
Eurotium repens	0,4		0,3	0,4	1	1		1	1	1		2	2		3	5	7	11		85		25	Agar+Glucose/Fructose	[3]
Eurotium repens			7	5	5		6	6	6		7	9		10	11	12	14	21	30	38		25	Agar+Glucose/Fructose	[3]
Eurotium sp.				3	6		6		6		7	9		11		15	44					25	Agar+glycerol	[3]
Geomyces sp.			7	6		7		9			13	20			25		32					25	Agar+NaCl	[3]
Geomyces sp.	2	2	2	2	2	2		3	4	4		6	10		16	28	38					25	Agar+glycerol	[3]
Mucor sp.	1		1	2																		25	nutrient gelatine	[127]
Paecilomyces variotti		0,8	1	2	2	3		4	6	8	10	14	20	25								25	Agar+Glucose/Fructose	[144]
Paecilomyces variotti		0,8	1	2	2																	25	Agar+NaCl	[144]
Penicillium cyclopium	1		1	2	2	3		4		9												25	nutrient gelatine	[127]
Penicillium cyclopium	1		1	1	1			2					95									25	Agar	[4]
Penicillium fellutanum						2		4		4		9	12									25	nutrient gelatine	[127]
Penicillium islandicum		1	1		2				8				95									25	Agar	[4]
Penicillium martensii		1	1		1				2		4		8									25	Agar	[4]
Penicillium sartoryi					2	2		4		4		12	18									25	nutrient gelatine	[127]
Rhizopus nigricans	1		1	2																		25	nutrient gelatine	[127]
Stachybotrys atra	1		1		95																	25	Agar	[4]
Trichothecium roseum	1		1	2	4																	25	nutrient gelatine	[127]
Wallemia sebi			0,8	0,9	1	1		1	1	1		2	2		5	9	15	40	46	46		20	Agar+Glucose/Fructose	[144]
	0,6		0,7	1		2		2				6			10		15					20	Agar+NaCl	[144]
	1,5	0,7	0,5		1			2				3	9									30	Agar+Glucose/Fructose	[144]
		0,7	0,6	0,5		1		1		2		2,8			6							30	Agar+NaCl	[144]
			4	3	3		3,5				8											34	Agar+Glucose/Fructose	[144]
Wallemia sebi						2																34	Agar+NaCl	[144]
durchschnittliche Zeiten	1	0,9	1,1	1,7	4	2	3	3,1	4	5	7	6,3	16	17	13	16	27	28	59	54	38			
kürzeste Zeiten	0,4	0,6	0,3	0,4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	9	3	5	7	8	21	30	38		
drittkürzeste Zeiten	0,6	0,7	0,6	0,5	1	1	2	1	1	2	6	2	3	-	5	9	8	14	32	85	-			

Tabelle 18 Variationsparameter der Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung des instationären biohygrothermischen Modells.

Kriterium	Beschreibung der Variationen
Grenzwassergehalt	Verwendung der LIM-Kurven in den Isoplethensystemen verschiedener Substratgruppen
Diffusionswiderstand der Sporenwand	Variation des s_d -Wertes um $\pm 20\%$
Anfangsfeuchtegehalt in der Spore	Umgebungsfeuchten zwischen 30 % und 65 % relativer Feuchte
Rechenzeitschritte	verwendete Zeitschritte: 0,1; 0,2 und 1 Stunden

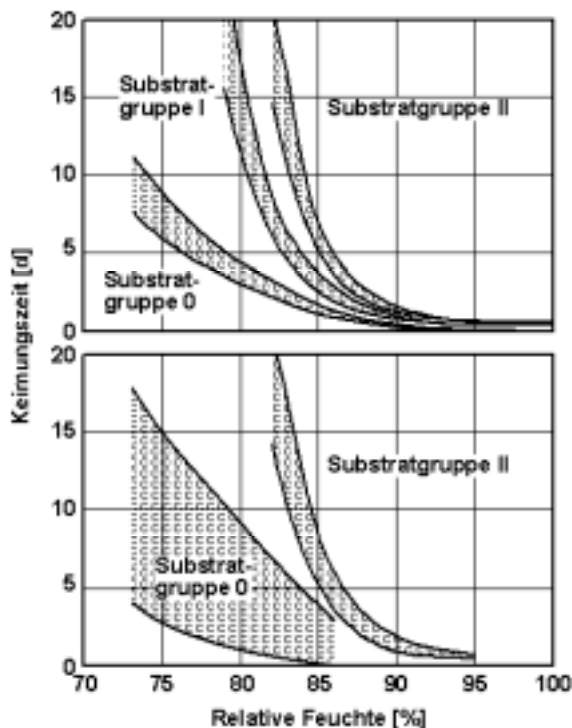


Bild 51 Sporenauskeimungszeiten in Abhängigkeit von der relativen Feuchte und verschiedenen Substratgruppen.

Oben: Variation des s_d -Wertes.

Unten: Variation des Anfangsfeuchtegehaltes.

Dargestellt werden die sich bei den biohygrothermischen Berechnungen im Zuge der Sensitivitätsanalyse ergebenden Sporenauskeimungszeiten. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die sich einstellenden Schwankungsbereiche. Die obere Begrenzung bedeutet dabei jeweils den größeren s_d -Wert bzw. den niedrigeren Anfangsfeuchtegehalt.

Der Anfangsfeuchtegehalt in der Modellspore hat hingegen einen wesentlich größeren Einfluß auf die Auskeimungszeit, vor allem bei Substratgruppe 0 und geringen Feuchten. Bei Verringerung der Anfangsfeuchte verlängert sich die Zeit bis zum Auskeimen. Die Anfangsfeuchte hängt über die Feuchtespeicherfunktion eindeutig mit der Umgebungsfeuchte zusammen, der die Sporen zu Beginn der

Messungen bzw. Berechnungen zur Sporenauskeimungszeit ausgesetzt sind. Da bei Laborversuchen meist keine Werte angegeben werden, wird eine große Variation vorgenommen, d.h. es werden Umgebungsfeuchten zwischen 30 % und 65 % relativer Feuchte miteinander verglichen. Wie Bild 51 unten zeigt, sind bei der Substratgruppe 0 relativ große Varianzen erkennbar. Dies ist hauptsächlich durch die unterschiedlichen Mengen an Feuchte erklärbar, welche die Modellspore bei der Variation des Anfangswassergehaltes aufnehmen muß, um auskeimen zu können. Diese Feuchtemenge berechnet sich aus der Differenz des Wassergehalts, der zur Auskeimung benötigt wird, und dem Anfangswassergehalt. Die Differenz für den Standardfall mit einer Anfangsbedingung von 50 % relativer Feuchte sei im folgenden als Bezugswert (entspricht 100 %) definiert. Bei der Substratgruppe 0 liegt diese Differenz mit einer Anfangsfeuchte von 30 % relativer Feuchte bei 270 %, d.h. die Spore muß gegenüber dem Standardfall die 2,7-fache Menge an Feuchte aufnehmen. Bei einer Anfangsbedingung von 65 % relativer Feuchte läge diese Differenz bei 37 %. Die geringere Varianz bei der Substratgruppe II ergibt sich durch die geringeren Abweichungen gegenüber dem Standardfall mit 165 % für die Anfangsfeuchte von 30 % und 76 % für die Anfangsfeuchte von 65 %. Dadurch werden die in Bild 51 dargestellten Verhältnisse verständlich. Man erkennt, daß sich bei der Festlegung der s_d -Werte durch iteratives Nachrechnen der Keimungszeiten in den Isoplethen bei Wahl verschiedener Anfangsfeuchten andere s_d -Werte ergeben würden. Da aber die Modellierung an die Sporenauskeimungszeiten in den Isoplethensystemen angepaßt wurde, ergibt sich daraus keine Einschränkung der Aussagegenauigkeit des biohygrothermischen Modells. Es stellt sich natürlich die Frage, welchen Einfluß der s_d -Wert auf die bei instationärem Umgebungsklima vorhandenen Wassergehalte in der Modellspore hat. Dazu zeigt Bild 52 den Verlauf des Wassergehalts in einer Modellspore bei Variation des s_d -Wertes um $\pm 20\%$. Verwendet wurde ein zeitlicher Ausschnitt aus Bild 43 unten (Schimmelpilzbildung auf einer Dampfbremse in einem dampfdichten Satteldach). Wie man erkennt, werden zwar bei höherem s_d -Wert die obersten und untersten Spitzen im Verlauf des Wassergehalts ab-

geschnitten (Bild 52). Dies beschränkt sich aber auf nur wenige Zehntel Vol.-% und hat daher keinen nennenswerten Einfluß auf die Vorhersage einer möglichen Schimmelpilzbildung.

Um den Einfluß der mit dem Programmsystem WUFI verwendeten Rechenschrittweite abzuschätzen, wird das Aufschaukeln der Sporenfeuchte im Schimmelpilzprüfstand (vgl. Bild 45) bei einer gegenüber 60 % täglich für 3 Stunden erhöhten relativen Feuchte von 95 % mit unterschiedlicher Rechenschrittweite berechnet und in Bild 53 mit hoher Auflösung dargestellt. Wie zu erkennen ist, ergibt sich kein wesentlicher Unterschied im Sporen-Wassergehalt zwischen den Rechenschrittweiten von 0,2 Stunden und 0,1 Stunden, so daß eine Rechenschrittweite von 0,2 Stunden in diesem Fall als ausreichend anzusehen ist. Der Wassergehalt bei Verwendung einer einstündigen Rechenschrittweite liegt geringfügig darunter. Dies liegt an den extremen Schwankungen der relativen Feuchte zwischen 60 % und 95 % innerhalb weniger Minuten im Schimmelpilzprüfstand. Wie weitere Berechnungen gezeigt haben, reicht eine Rechenschrittweite von einer Stunde aus. Bei stark schwankenden Temperaturen oder Feuchten kann eine Verfeinerung der Rechenschrittweite erwogen werden.

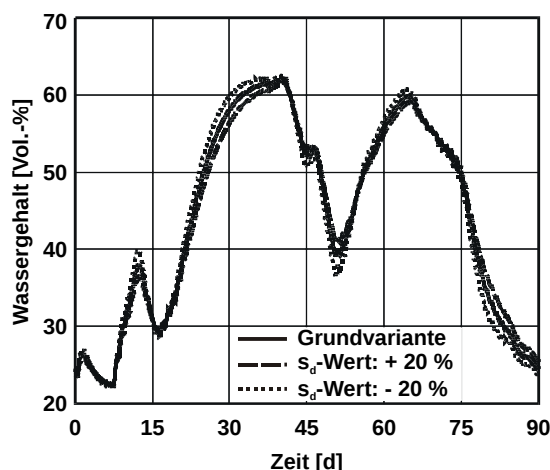


Bild 52 Zeitverlauf des Wassergehalts in der Spore in Abhängigkeit von verschiedenen s_d -Werten.

Dargestellt werden die sich bei den biohydrothermischen Berechnungen im Zuge der Sensitivitätsanalyse ergebenden Wassergehalte in der Spore bei Variation des s_d -Wertes im Fall der Sporenauskeimung auf der Dampfbremse aus Papierfolie in einem außen dampfdichten Satteldach (zeitlicher Ausschnitt aus Bild 43 unten).

6. Bewertung des entwickelten Verfahrens

6.1 Neue Ansätze und Funktionsmerkmale

Die derzeit üblichen Bewertungsmethoden für Schimmelpilzbildung gehen in der Regel von stationären Randbedingungen aus. Während in den meisten Fällen in Deutschland nur die relative Feuchte als Kriterium genannt wird, werden international mittlerweile häufiger Isoplethensysteme für die Bewertung zugrunde gelegt. Dabei sind temperaturabhängig relative Feuchten angegeben, bei deren Überschreitung Schimmelpilzbildung auftreten kann. Allerdings werden bisher weder Isoplethensysteme für unterschiedliche Substratgruppen noch für die Bewertung der von Schimmelpilzen ausgehenden möglichen Gesundheitsgefahr zur Verfügung gestellt. Dies geschah beim vorliegenden Isoplethenmodell, das darüber hinaus eine Differenzierung der Sporenauskeimung und des Myzelwachstums beinhaltet. Damit kann in relativ einfacher Art die Wahrscheinlichkeit einer Sporenauskeimung bestimmt werden und eine Quantifizierung des ggf. vorliegenden oder zu erwartenden Myzelwachstums erfolgen.

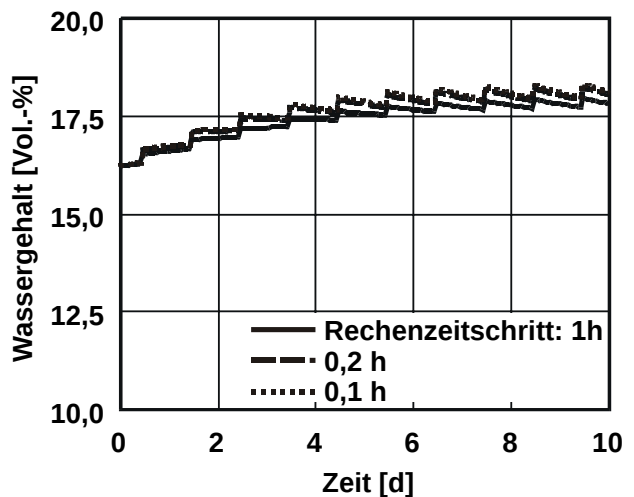


Bild 53 Zeitverlauf des Wassergehalts in der Spore in Abhängigkeit von verschiedenen Rechenschrittweiten.

Zugrunde gelegte Daten:

Randbedingungen (wie im Prüfstand [37]):
Relative Feuchte: 95 %
Temperatur: 18,5 °C
Einwirkdauer pro Tag: 3 h
Sonstige Zeit: 60 % relative Feuchte und 26,1 °C.

Dargestellt sind die sich bei den biohydrothermischen Berechnungen im Zuge der Sensitivitätsanalyse ergebenden Wassergehalte in der Spore bei Variation der Rechenschrittweite.

Nur wenige bisher publizierte Vorhersagemodelle erlauben eine – aber nur indirekte – Berücksichtigung instationärer Randbedingungen. Beispielsweise kann damit der Einfluß zwischenzeitlich auftretender trockener Perioden auf die Sporenauskeimung nicht ermittelt werden. Das entwickelte Modell berücksichtigt hingegen die auftretenden instationären Wachstumsbedingungen. Damit läßt sich erstmals der Wassergehalt von Schimmelpilzsporen in Abhängigkeit von den instationären hygrothermischen Randbedingungen abschätzen und angeben, ob Pilzsporen aktiv werden können, also Pilzbildung einsetzt. Die für das biohygrothermische Modell erforderliche Feuchtespeicherfunktion im Sporeninneren konnte aus Untersuchungen von Bakteriensporen übernommen werden. Der den Feuchtedurchgang durch die Sporenwand beschreibende feuchteabhängige s_d -Wert wurde so festgelegt, daß die ermittelten Sporenauskeimungszeiten unter stationären Bedingungen mit den in den Isoplethen für die Gefährdungsklasse B/C sowie für die Substratgruppen I und II geltenden Sporenauskeimungszeiten übereinstimmen. Eine Berücksichtigung des Einflusses von Substraten wird dadurch erreicht, daß der Grenzwassergehalt in den Pilzsporen, ab dem Sporenkeimung eintritt, in Abhängigkeit von den Isoplethen für die unterschiedlichen Substratgruppen erfolgt. Damit kann im biohygrothermischen Modell auch der Einfluß des Substrats erfaßt werden.

In dieser Arbeit wird ein iteratives Vorgehen vorgeschlagen, das die Kombination beider Modelle (Isoplethenmodell und biohygrothermisches Modell) ermöglicht, also erlaubt, nach erfolgter Abschätzung der Sporenauskeimung das anschließende Myzelwachstum in Abhängigkeit von instationären Wachstumsbedingungen zu prognostizieren. Grundprinzip der neuen Methode ist es, immer vom ungünstigen Fall auszugehen, also mit der Vorhersage aus Sicht der gesundheitlichen Vorsorge stets auf der sicheren Seite zu liegen. Ob beispielsweise eine Korrektur der Isoplethensysteme für einzelne Substratgruppen hin zu höherer Feuchte zu „scharf“ oder doch vertretbar erscheint, wäre durch weitere Messungen zu bestätigen. Ein Vergleich mit bisher vorhandenen Normvorgaben zu Schimmelpilzbildung und entsprechenden Vorhersageverfahren zeigt, daß das hier

beschriebene Verfahren über den bisherigen Stand des Wissens weit hinausgeht und das Verständnis für die Bildung von Schimmelpilz beträchtlich vertieft. Ferner ergibt sich in der Validierung eine gute Übereinstimmung.

6.2 Einschränkungen des Modells

Um die Funktionsweise und Prognosesicherheit des vorliegenden Verfahrens objektiv einschätzen zu können, sollen auch die methodischen Vereinfachungen kritisch analysiert werden:

- Einflußgrößen wie pH-Wert, Salzgehalt, Licht, Sauerstoffgehalt, Oberflächenbeschaffenheit und biogene Faktoren werden in den Modellen nicht berücksichtigt, sondern jeweils als nicht hemmend für Keimung und Wachstum angenommen. Diese Vereinfachung führt dazu, daß die ermittelten Sporenauskeimungszeiten geringer bzw. die Wachstumsraten größer sein können als unter realen Bedingungen. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, daß die mit dem neuen Verfahren gewonnenen Ergebnisse einen „präventiven“ Aspekt beinhalten.
- Unterschiede im osmotischen Potential von verschiedenen Substraten werden im Isoplethenmodell nicht konkret, sondern pauschalierend durch die Definition von Substratgruppen, berücksichtigt. Gleiches gilt auch für eventuelle Einflüsse von Ablagerungen bzw. Verschmutzungen auf der Bauteiloberfläche. Durch diese Vereinfachung können die ermittelten Wachstumsraten bzw. Sporenauskeimungszeiten nur für unterschiedliche Gruppen, nicht aber für jedes einzelne Material vorhergesagt werden. In Fällen einer unklaren Zuordnung eines Baustoffs zu einer bestimmten Substratgruppe sollte unter präventiven Gesichtspunkten jeweils die für Schimmelpilzwachstum kritischere Gruppe angenommen werden.
- Bei der Vorhersage der Sporenauskeimung werden die Substrate (Baustoff und ggf. Verschmutzung) bei den biohygrothermischen Berechnungen nicht direkt berücksichtigt, da die nach Beginn der Stoffwechselaktivität ablaufenden Prozesse in der Spore nicht mathematisch

beschreibbar und somit auch nicht modellierbar sind. Um dennoch den Einfluß unterschiedlicher Materialien einzubeziehen, geht der Grenzwassergehalt auf Basis der für verschiedene Substratgruppen unterschiedlichen LIM_{Bau} -Kurven in die Modellbetrachtung ein. Auch hier wird empfohlen, im Entscheidungsfall jeweils die für Schimmelpilzwachstum kritischere Substratgruppe zu verwenden.

- Als Feuchtespeicherfunktion für Schimmelpilzsporen wird eine für Bakterien gemessene, leicht modifizierte Kurve verwendet. Da für Schimmelpilzsporen keine gemessenen Werte vorliegen, wurden die feuchte- sowie temperaturabhängigen Diffusionswiderstände der Sporenwände durch Rückrechnung ermittelt. Die Anpassung erfolgte anhand der Isoplethen für die Substratgruppen 0, I und II. Dies stellt keine Einschränkung der Aussagegenauigkeit des entwickelten Modells dar, da die ermittelten Werte im stationären Fall mit den Angaben im Isoplethenmodell übereinstimmen. Unter instationären Bedingungen ergeben sich, wie auch die in Ziffer 5.6 vorgenommene Sensibilitätsanalyse zeigte, nur marginale Unsicherheiten durch die Anpassung des s_d -Werts.

6.3 Weiterer Untersuchungsbedarf

Insgesamt ergibt sich ein weiterer Untersuchungsbedarf, der sich auf Messungen zur zusätzlichen Differenzierung und auf eine Erweiterung der beiden Modellansätze bezieht.

Isoplethenmodell

Isoplethensysteme für die Gefährdungsklassen A und B/C können derzeit nur für optimalen Nährboden angegeben werden, weil nur dafür genügend Daten verfügbar sind. Eine Differenzierung der Gefährdungsklassen innerhalb der Substratgruppen ist dabei nicht möglich, da bei der Festlegung der Isoplethen auf Meßdaten zurückgegriffen werden mußte, die auf Versuchen mit Mischkulturen verschiedener Pilzspezies basieren und keine Unterscheidung zwischen einzelnen Arten bzw. Gefährdungsklassen zulassen. Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum von Spezies einer einzelnen Gefährdungsklasse

sind für eine Weiterentwicklung des Modells wünschenswert. Eine differenziertere als die hier vorgeschommene Festlegung der für alle Schimmelpilzarten geltenden substratspezifischen Isoplethen kann nur durch weitere systematische Messungen der Sporenauskeimungszeiten bzw. der Wachstumsraten des Pilzmyzels für unterschiedliche Substrate erfolgen. Dies sollte für stationäre wie instationäre hygrothermische Randbedingungen geschehen.

Ein weiteres Ziel sollte die quantitative Untersuchung des Einflusses von Verschmutzungen auf Bauteiloberflächen in Abhängigkeit verschiedener Einflußgrößen wie Oberflächenrauigkeit und Reinigungsintervalle sein. Es ist von Interesse, inwieweit Ablagerungen und Verschmutzungen auf Oberflächen die Zuordnung von Materialien zu den vorgeschlagenen Substratgruppen beeinflussen. Den Einfluß des pH-Wertes oder des Salzgehalts auf die Lage der Isolinien in den Isoplethensystemen zu erfassen, könnte für das Modell dann hilfreich sein, wenn z.B. die Wirkungsweise von pH-Wert anhebenden Anti-Schimmel-Beschichtungen einbezogen werden soll [124]. Dazu sind systematische Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf von pH-Werten auf unterschiedlichen Oberflächen in Abhängigkeit von den auf die Oberfläche einwirkenden instationären hygrothermischen Raumluftbedingungen und Anti-Schimmel-Mitteln erforderlich. Darüber hinaus erscheinen weitergehende Untersuchungen zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Inhaltsstoffen in Bauprodukten und Wachstumsraten sinnvoll. Dadurch wäre es möglich, Baustoffe so auszustatten, daß Schimmelpilzwachstum verhindert wird, indem gezielt bestimmte Inhaltsstoffe eingebracht werden.

Instationäres biohygrothermisches Modell

Bislang liegt dem Modell eine rein phänomenologische Betrachtung zugrunde. Die Sporenauskeimungszeiten hängen, neben Temperatur und relativer Feuchte, auch vom Substrat ab. Um dies zu berücksichtigen, werden die in den Isoplethensystemen angegebenen LIM -Kurven verwendet, um den Grenzwassergehalt zu bestimmen, der dann für unterschiedliche Substratgruppen die Sporenauskeimung kennzeichnet. Zur detaillierten Klärung der

Wachstumskurven müssen die Startbedingungen für den Stoffwechsel erfaßt werden. Zur Feststellung des genauen Auskeimzeitpunktes einer Spore unter bestimmten Feuchte- und Temperaturbedingungen könnte die Zunahme an Stoffwechselleistung in der Spore (z.B. über Atmungsmessung, ATP- bzw. molekularbiologische RNA-Gehaltsbestimmungen), die vor Ausbildung des sichtbaren Keimschlauchs eintritt, herangezogen werden. Der Vorteil läge darin, den Einfluß von verschiedenen Stoffen auf die Stoffwechselaktivität einzelner Schimmelpilze erforschen zu können.

Die genaue Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion von Sporen in Abhängigkeit von den in den Sporen enthaltenen Nährstoffen wäre erforderlich, um biohygrothermische Berechnungen differenziert für verschiedene Schimmelpilzspezies durchführen zu können. Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion und der Wassergehalte von Pilzsporen kann durch die Gewichtsaufnahme einer bestimmten Menge an Pilzsporen in Abhängigkeit von der an den Sporen anliegenden Luftfeuchte erfolgen; der s_d -Wert für die Feuchteaufnahme unterschiedlicher Pilzsporen könnte aus dem zeitlichen Verlauf der Gewichtszunahme bei den vorgenannten Messungen abgeleitet werden. Darüber hinaus stellen biochemische Daten über die Zusammensetzung der Pilzsporen, d.h. die osmotischen Eigenschaften bestimmter „kompatibler Solute“ und Speicherstoffe in den Sporen, eine stoffliche Bezugsgröße für die Feuchtespeicherfunktion dar. Ferner sollte eine exakte meßtechnische Bestimmung der feuchte- sowie ggf. temperaturabhängigen Diffusionswiderstände der Sporenwände für einzelne Schimmelpilze erfolgen. Damit könnten zum einen die im Modell gemachten Annahmen bestätigt werden. Andererseits würde damit eine Möglichkeit geschaffen, Unterschiede des Feuchtehaushalts für einzelne Spezies anzugeben.

Eine Erweiterung des biohygrothermischen Modells zur Erfassung des zeitabhängigen Einflusses substratbezogener osmotischer Potentiale, bedingt durch die Salzgehalte des Substrates selbst oder durch anthropogene Verschmutzungen der Substratoberfläche, wäre zu wünschen. Darüber hinaus muß geprüft werden, inwieweit auch die Keimungsprozes-

se anderer Mikroorganismen wie z.B. von Bakterien oder holzerstörenden Pilzen mit dem gewählten Ansatz beschrieben werden kann.

Insgesamt könnte für den Praktiker die Erstellung eines „Schimmelpilzkatalogs“ sinnvoll sein, in dem Baukonstruktionen und Randbedingungen genannt werden, die zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung bei unterschiedlichem Innenklima zu empfehlen sind. Die Kombination des biohygrothermischen Modells mit einem feuchtetechnischen Raummodell zur direkten Erfassung des Einflusses verschiedener Lüftungsstrategien wäre anzustreben. Die Beherrschung eines Raummodells mit verschiedenen Lüftungsstrategien ist für praktische Maßnahmen zur Schimmelpilzvermeidung unerlässlich. Darauf aufbauend sollte dann ein verfeinertes Sicherheitskonzept für die Vorhersage der Schimmelpilzbildung erstellt werden.

7. Anwendungsbeispiele

Die Anwendung des entwickelten Verfahrens soll nunmehr exemplarisch an verschiedenen Baukonstruktionen demonstriert werden. Die Auswahl der zu untersuchenden Bauprodukte erfolgt auf Basis der in Ziffer 2.1.6 aufgezeigten typischen Problemfälle. Eine Zusammenstellung der ausgewählten Berechnungsbeispiele zeigt Tabelle 19. Dort finden sich Angaben zu den Baukonstruktionen und zu den berücksichtigten bauphysikalischen Parametern. Diese Beispiele sollen die methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung der jeweils benötigten hygrothermischen Klimarandbedingungen aufzeigen und auf die wesentlichen bauphysikalischen Phänomene hinweisen. Die Diskussion der Ergebnisse und der Bewertung möglicher Schimmelpilzgefahren führt zur Gesamtbeurteilung der Konstruktionen oder Systeme.

7.1 Wandinnenoberflächen

An einer in [65] beschriebenen monolithischen nordorientierten Außenwand aus Mauerwerk mit innenseitigem Kalkzementputz eines Altbaus soll die Gefahr einer Schimmelpilzbildung an der Innenoberfläche beurteilt werden. Es werden unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der 36,5 cm dicken Wand

Tabelle 19 Zusammenstellung der bei den Anwendungsbeispielen zugrunde gelegten Daten und Angaben zu Literaturstellen.

Ziffer	Konstruktionen	Material	Geometrische Stelle ¹⁾	Effekte ²⁾	Literatur
7.1	Monolithische Außenwand	Verputztes Mauerwerk	Innenoberfläche einer Außenwand in Wandmitte sowie hinter einem Schrank	Dämmniveau Wärmeübergang Innenklima	[65]
7.2	Fensterrahmen	Kunststoff mit Verschmutzung	Wärmebrücke am Randverbund	Wärmebrücke	[120] [130]
7.3	Unbelüftete Satteldächer	Dampfbremsen (Papierfolie)	an der Dampfbremse in unbelüfteten Steildächern mit verschiedenen äußeren Dampfdiffusionswiderständen	Austrocknen der Baufeuchte	[77] [121]
7.4	WDVS-Fassade	Putz	Wandmitte sowie Fehlstellen	Außenklima	[68]
7.5	Lüftungsanlagen	Kunststoff oder Ton	im Rohrsystem eines hybriden Heizsystems bzw. eines Erdreich/Luft-Wärmetauschers	Betriebszustände	[91] [117]

1) Geometrische Stelle in der Baukonstruktion, an der die hygrothermischen Parameter ausgewertet und damit die Gefahr der Schimmelpilzbildung beurteilt werden.

2) Analyse des Einflusses bestimmter bauphysikalischer Effekte oder der Wahl von Randbedingungen auf die Wahrscheinlichkeit für Schimmelpilzbildung.

Tabelle 20 Fall-Varianten zur Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung an einer verputzten monolithischen Außenwand aus Mauerwerk.

Fall	Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks ¹⁾	Feuchtelast im Raum ²⁾	Situation	Wärmeübergangs- koeffizient	Schimmelpilz- bildung
	W/(m K)	% rel. Feuchte		W/(m² K)	
A	0,2	mittlere (50 ± 10)	unverstellte Wand	8	nein
B	0,6				
C	0,2		Schrank	2	ja
D	0,6				
E	0,2	hohe (55 ± 5)	unverstellte Wand	8	nein
F	0,6		Gardine	4	ja
G		geringe (45 ± 15)	Schrank	2	

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 23).

sowie verschiedene Feuchtelasten gemäß Bild 23 als Klimarandbedingungen im Wohnraum zugrunde gelegt. Tabelle 20 zeigt die wesentlichen Untersuchungsparameter sowie das Ergebnis der Schimmelpilzbewertung für die dort genannten Fälle A bis G. Als Außenklima werden gemessene Klimadaten-sätze als Stundenmittelwerte verwendet, wie sie Bild 22 für ein repräsentatives Jahr in den Dekadenmittelwerten bzw. Dekadensummen zeigt [74]. Sämtliche Materialdaten sind der WUFI-Datenbank entnommen. Für die in Tabelle 20 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 (Bilder 54 und 55).

In den Fällen A und B wird für eine mittlere Feuchtelast das Dämmniveau variiert. Die bei den Be-

rechnungen angenommenen Wärmeleitfähigkeiten betragen dabei im trockenen Zustand 0,2 W/(m K) im Fall A bzw. 0,6 W/(m K) im Fall B. Wie Bild 54 (gestrichelte Linien) zeigt, entsteht in Wandmitte bei einem Wärmedurchgangskoeffizienten des Mauerwerks von 0,6 W/(m² K) im Fall A bzw. 1,3 W/(m² K) im Fall B keine Schimmelpilzbildung. Die Wassergehalte der Sporen liegen über 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 von Czielski [110] ein Wert von 2 W/(m² K) für freistehende Schränke angenommen worden. Nur bei einem

Wärmedurchgangskoeffizienten des Mauerwerks von $0,6 \text{ W/(m K)}$ im Fall D entsteht Schimmelpilzbildung. Bereits Ende Oktober liegt, wie Bild 54 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 Klimadatensatzes 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 gemäß Bild 23 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 54 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

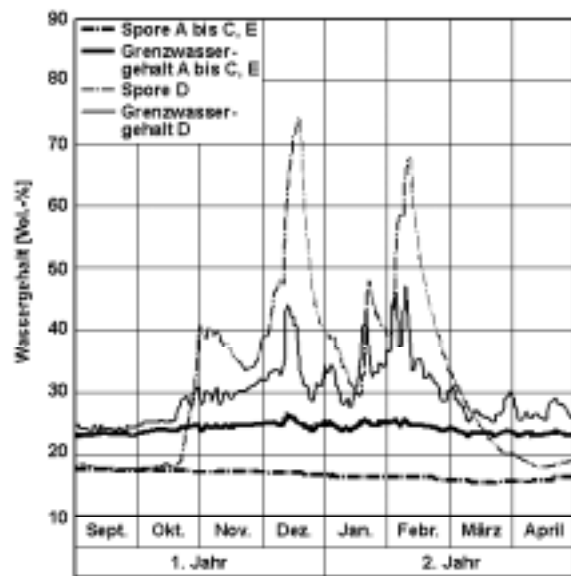


Bild 54 Zeitliche Verläufe der Wassergehalte in den Sporen.

Zugrunde gelegte Daten:

Außenklima gemäß Bild 22

Innenklima gemäß Bild 23

Substratgruppe II gemäß Bild 34 unten.

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 20. Die Verläufe des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, sind jeweils mit durchgezogenen Linien dargestellt.

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 55 dargestellt) ergibt sich zwar keine Pilzbildung. Wird hingegen, wie Bild 55 oben zeigt, ein verringerter innerer Wärmeübergangskoeffizient von $4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, 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 55 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.

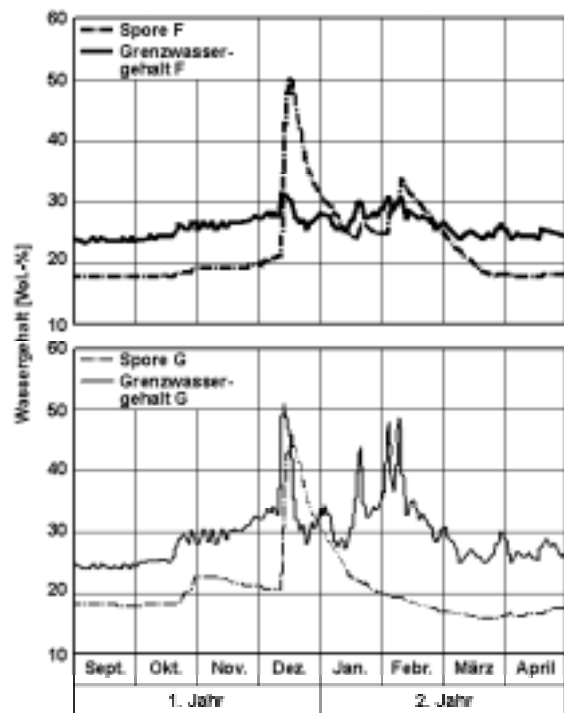


Bild 55 Zeitliche Verläufe der Wassergehalte in den Sporen für die Fälle F (oben) und G (unten).

Zugrunde gelegte Daten:

Außenklima gemäß Bild 22

Innenklima gemäß Bild 23

Substratgruppe II gemäß Bild 34 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 20. Die Verläufe des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, sind jeweils mit durchgezogenen Linien dargestellt.

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.

7.2 Wärmebrücke am Fenster

An Wärmebrücken im Bereich von Fenstern treten oft Schimmelpilze auf. Zunächst werden mithilfe von Bauteilkennwerten unter Zugrundelegung der inneren und äußeren Wärmeübergangskoeffizienten gemäß DIN 4108 nach einer dreidimensionalen Finiten-Differenzen-Methode [130] die Temperaturverteilung (Bild 56) und die Wärmeströme berechnet. Hieraus ergibt sich die Position der niedrigsten inneren Oberflächentemperatur. Diese befindet sich im Bereich des Glasrandverbundes. Dort finden sich dauerelastische Materialien, häufig auch Depositionen oder leichte Verschmutzungen. Daher wird zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung mit Substratgruppe II gerechnet. Abhängig von der Außenlufttemperatur kann im stationären Fall die raumseitige Oberflächentemperatur am Glasrandverbund angegeben werden. Bild 57 zeigt die entsprechende Kurve für eine Raumlufttemperatur von 20 °C. Bei dem Beispiel eines Kunststoff Fensters soll die Wärmespeicher- sowie Sorptionsfähigkeit vernachlässigt werden, d.h. die Berechnung der Temperatur und der relativen Feuchte erfolgt nur in Abhängigkeit von den außen- und innenklimatischen Randbedingungen. Somit kann für unterschiedliche Feuchtelasten in Wohnräumen [73] ermittelt werden, bei welchen Witterungsabläufen Schimmelpilzbildung zu erwarten ist. Als Datensatz für das Außenklima wird das in Bild 22 dargestellte typische Jahr verwendet.

Bild 58 zeigt die biohygrothermisch berechneten Wassergehalte in den Modellsporen bei normaler und niedriger Feuchtelast. Der Vergleich mit dem eingezeichneten Grenzwassergehalt dokumentiert, daß in beiden Fällen unter Berücksichtigung der Substratgruppe II Pilzbildung im Spätsommer und Herbst auftritt, da in dieser Jahreszeit zu einer relativ

hohen Innenraumluftfeuchte bereits tiefere Außenlufttemperaturen hinzukommen. Ebenfalls kritisch zu werten ist der kühle Juni im verwendeten Klimadatensatz. Im eigentlichen Winter macht sich die niedrige Feuchtelast im Innenraum deutlich bemerkbar. Insgesamt muß aus diesem Beispiel geschlossen werden, daß vor allem im Herbst eine gute Lüftung der Wohnräume notwendig wird. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, daß häufiges Reinigen der Fenster zu ungünstigeren Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze am Fenster führt. Die Sporen können zwar auskeimen, ein umfangreiches Pilzwachstum wird aber durch den Nährstoffgehalt im Substrat limitiert.

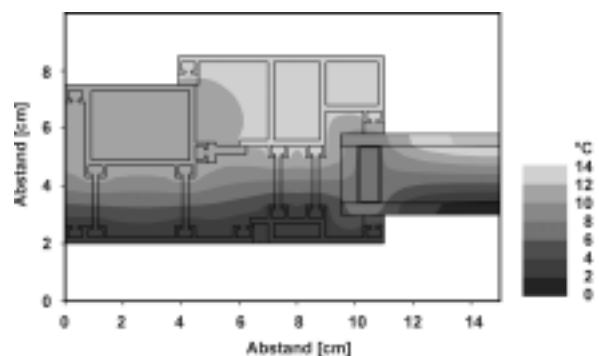


Bild 56 Temperaturverteilung an einem Fensterrahmen aus Kunststoff, berechnet mit einem Finite-Differenzen-Programm [130].

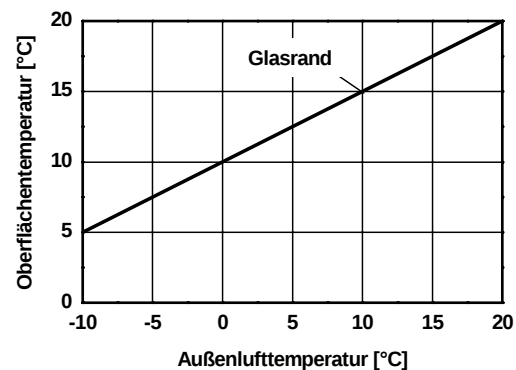


Bild 57 Innere Oberflächentemperatur am Glasrand in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

Abhängig von der Außenlufttemperatur wird im stationären Fall die raumseitige Oberflächentemperatur am Glasrandverbund für eine Raumlufttemperatur von 20 °C angegeben.

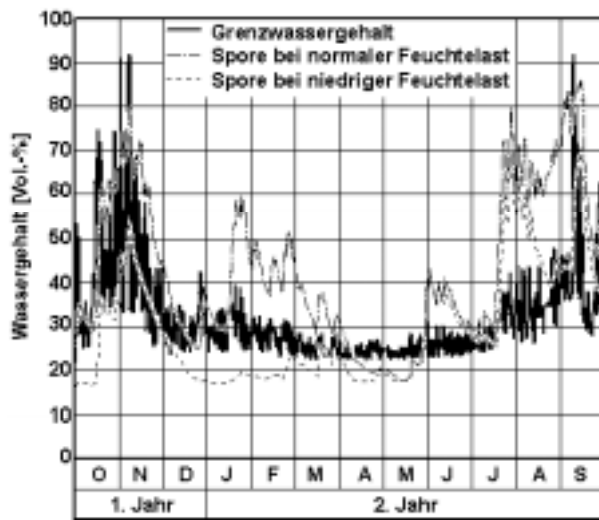


Bild 58 Zeitliche Verläufe der Wassergehalte in den Sporen in Abhängigkeit von verschiedenen Raumklimarandbedingungen.

Zugrunde gelegte Daten:

Außenklima gemäß Bild 22

Innenklima (normale sowie niedrige Feuchtelast) gemäß Bild 23

Substratgruppe II gemäß Bild 34 unten.

Gezeigt werden die mithilfe des in Bild 57 dargestellten Zusammenhangs zwischen Oberflächentemperatur am Glasrand und Außenlufttemperatur und dem biohygrothermischen Modell ermittelten Wassergehalte in den auf dem Fensterrahmen sich befindlichen Sporen. Der Verlauf des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, ist ebenfalls dargestellt.

7.3 Unbelüftete Satteldächer

In den letzten zwei bis drei Jahren haben sich in einigen Dachkonstruktionen noch während der Neubauphase oder kurz nach Fertigstellung an den Dachkonstruktionen zum Teil in großem Umfang Pilzschäden gezeigt [145]. Dies führte meist zu unangenehmen Auseinandersetzungen, da zunächst der Vorwurf erhoben wird, das gelieferte Material sei technisch unzureichend oder bereits bei der Lieferung mangelhaft. Tatsächlich sind aber in den überwiegenden Fällen bauliche Randbedingungen oder unzureichende bauphysikalische Planung verantwortlich. Als Beispiel für eine derartige Schimmelpilzbildung im Inneren einer Dachkonstruktion, aufgrund vorhandener und durch Diffusionsprozesse vagabundierender Baufeuchte, wird nochmals auf das in Ziffer 5.3 beschriebene unbelüftete Satteldach [77] zurückgegriffen. Mit dem biohygrothermischen Modell soll ermittelt werden, wie sich unterschiedliche äußere Diffusionswiderstände eines derartigen Dachaufbaus auf die mikrobielle Aktivität auswirken. Dabei werden neben dem praktisch

dampfdichten Blechdach auch Satteldächer mit äußeren Dampfdiffusionswiderständen von 1 cm, 10 cm sowie 100 cm betrachtet. Es werden die Temperatur- und Feuchteverläufe im Bereich der Dampfbremse mit dem Programm WUFI über einen Zeitraum von 2 Jahren berechnet. Für die instationären Berechnungen wird ein Innenraumklima, das nach [73] einer mittleren Feuchtelast (siehe Bild 23) entspricht, sowie Außenklimadatensätze gemäß Bild 22 verwendet.

Die sich über das erste halbe Jahr einstellenden Feuchteverläufe an der Dampfbremse sind in Bild 59 oben gezeigt. Die Wassergehalte in den Modellsporen sowie den Vergleich mit den entsprechenden Grenzwassergehalten gibt Bild 59 unten wieder. Man erkennt, daß im Vergleich mit dem nahezu dampfdichten Blechdach die Wassergehalte in den Sporen bei geringeren äußeren Dampfdiffusionswiderständen abnehmen. Dennoch tritt in allen Fällen eine Überschreitung des Grenzwassergehalts unter Berücksichtigung der Substratgruppe I (Papierfolie) auf. Die Überschreitung beträgt bei einem Diffusionswiderstand von 1 cm bzw. 10 cm nur etwa 40 Tage. In solchen Fällen wird in der Praxis ein Pilzbefall oftmals nicht beobachtet. Dies liegt zum einen darin, daß er entweder nicht entdeckt wird oder daß die biozide Ausrüstung im ersten Jahr ausreichend wirksam war. Im zweiten Untersuchungsjahr braucht aufgrund erfolgter Austrocknung der Baufeuchte bei allen Varianten mit keiner Schimmelpilzbildung mehr gerechnet zu werden.

7.4 WDVS-Fassade

Um festzustellen, nach welchem Zeitraum die hygrothermischen Verhältnisse an der in Ziffer 5.4 beschriebenen verputzten Wärmedämmverbundsystem (WDVS)-Fassade einer Wohnanlage [68] keine Pilzbildung mehr zulassen, soll mit dem biohygrothermischen Modell ermittelt werden, wie sich die Austrocknung der Baufeuchte auf die mikrobielle Aktivität auswirkt. Dazu werden die Temperatur- und Feuchteverläufe auf dem Putz in Wandmitte sowie im Bereich des Fenstersturzes und am Plattenstoß mit dem Programm WUFI, beginnend im Oktober (Bauerstellung), über einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet. Das Testreferenzjahr wird dabei mehrfach durchlaufen.

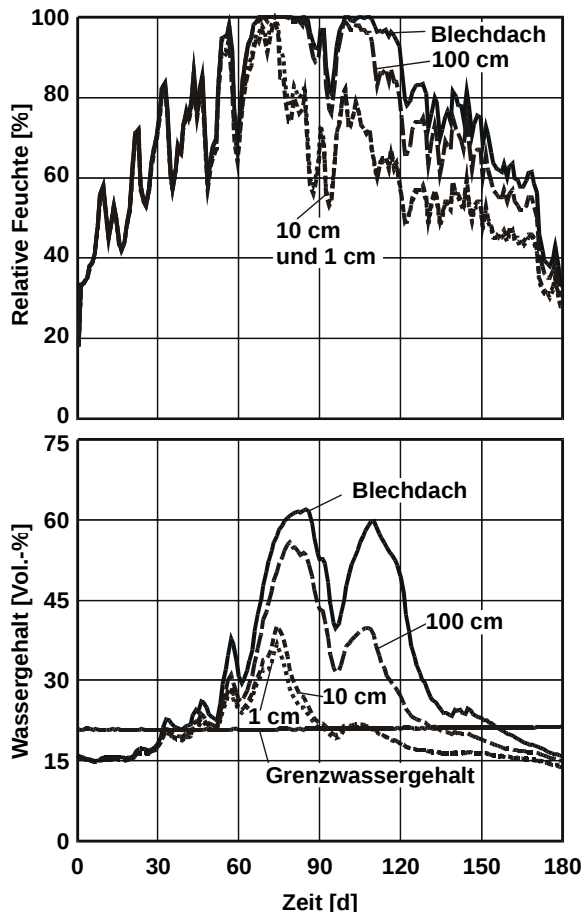


Bild 59 Zeitliche Verläufe der gemessenen bzw. mit dem Programm WUFI berechneten relativen Feuchten an den Dampfbremsen aus Papierfolie und Kunststoffolie für unterschiedliche Annahmen des äußeren Dampfdiffusionswiderstands eines Satteldaches (Bild oben) sowie des Wassergehalts in den auf den Dampfbremsen sich befindlichen Sporen (Bild unten).

Zugrunde gelegte Daten:

Außenklima gemäß Bild 22

Innenklima (normale Feuchtelast) gemäß Bild 23

Substratgruppe I für die Papierfolie gemäß Bild 34 unten

Substratgruppe II für die Kunststoffolie gemäß Bild 34 oben

Dampfdiffusionswiderstand außen: 1 cm, 10 cm, 100 cm, fast unendlich (variiert).

Der Verlauf des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, ist durch die nahezu horizontal verlaufende Linie gekennzeichnet.

Die Ergebnisse der Berechnungen gibt Bild 47 unten für das erste Jahr wieder. Nur die Wandmitte bleibt bewuchsfrei. 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 60 oben). Der über den Plattenstoß hinweggezogene Putz benötigt für den gleichen Austrocknungsprozeß

etwa 8 Jahre, wie Bild 60 unten zeigt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, daß (außer bei schadhaftem System) sich 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.

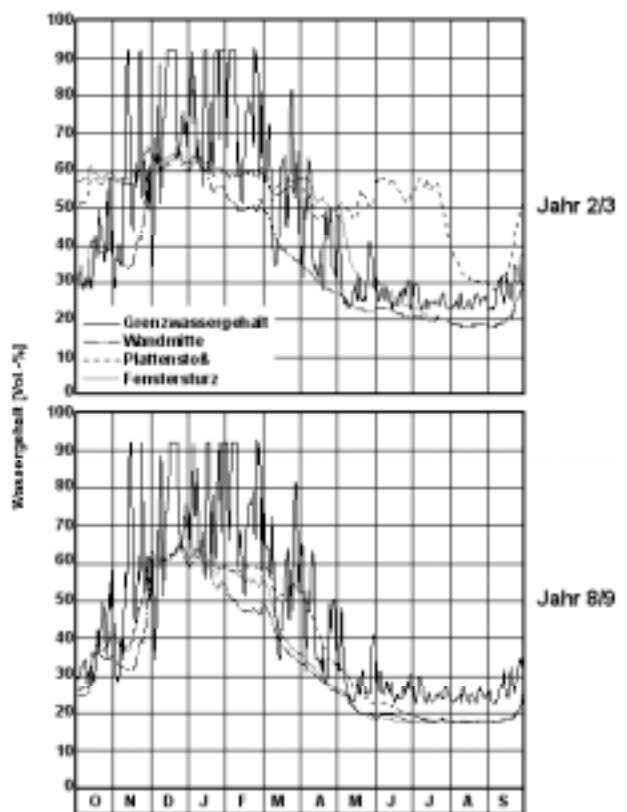


Bild 60 Berechnete Zeitverläufe des Sporen-Wassergehaltes an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.

Oben: 2. Untersuchungsjahr,

Unten: 8. Untersuchungsjahr.

Zugrunde gelegte Daten und Randbedingungen:

Klimadaten: gemäß Datensatz [53]

Wandaufbau: WDVS auf Beton als Wandbildner

Untersuchte Stellen:

Ungestörter Bereich

Plattenstoß (WDVS)

Fenstersturz.

Der Verlauf des Grenzwassergehaltes ist jeweils mit eingezeichnet; er gilt für alle Wandstellen und zeigt, ab wann Sporenkeimung einsetzt.

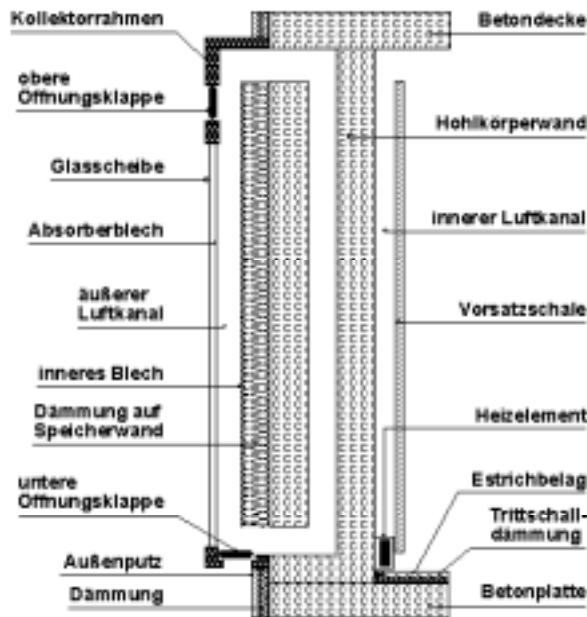


Bild 61 Vertikalschnitt durch die hinsichtlich Schimmelpilzbildung zu untersuchende Konstruktion eines hybriden Heizsystems mit dem Speicherbauteil Wand nach [91].

7.5 Lüftungssysteme mit offenen Luftkreisläufen

Die Gefahr von Schimmelpilzen in Lüftungsanlagen ist bekannt [93]. In den folgenden Anwendungsbeispielen soll eine Beurteilung möglicher Pilzbildung exemplarisch durchgeführt werden. In den beiden untersuchten Fällen handelt es sich um Systeme, bei denen Luft zur Erwärmung oder Abkühlung durch Kanäle geleitet und anschließend dem Raum zugeführt wird.

Hybride Heizsysteme

Zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden sind Systeme entwickelt worden, die Hohlräume von Bauteilen zum Transport und die Bauteilmassen zur Speicherung von Solarenergie nutzen [41, 43, 57, 61]. Aus energetischen Gründen ist es vorteilhaft, diese massebehafteten Bauteile z.T. durch offene Luftkreisläufe zu be- oder entladen [90]. Dabei kann bei ungünstigen Außen- und Innenklimabedingungen Tauwasser und somit mikrobielles Wachstum im Bauteilinneren solcher hybrider Heizsysteme entstehen [6, 36]. Daraus ergeben sich aus hygienischer Sicht Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit sowie ein erhöhter Wartungsaufwand. Mit Hilfe von Bauteilkenndaten und Betriebszuständen wurden in [82] und [91] bei luftgeführten hybriden Heizsystemen mit unterschiedlicher Bauausführung

repräsentative Klimadatensätze ermittelt, die zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung durch das biogrothermische Modell verwendet werden können. Bild 61 zeigt den Vertikalschnitt durch die ausgewählte Konstruktion. Solche Außenwandaufbauten können, nach Süden orientiert, solare Energie wirksam speichern und mit einer zeitlichen Verzögerung je nach Baustoff und Wanddicke von 4 bis 12 Stunden an den Innenraum abgeben. Mit der Belüftung eines Spaltes zwischen der Glasscheibe und dem Mauerwerk, kann eine bessere Nutzung der Solarenergie erreicht werden. Im äußeren Luftkreislauf erwärmt sich die Luft aufgrund solarer Einstrahlung am erhitzten Absorberblech und kann die gespeicherte Energie an die Hohlkörperwand abgeben, d.h. diese „beladen“. Der innere Luftkanal führt durch einen Luftspalt hinter einer auf die Wand aufgetragenen Gipskartonvorsatzschale. Im unteren Bereich befindet sich ein zusätzliches Heizelement. Die Außenwand wird entladen, sobald eine Konvektion im Spalt in Gang gesetzt wird. Bei länger anhaltenden kalten Witterungsperioden und in den Nächten wirken sich die hohen Transmissionswärmeverluste nachteilig aus [42]; Schimmelpilzbildung im inneren Luftkanal (offener Entladekreislauf) kann nicht ausgeschlossen werden.

In [91] wurde die in Bild 61 dargestellte Konstruktion rechnerisch untersucht. Zunächst wird mithilfe einer dreidimensionalen Finiten-Differenzen-Methode [130] die Temperaturverteilung unter stationären Randbedingungen ermittelt, wobei sich die tiefste Temperatur in der vertikalen Mitte des Kollektors einstellt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Glasabdeckung wärmetechnisch die Stelle geringster Dämmung ist. Trägt man die Temperaturverteilung über der Bauteilhöhe auf, so ergeben sich für den in Bild 61 gezeigten Konstruktionstyp die in Bild 62 dargestellten Kurven bei einer Außenlufttemperatur von 0 °C und 20 °C Innenlufttemperatur für unterschiedliche Varianten, die in Bild 62 angegeben sind. Das linke Bild beschreibt die äußere Luftkanalseite. Da Schimmelpilzbildung vor allem im Entladekreislauf erwartet wird, ist die Verteilung entlang der Bauteilkante des inneren Luftkanals (im Bild rechts) maßgebend. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluß der horizontalen Kanäle des äußeren Ringsystems (in

Bild 61 im Bereich der unteren Öffnungsklappe). In diesem Bereich sinkt für den Standardfall einer 8 cm dicken Speicherwand die Temperatur von 16 °C in Wandmitte um mehr als 2 K. Dies ist – im Vergleich zur gedämmten Wandmitte – durch die höhere Wärmeleitfähigkeit der Luft im horizontalen Strömungskanal verursacht. Auf diese Weise kann eine Stelle definiert werden, an der sich die niedrigste Oberflächentemperatur einstellt. Der Betriebszustand „Stillstand“ stellt den ungünstigsten Fall dar, da bei strömender Luft sich die Oberflächentemperatur gegenüber dem Stillstandszustand erhöhen würde [91]. Aus dem Testreferenzjahr [53] werden für die instationären Berechnungen zunächst eine typische Dreitagesperiode im Herbst herausgegriffen und dafür die tiefste Oberflächentemperatur im inneren Luftkanal zeitabhängig ermittelt (Bild 63 links). Danach wird die relative Luftfeuchte an der Stelle der tiefsten Temperatur im inneren Luftkanal (siehe Bild 62 rechts) berechnet und in Bild 63 links unten darge-

stellt. Diese hängt nur vom hygrothermischen Zustand der Innenluft ab, die mit 20 °C und 50 % relativer Feuchte zugrunde gelegt wird. Eine analoge Berechnung für den Winterfall zeigt Bild 63 rechts. Die Ergebnisse werden als Klimarandbedingung für das biohygrothermische Modell verwendet. Dabei wird auf Basis des dreitägigen Klimadatensatzes durch Aneinanderreihung jeweils eine 6-wöchige Periode berechnet. Zusätzlich zum Standardfall (Innenklima mit konstant 20 °C und 50 % relativer Feuchte) erfolgt eine Variation der Feuchte der Raumluft, indem für den Herbstfall auch mit einer relativen Feuchte von 65 % (hohe Feuchtelast) und im Winter mit 40 % (normale Feuchtelast) gerechnet wird. Zur Vorhersage von Schimmelpilzbefall wird infolge des Staubeintrags ein nährstoffreiches Substrat angenommen, da die Anlage ohne Filter betrieben wird. Darüber hinaus fällt die Gipskartonvorsatzschale in die Substratgruppe I.

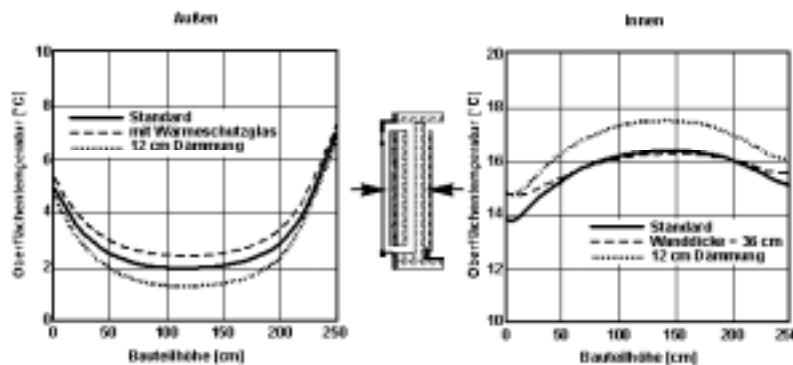


Bild 62 Verteilung der Oberflächentemperaturen des in Bild 61 dargestellten Kollektorbauteils entlang des im Vertikalschnitt markierten Bereichs im äußeren (links) und inneren Luftkanal (rechts) in Abhängigkeit von der Bauteilhöhe für verschiedene Varianten.

Standard:
U-Wert der Verglasungseinheit: 4 W/(m² K); Wanddicke: 8 cm; 6 cm Dämmung

Variante 1:
wie Standard; U-Wert der Verglasungseinheit mit Wärmeschutzglas: 2 W/(m² K); Wanddicke: 36 cm

Variante 2:
wie Standard; 12 cm Dämmung der Speicherwand.

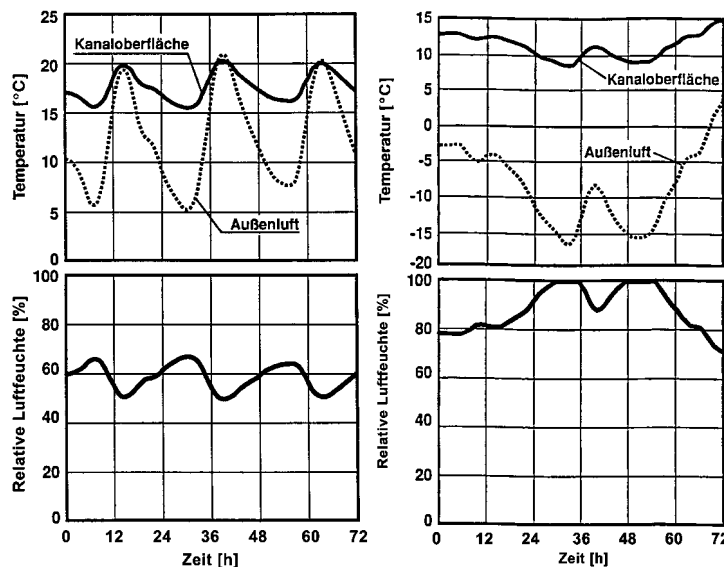


Bild 63

Dreitägiger Verlauf der Temperaturen (Bilder oben) der Außenluft und an der inneren Kanaloberfläche sowie die sich dort einstellende relative Luftfeuchte (Bilder unten) für eine typische Herbstperiode (Bilder links) und eine typische Winterperiode (Bilder rechts) bei angenommenen Raumluftbedingungen von 20 °C und 50 % relativer Feuchte bei einer Speicherwanddicke von 8 cm.

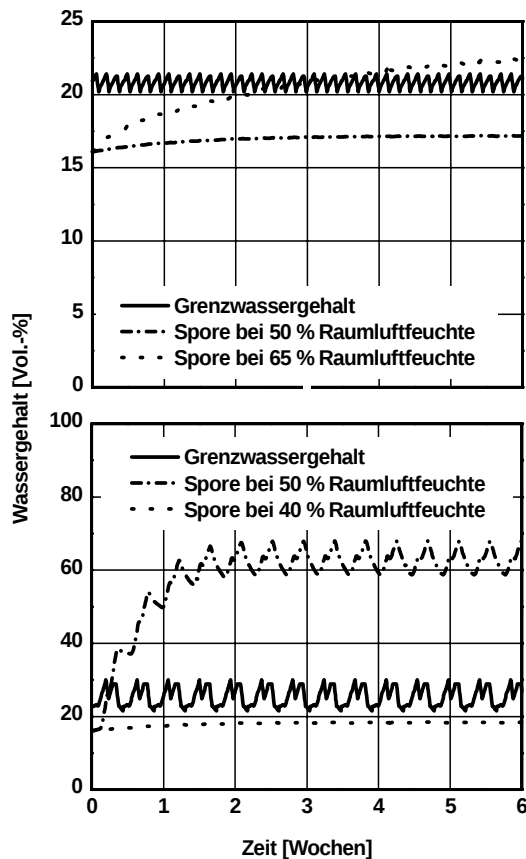


Bild 64 Berechnete Zeitverläufe des Sporen-Wassergehaltes in den sich auf der inneren Kanaloberfläche befindlichen Sporen für verschiedene Klimarandbedingungen.

Oben: Typische Herbstperiode nach [53].

Unten: Typische Winterperiode nach [53].

Zugrunde gelegte Daten und Randbedingungen:

Außenklima gemäß Bild 63

Raumluftfeuchte: 40 %, 50 %, 65 %
(variiert)

Raumlufttemperatur: 20 °C.

Die Verläufe des Grenzwassergehaltes, ab dem die Keimung eintritt, sind jeweils mit durchgezogenen Linien gekennzeichnet.

Bild 64 zeigt die ermittelten Wassergehalte in den Sporen sowie den Vergleich mit den Grenzwassergehalten (durchgezogene Linien) für den Herbstfall (Bild oben) und den Winterfall (Bild unten). Wie man erkennt, kommt es im Herbst nur bei einer hohen Innenraumfeuchte von 65 % nach etwa 3 Wochen zur Sporenauskeimung. Bei 50 % und bei 60 % (nicht im Bild dargestellt) bleibt der Kanal schimmelpilzfrei. Im Winter hingegen könnten sich unter diesen Bedingungen rasch Pilze bilden. Erst ab einer Feuchte unter 40 % im Raum wäre kein mikrobieller Befall mehr zu erwarten. In [91] wird darüber hinaus untersucht, ob durch den Ersatz der 8 cm dicken Speicherwand durch eine 36 cm dicke Wand die

tiefste Temperatur in der Anlage sich soweit erhöhen läßt, daß keine Schimmelpilzbildung mehr eintritt. Im Herbst erhöht sich die tiefste Oberflächentemperatur dabei um ca. 1 K, wie Bild 62 rechts zeigt, und die relative Feuchte überschreitet auch bei hoher Feuchtelast zu keiner Zeit kritische Werte; Schimmelpilzbildung kann somit ausgeschlossen werden. Ein ähnliches Ergebnis erhält man bei 12 cm Dämmung (siehe ebenfalls Bild 62 rechts). Im Winter dagegen sind im Standardfall (50 % relative Feuchte im Raum) auch bei 36 cm dickem Mauerwerk die Wachstumsvoraussetzungen erfüllt. Geht man davon aus, daß hiermit die baukonstruktiven Möglichkeiten ausgeschöpft sind, muß das Problem der Schimmelpilzbildung anlagentechnisch gelöst werden. Hier bietet sich eine im Bauteil angeordnete Heizung an, die quasi als „Schimmelpilzwächter“ immer dann zuzuschalten wäre, wenn die relative Luftfeuchte an der ungünstigsten Stelle den in der LIM_{Bau}-Kurve der Substratgruppe I dargestellten temperaturabhängigen Feuchtwert überschreitet.

Erdreich/Luft-Wärmetauscher

Zur Reduzierung des bei gut gedämmten Gebäuden vor allem durch Lüftungswärmeverluste aufzubringenden Heizenergiebedarfs kann, wie in [117] beschrieben, eine Vorerwärmung der einem Gebäude zugeführten Außenluft durch einen Erdreich/Luft-Wärmetauscher (EWT) erfolgen. Diese Systeme können im Sommer auch zur Kühlung von Gebäuden verwendet werden. Dabei wird Außenluft angesaugt, durch das im Erdreich verlegte Rohrsystem geleitet und anschließend oftmals direkt, also ohne zwischengeschalteten Wärmetauscher, dem Gebäude zugeführt. Da eine Abkühlung der im Sommer meist – absolut gesehen – feuchten Luft stets zu einer Erhöhung der relativen Feuchte im Kanal führt, soll auf Basis der in [118] zusammengestellten Ergebnisse eine Beurteilung der Gefahr von Schimmelpilzbildung in solchen Kanälen erfolgen. Eine Verteilung der Pilzsporen durch den EWT als offenes Lüftungssystem würde eine Gesundheitsgefahr darstellen. Zugrunde gelegt wird ein in 2 m Tiefe verlegter 40 m langer EWT aus einem Kunststoff- oder Tonrohr mit einem Rohrdurchmesser von 10 cm. Die in [118] durchgeführten Messungen sowie Berechnungen eines EWT belegen eindeutig, daß vor allem

in Fällen hoher Außenlufttemperaturen, in denen ein solches System eingesetzt wird, eine Taupunkttemperaturunterschreitung im Kanal nicht verhindert werden kann. So bildet sich zwar nur an wenigen Tagen im Jahr Tauwasser, das durch die geneigte Verlegung der Rohre abläuft. Der EWT trocknet nach Abschalten auch wieder aus. Rechnet man aber die absolute Feuchte an einem typischen Julitag von etwa 11 g/m³ [67] auf eine mittlere Temperatur von ca. 10 °C im Erdreich in 2 m Tiefe um, so liegt die relative Feuchte im Kanal immer noch bei über 90 %. Vergleicht man diese Klimarandbedingungen mit den in Bild 34 unten dargestellten IsoPLETHEN für die Substratgruppe II, so ist leicht zu erkennen, daß bei einem Tonrohr (Substratgruppe II) mit mikrobiellem Wachstum im EWT nach etwa 4 Tagen gerechnet werden muß. Mit einem zur Substratgruppe III gehörenden Rohr aus Kunststoff könnte dies verhindert werden, aber nur unter der Bedingung, daß keine Verschmutzung ins EWT-Rohr eingebracht wird. Filtereinsatz und häufige Reinigung sind daher unabdingbare Voraussetzungen für einen hygienisch einwandfreien sommerlichen Betrieb.

8. Schlußfolgerungen

Die Eigenschaften des neuen Vorhersageverfahrens unterscheiden sich gegenüber den bisher üblichen Methoden zur Abschätzung einer Schimmelpilzgefahr durch mehrfache experimentelle Validierung sowie durch eine differenzierte Angabe von Wachstumsvoraussetzungen. Im IsoPLETHENmodell werden für drei unterschiedliche Substratgruppen in Abhängigkeit von der Temperatur und relativen Feuchte die Sporenauskeimungszeiten bzw. Wachstumsraten präzisierbar. Diese Angaben beziehen sich auf alle Pilzarten, die nach dem derzeitigen Kenntnisstand in Gebäuden vorkommen, wobei jeweils die geringsten Sporenauskeimungszeiten sowie größten Wachstumsraten berücksichtigt wurden. Damit kann, allein durch Kenntnis der hygrothermischen Randbedingungen, für unterschiedliche Baustoffe und Verschmutzungsgrade die Zeit, die Schimmelpilze zum Auskeimen mindestens benötigen, ermittelt werden. Nach erfolgter Auskeimung wird prognostizierbar, mit welchem Myzelwachstum maximal zu rechnen ist.

Für optimalen Nährboden ermöglichen eigene IsoPLETHensysteme die Schimmelpilzbildung für verschiedene Gefährdungsklassen vorherzusagen. Dazu wurde die von Pilzen ausgehende Gesundheitsgefahr in drei Klassen eingeteilt, denen jeweils die Wachstumsvoraussetzungen für jede einzelne Spezies zugeordnet wird. Dies gestattet neben der Vorhersage der Schimmelpilzbildung für alle Pilze einer Klasse oder Gruppe auch entsprechende Einzelbewertungen.

Im Falle stationärer Klimarandbedingungen kann Schimmelpilzbildung gemäß dem IsoPLETHENmodell ausgeschlossen werden, wenn es substratabhängig zu keiner Überschreitung der in den IsoPLETHensystemen für Sporenauskeimung aufgezeigten hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen kommt. Dazu wird der Verlauf des jeweiligen LIM, der die unterste Grenze der Pilzaktivität beschreibt, im bauphysikalisch interessanten Bereich zwischen 0 °C und 30 °C herangezogen. Es zeigt sich, daß bei hoher Temperatur eine geringere relative Feuchte genügt, um Schimmelpilzbildung zu ermöglichen, während bei hohen Feuchten auch schon niedrigere Temperaturen kritisch sein können. Damit stehen erstmals differenzierte Hinweise zur Verfügung, die es erlauben, temperaturabhängig die für Schimmelpilzbildung erforderlichen relativen Feuchten für unterschiedliche Substratgruppen anzugeben. Bei einer Temperatur von 15 °C genügt z.B. für optimalen Nährboden eine relative Feuchte von etwa 73 % für Gefährdungsklasse B/C sowie 77 % für gesundheitlich kritische Pilze (Klasse A) und für die Substratgruppen I bzw. II 77 % bzw. 82 %; letztgenannte Werte gelten für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze. Es zeigt sich für einige Spezies, daß aus einer Erhöhung der Raumlufttemperatur – oft als Maßnahme zur Verhinderung von Pilzwachstum genannt – ein erhöhtes Schimmelpilzrisiko resultieren kann. Durch eine Erhöhung der Raumluft- und damit der Oberflächentemperatur durch zusätzliches Heizen sinkt zwar die relative Feuchte im Raum und an den Oberflächen; zusätzlich nimmt aber bei höherer Temperatur die für das Wachstum von Pilzen erforderliche relative Feuchte gleichzeitig ab.

Wie die Anwendungsbeispiele in Ziffer 7 gezeigt haben, stellt die Erhöhung des Wärmeschutzniveaus eine optimale Maßnahme zur Verminderung des Risikos von Schimmelpilzbildung an Außenbauteil-Innenoberflächen dar. Bild 65 stellt ein Nomogramm auf Basis der entsprechenden LIM_{Bau} -Kurven dar zur Bestimmung der maximal zulässigen Luftfeuchte im Raum, bei der auf der Innenseite eines Außenbauteils kein Schimmelpilzbefall mehr auftritt, in Abhängigkeit von der sich einstellenden Innenoberflächentemperatur (untere Bilder) für die beiden Substratgruppen I und II. Die Innenoberflächentemperatur kann wiederum für eine Raumlufttemperatur von 16 °C (linke Bilder) und 20 °C (rechte Bilder) in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizient für unterschiedliche stationäre Außenlufttemperaturen (obere Bilder) abgelesen werden. Im Falle der Beurteilung von Wärmebrücken kann entweder direkt von der an der Stelle der Wärmebrücke ermittelten Innenoberflächentemperatur ausgegangen werden oder vereinfachend ein fiktiver Wärmedurchgangskoeffizient für den Bereich der Wärmebrücke angesetzt werden.

Zur Bewertung von Baukonstruktionen bei beliebigen Klimarandbedingungen können mithilfe des hygrothermischen Rechenverfahrens WUFI die instationären Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte an interessierenden Stellen in der Baukonstruktion, an denen Pilzbildung zu erwarten ist, als Eingabeparameter für das biohygrothermische Modell ermittelt werden. Damit ergibt sich erstmals auch die Möglichkeit, die Auswirkung kurzzeitiger Feuchtespitzen, z.B. durch Duschen oder Kochen, auf eine mögliche Schimmelpilzbildung konstruktionsabhängig (z.B. sorptive Putze) zu bewerten; mit den biohygrothermischen Berechnungen lässt sich nämlich die Auswirkung instationärer Feuchteverläufe auf die Be- und Entfeuchtung der Schimmelpilzsporen direkt ermitteln. Wie die Betrachtung des Aufschaukelns der Feuchte in den Modellsporen gezeigt hat, sind einstündige hohe Feuchtespitzen von z.B. 95 % relativer Feuchte pro Tag zunächst unkritisch. Bei einer Andauer von mehr als drei Stunden pro Tag ist innerhalb weniger Wochen aber mit Pilzbefall, vor allem bei Materialien in Substratgruppe I, zu rechnen.

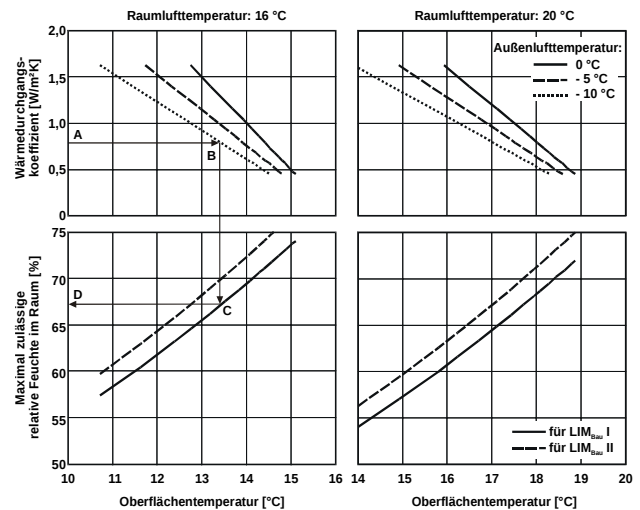


Bild 65 Nomogramm zur Bestimmung der maximal zulässigen relativen Raumluftfeuchte, bei deren Überschreitung Schimmelpilzbildung an einer Außenwand auftritt, bei einer Raumlufttemperatur von 16 °C (links) und 20 °C (rechts).

Oberer Bildteil:

Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizient für verschiedene Außenlufttemperaturen.

Unterer Bildteil:

Maximal zulässige relative Raumluftfeuchte in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für die Substratgruppen I und II.

Zugrunde gelegte Daten:

LIM_{Bau} -Kurven der Substratgruppen I und II.

Hinweise zur Diagrammbenutzung:

- A: Wärmedurchgangskoeffizient wird abgelesen
- B: Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur
- C: Relative Feuchte (D) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für die Substratgruppen I und II.

Da die den hygrothermischen Berechnungen zugrundeliegenden Stoffkennwerte sowie die in der Praxis auftretenden klimatischen Randbedingungen generell mit Schwankungen behaftet sind, ist für quantitativ zuverlässige Aussagen stets eine meßtechnische Validierung der Rechenergebnisse durch Stichproben ratsam. Die Ergebnissicherheit der biohygrothermischen Berechnungen hängt neben den klimatischen Eingabeparametern nur von den Kennwerten der Modellspore, d.h. von der Feuchtespeicherfunktion und dem s_d -Wert, ab. Deren Festlegung ist aber, weil sie nur geringen Einfluß auf die Ergebnisse haben, relativ leicht möglich. Unterschiedliche Sporenauskeimungszeiten ergeben sich hingegen bei verschiedenen Substratgruppen, mit deren Hilfe die Grenzwassergehalte festgelegt werden. Daher sollte aus Sicherheitsgründen bei unklarer

rer Zuordnung von Baustoffen zu einer Substratgruppe für biohygrothermische Berechnungen stets die für Pilzwachstum jeweils günstigere (sprich: kritischere Gruppe) gewählt werden.

9. Zusammenfassung

Schimmelpilzbefall, insbesondere an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen hat in letzter Zeit von sich reden gemacht. Seine Beseitigung bzw. Vermeidung führt nicht nur zu erheblichen Sanierungskosten. Schimmelpilz kann auch die Gesundheit der Bewohner gefährden. Dies läßt Unsicherheit aufkommen. Zwar besteht die Möglichkeit, durch Biozide oder ähnliche Mittel Schimmelpilzbefall in Räumen zu vermindern oder über gewisse Zeit zu verhindern. Allerdings kann eine Gesundheitsgefährdung durch diese Produkte nicht ausgeschlossen werden. Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung in Gebäuden muß deshalb eine Verhinderungsstrategie entwickelt werden, die von den Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze ausgeht und die komplexen bauphysikalischen instationären Vorgänge berücksichtigt.

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

dellen, nämlich dem Isoplethenmodell und dem instationären biohygrothermischen Modell.

Das Isoplethenmodell ermöglicht auf der Basis von Isoplethensystemen die Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums, wobei auch der Substrateinfluß bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung berücksichtigt wird. Ein Isoplethensystem beschreibt die hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen eines Pilzes und besteht aus einem von der Temperatur und der relativen Feuchte abhängigen Kurvensystem, den sog. „Isoplethen“, die zur Vorhersage von Sporenkeimung Sporenauskeimungszeiten, im Falle der Beschreibung des Myzelwachstums Wachstum pro Zeiteinheit darstellen.

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich hinsichtlich Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemein gültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten und gesundheitsbeeinträchtigend bzw. bauschädigend sind. Für diese etwa 200 Spezies, die beide Merkmale erfüllen, werden quantitative Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte zusammengestellt. Zur Unterscheidung der Lebensphasen der Schimmelpilze werden die Daten jeweils getrennt für Sporenauskeimung und Myzelwachstum erfaßt. Die Differenzierung der Schimmelpilze nach der von ihnen ausgehenden Gesundheitsgefährdung erfolgt durch sog. „Gefährdungsklassen“, welche folgendermaßen definierbar sind:

- A. Pilz oder Stoffwechselprodukte sind erheblich gesundheitsgefährdend und dürfen in einem Wohnraum nicht auftreten.
- B. Pilz oder Stoffwechselprodukte sind bei längerer Exposition in Räumen gesundheitsgefährdend (d.h. pathogen) oder besitzen ein allergenes Potential.
- C. Pilz ist nicht gesundheitsgefährdend, ein Bewuchs führt aber ggf. zu wirtschaftlichem Schaden.

Da sich bei der Einteilung der Pilze in die drei Gefährdungsklassen die Werte für Klasse C nur unwe-

sentlich von B unterscheiden, reicht es aus, im Isoplethenmodell nur in die Gefährdungsklassen A und B/C zu unterscheiden. Die Isoplethensysteme basieren auf meßtechnisch erfaßten biologischen Daten und berücksichtigen die Wachstumsvoraussetzungen aller Pilze einer jeweiligen Gefährdungsklasse. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen möglicher Pilzaktivität sind LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt worden.

Zunächst werden für die einzelnen Gefährdungsklassen die Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte für optimalen Nährboden angegeben. 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 wurden. Dazu erfolgte eine Definition von vier Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

- Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien),
- 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 0, I und II bezeichneten Gruppen erstellt, wobei für die Substratgruppe 0 die Isoplethen für optimalen Nährboden gelten. Für die Substratgruppe III wird kein Isoplethensystem angegeben, da davon ausgegangen werden kann, daß ohne Verschmutzung Schim-

melpilzbildung 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.

Insgesamt werden also acht Isoplethensysteme – jeweils für Sporenauskeimung und Myzelwachstum – entwickelt, die für eine ganze Gruppe von Schimmelpilzen gelten und neben optimalem Nährboden auch unterschiedliche Substrate berücksichtigen, nämlich:

- a) Isoplethensysteme für die Gefährdungsklasse B/C (LIM B/C). Diese Systeme beziehen sich auf biologische Vollmedien als Nährboden und besitzen daher die anspruchlosesten Wachstumsvoraussetzungen aller Isoplethensysteme, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die Wachstumsgrenze. Dies bedeutet, daß auch Schimmelpilzbildung der Gefährdungsklasse A ausgeschlossen ist, wenn für die Klasse B/C die Wachstumsvoraussetzung nicht erfüllt ist.
- b) Isoplethensysteme für die Gefährdungsklasse A (LIM A). Analog zu a), nur für alle Pilze der Gefährdungsklasse A gültig,
- c) Isoplethensysteme für Substratgruppe I (LIM_{Bau} I). Gelten für alle im Bau auftretenden Schimmelpilze und beziehen sich nicht auf Vollmedium, sondern auf Materialien in Substratgruppe I als Substrat,
- d) Isoplethensysteme für Substratgruppe II (LIM_{Bau} II). Analog zu c), nur für alle Materialien, die in Substratgruppe II fallen, gültig.

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

Austrocknen der Pilzsporen infolge instationärer Mikroklima-Randbedingungen 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 fixierten Sporenauskeimungszeiten iterativ angepaßt wird. Ist ein bestimmter Wassergehalt im Sporenninneren vorhanden, der den Beginn des Stoffwechsels zuläßt, kann der Pilz unabhängig von äußeren Bedingungen seinen Stoffwechsel selbst regulieren. Der komplizierte Regelmechanismus ist weitgehend unbekannt und kann daher nicht modellhaft beschrieben werden. Dies ist aber auch nicht erforderlich, weil der kritische Wassergehalt (Grenzwassergehalt), ab dem die biologische Aktivität einsetzt, erst gar nicht überschritten werden darf. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt, indem temperaturabhängig aus den entsprechenden LIM-Kurven die tiefste relative Feuchte ablesbar ist, bei der Sporenauskeimung stattfindet. Mithilfe der für das Sporenninnere zugrunde gelegten Feuchtespeicherfunktion kann der in der

Spore sich einstellende Wassergehalt errechnet und dann mit dem Grenzwassergehalt verglichen werden.

Zur Berücksichtigung möglicher Substrateinflüsse sind die s_d -Werte der Sporenwand so angepaßt worden, daß die unter stationären Bedingungen mit dem biohygrothermischen Modell ermittelten Sporenauskeimungszeiten denjenigen in den Isoplethensystemen der Substratgruppen 0, I und II entsprechen. Durch dieses Anpassen der s_d -Werte der Sporenwand kann eine Modellspore definiert werden, die für alle drei Substratgruppen Gültigkeit besitzt. Ferner sind bei der Festlegung der substratabhängigen Grenzwassergehalte die LIM-Kurven in den Isoplethensystemen der entsprechenden Substratgruppen zu verwenden.

Die im Bau auftretenden instationären Bedingungen für Temperatur und relative Feuchte können mit dem Programm WUFI für ein- und zweidimensionale Baukonstruktionsgeometrien gewonnen werden. Die Beureilung der Sporenauskeimung erfolgt auf Basis des an der Oberfläche auftretenden Mikroklimas. Zur Bewertung des Myzelwachstums werden auch die hygrothermischen Verhältnisse in 1 bis 3 mm Tiefe herangezogen. Auch das kann in einfacher Weise mit dem Programm WUFI erfolgen. Die an den entsprechenden Stellen auf oder in Bauteilen ermittelten instationären hygrothermischen Randbedingungen dienen als Eingabeparameter für das biohygrothermische Modell.

Das biohygrothermische Verfahren wird durch Plausibilitätsbetrachtungen, Sensitivitätsanalysen sowie den Vergleich mit Laborversuchen, Freilandunter-

suchungen und Erhebungen in bewohnten Objekten validiert. Dabei zeigt sich in allen Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Vorhersage und den Messungen bzw. Beobachtungen in der Praxis. Da die Stoffkennwerte für das biohygrothermische Modell an einigen Stellen angepaßt oder aus Untersuchungen an sporenbildenden Bakterien entnommen werden mußten, sollten sie durch ausgewählte biologische Experimente weiter abgesichert werden.

Ein Vergleich der entwickelten Modelle mit bisher vorhandenen Normvorgaben, Verhinderungsstrategien und anderen Vorhersageverfahren zeigt, daß das biohygrothermische Verfahren deutlich über den derzeitigen Stand des Wissens hinausgeht. Die rechnerische Prognose der Schimmelpilzbildung ermöglicht die Behandlung von Fragestellungen, die bislang weder mit einfachen Abschätzungen noch mit sinnvollem meßtechnischen Aufwand beantwortet werden konnten. Zum Beispiel war die experimentelle Bestimmung des hygrothermischen Verhaltens von sanierten Außenwandkonstruktionen und

die Bewertung der Gefahr einer wiederkehrenden mikrobiellen Besiedelungsgefahr nach der Sanierung bislang nicht möglich. Parameterstudien zur Wahl der richtigen Konstruktion können mit dem biohygrothermischen Verfahren nunmehr relativ einfach durchgeführt werden. Ferner ist auch die Bewertung von innenliegenden Konstruktionsteilen problemlos. Gerade diese einfachen und kostengünstigen Merkmale lassen bei der Planung von Bauvorhaben oder bei Sanierungsmaßnahmen für die Zukunft einen breiten Einsatz des neuen Verfahrens zur Vorhersage von Schimmelpilzbildung erwarten.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Adan, O.: On the fungal defacement of interior finishes. Dissertation, University of Technology, Eindhoven (1994).
- [2] Altrock, C.: Über den Daumen gepeilt. Fuzzy-Logik: scharfe Theorie der unscharfen Mengen. c't (1991), H. 3, S. 188 - 206.
- [3] Anderson, M. A. et al.: Bacteria, molds, and toxins in water-damaged building materials. Applied and Environmental Microbiology Vol. 63 (1997), H. 2, S. 387 - 393.
- [4] Ayerst, G.: The effect of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. Journal of Stored Products Research (1969), H. 5, S. 127 - 141.
- [5] Bagda, E.: Biozide in Bautenbeschichtungen. Kontakt & Studium 545, expert Verlag, Renningen-Malmsheim (2000).
- [6] Beckert, J.: Gutachterliche Stellungnahme zu warmluftdurchströmten Bauteilen aus hygienischer Sicht. Institut für Hygiene der Medizinischen Hochschule Lübeck (1985).
- [7] Beever, R. E.; Laracy, E. P.: Osmotic adjustment in the filamentous fungus *Aspergillus nidulans*. Journal of Bacteriology Vol. 168 (1986), H. 3, S. 1358 - 1365.
- [8] Bibel: Altes Testament, Buch Levitikus, Kap.14, Vers 33 - 48.
- [9] Bieberstein, H.: Schimmelpilze in Wohnräumen – was ist zu tun? Alpha & Omega-Verlag, Stuttgart (1995).
- [10] Bielecki, R.; Hempel, B.: Schimmelpilze – Alternativen zur Bekämpfung und Vorbeugung. Bauhandwerk/Bausanierung (2000), H. 4, S. 61 - 63.
- [11] Block, S. S.: Humidity requirements for mold growth. Applied Microbiology 1 (1953), H. 6, S. 287 - 293.
- [12] Carl, M.: Langzeitverhalten von Filtern in Lüftungsanlagen. TAB (1998), H. 1, S. 47 - 52.
- [13] Clarke, J. A. et al.: A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. Building and Environment Nr. 34, (1999), S. 515 - 521.
- [14] Cooke, R. C.; Rayner, A. D.: Ecology of saprotrophic fungi. Kapitel 1: Heterotrophy and its consequences. Longman-Verlag, London - New York (1984), S. 1 - 13.
- [15] Cziesielski, E.: Schimmelpilz – ein komplexes Thema. Wo liegen die Fehler? wksb – Zeitschrift für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz 44 (1999), H. 43, S. 25 - 28.
- [16] Deacon, J. W.: Modern mycology. 3. Auflage, Blackwell Science-Verlag (1997).
- [17] Deutsche Gesellschaft für Wohnmedizin e.V.: Schimmelpilze in Gebäuden, Gefahr für die Gesundheit. Wohnmedizin Mitteilungsblatt für Wohn- und Baumedizin (1988), H. 5, S. 3 - 5.
- [18] Deutsches Institut für Normung: DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth-Verlag, Berlin (2001 - 03).
- [19] Deutsches Institut für Normung: DIN 4108 – Wärmeschutz im Hochbau. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. Beuth-Verlag, Berlin (1981 - 08) (wird 2001 ersetzt).
- [20] Deutsches Institut für Normung: DIN 4108 – Wärmeschutz im Hochbau. Teil 5: Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin (1981 - 08) (wird 2001 ersetzt).
- [21] Deutsches Institut für Normung: E-DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil x: Vermeidung von Schimmelpilzen. Beuth-Verlag, Berlin (Entwurfassung: 1999 - 05).
- [22] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 12 571 – Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Beuth-Verlag, Berlin (2000 - 4).

- [23] Deutsches Institut für Normung: E-DIN EN ISO 13 788 – Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchten und Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren. Beuth-Verlag, Berlin (Entwurfssfassung: 1997 - 12; ISO 13 788: -Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods, 2001 - 07).
- [24] Deutsches Institut für Normung: DIN 52 620 – Bestimmung des Bezugsfeuchtegehaltes von Baustoffen. Beuth-Verlag, Berlin (1991 - 04).
- [25] Deutsches Institut für Normung: DIN 68 800 – Holzschutz. Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth-Verlag, Berlin (1996 - 05).
- [26] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau – BMBau – (Hrsg.): Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden. Bonn (1996).
- [27] Engesser, K.-H.; Plaggemeier, Th.: Microbiological Aspects of Biological Waste Gas Purification. Biotechnology (2000), H.-J. Rehm; G. Reed (Hrsg.), Vol 11c, Wiley-VCH Verlag GmbH, S. 274 - 302.
- [28] Erhorn, H.: Schäden durch Schimmelpilzbefall im modernisierten Mietwohnungsbau – Umfang, Analyse und Abhilfemaßnahmen. Bauphysik 10 (1988), H. 5, S. 129 - 134.
- [29] Erhorn, H.: Schimmelpilzanfälligkeit von Bauteilen. IBP-Mitteilung 17 (1990), Nr. 196.
- [30] Erhorn, H.; Gertis, K.: Bauphysikalische Ursachen – mould infestions in appartments. Waubke, N. V.; Kusterle, W. (Hrsg.): Schimmelbefall in Wohnbauten (Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen). Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck (1990).
- [31] Erhorn, H.; Reiß, J.: Schützt der Mindestwärmeschutz in der Praxis vor Schimmelpilzschäden? IBP-Mitteilung 19 (1992), Nr. 224.
- [32] Flannigan, B.; Miller, D. J.: Health implications of fungi in indoor environments – an overview. Samson, R. A. et al. (Hrsg.): Health implications of fungi in indoor environments. Air quality monographs. Elsevier, Amsterdam (1994).
- [33] Flannigan, B.; Miller, D. J.: Humidity and fungal contaminants. Rose, W.; TenWolde, A. (Hrsg.): Bugs, Mold & Rot II. Workshop Proceedings 16. - 17. Nov. 1993, S. 43 - 50.
- [34] Florance, E. R.; Denison, W. C.; Allen, T. C.: Ultrastructure of dormant and germinating conidia of *Aspergillus nidulans*. Mycologia (1972), 64, S. 115 - 123.
- [35] Fries, N.: Effects of volatile organic compounds on the growth and development of fungi. Transactions of the British Mycological Society Vol. 60 (1973), Part 1, S. 1 - 21.
- [36] Gertis, K.: Belüftete Wandkonstruktionen. Bericht aus der Bauforschung, H. 72. Ernst & Sohn-Verlag, Berlin (1992).
- [37] Gertis, K.; Erhorn, H.; Reiß, J.: Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden. Proceedings Bauphysik-Kongreß in Berlin (1999), S. 241 - 253.
- [38] Gertis, K.; Mehra, S. R.: Bauphysik, Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2001).
- [39] Grant, C.; Hunter, C. A.; Flannigan, B.; Bravery, A. F.: The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. International Biodeterioration 25, (1989), S. 259 - 284.
- [40] Guarro, J.; Gené, J.; Stchigel, A. M.: Developments in fungal taxonomy. Clinical Microbiology Reviews Vol. 12 (1999), H. 3, S. 454 - 500.
- [41] Haferland, F.: Durchlüftete Baukonstruktionen zur natürlichen Regulierung des thermischen Raumklimas in warmen Klimaten. Betonwerk- und Fertigteil-Technik 46 (1980), H. 2, S. 80 - 86; H. 3, S. 167 - 173; H. 5, S. 316 - 324.
- [42] Haferland, F.: Sonnenenergie zur Heizung und Nachtluft zur Kühlung von Gebäuden. HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik Bd. 36 (1985), H. 8, S. 393 - 399.
- [43] Haferland, F.: Kühl- und Wärmeenergiespeicherung in durchlüfteten Baukonstruktionen. Bauphysik 12 (1990), H. 3, S. 70 - 80.
- [44] Hartmann, T.: Bauphysikalische und hygienische Aspekte der Wohnungslüftung. HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik Bd. 51 (2000), H. 7, S. 59 - 61.
- [45] Hawker, L. E.; Madelin, M. F.: The dormant spore. Weber, D. J.; Hess, W.M. (Hrsg.): The fungal spore – form and function. 1. Ausgabe, John Wiley & Sons-Verlag, New York (1976), S. 35 - 46.
- [46] Helbig, M.: Wohnungslüftungsanlagen – Grundvoraussetzung für die Wohnhygiene und Möglichkeit zur Energieeinsparung. Bauphysik 21 (1999), H. 5, S. 197 - 204.
- [47] Hens, H. L. S. C.: Fungal defacement in buildings: A performance related approach. International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning and Refrigerating Research Vol. 5 (1999), H. 3, S. 256 - 280.
- [48] Hocking, A. D.: Responses of xerophilic fungi to changes in water activity. Jennings, D. H. (Hrsg.): Stress tolerance of fungi. Marcel Dekker Inc., New York (1993).
- [49] Höll, W.: Persönliche Mitteilung (Dez. 2000).
- [50] Horner, W. E.; Helbling, A.; Salvaggio, J. E.; Lehrer, S. B.: Fungal allergens. Clinical Microbiology Reviews Vol. 8 (1995), H. 2, S. 161 - 179.

- [51] Hukka, A.; Viitanen, H. A.: A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* Nr. 33, (1999), S. 457 - 485.
- [52] International Energy Agency IEA-Annex 14, Vol. 1: Condensation and Energy, Sourcebook. Leuven (März 1991).
- [53] Jahn, A.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 86-051, Düsseldorf (1986).
- [54] Jorde, W.; Schata, M.; Linskens, H. F.; Elixmann, J. H.: Gesundheitsrisiken durch Schimmelpilze in Gebäuden. *Wissenschaft und Umwelt* 10 (1988), H. 2, S. 86 - 90.
- [55] Kähler, C.: Vorschlag einer Methode zur rechnerischen Beurteilung von Schimmelpilzwachstum. Diplomarbeit, Technische Universität München (2000).
- [56] Kamphausen, P.-A.: Schimmelpilze in Wohngebäuden. Eine rechtliche und bauphysikalische Betrachtung zu einem Schnittstellenproblem in der Bausachverständigenpraxis. *Vbn-info – Verband der Bausachverständigen Norddeutschlands, Sonderheft Schimmelpilze* (2001), S. 46 - 61.
- [57] Kaup, P.: Kostenreduzierung durch warmluftdurchströmte und wärmespeichernde Bauteile in Verbindung mit passiven Sonnenenergiesystemen. Forschungsbericht zum Vorhaben B15-800184-209 des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau vom Institut für Bautechnik und Entwerfen der Universität Hannover (1986).
- [58] Kempe, K.: Schimmel an Bau- und Ausbau-Holz. *Vbn-info – Verband der Bausachverständigen Norddeutschlands, Sonderheft Schimmelpilze* (2001), S. 73 - 80.
- [59] Kerkmann, M.-L.: Schimmelpilze in Innenräumen – Wie gefährlich sind sie tatsächlich? *DpS* (1999), H. 11, S. 11 - 14.
- [60] Kießl, K.: Feuchteschutz, Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Baukonstruktion, TU München (1999).
- [61] König, N.; Oswald, D.; Rath, J.; Sedlbauer, K.: Bauteilintegrierte Heiz- und Haustechnik für zukünftige Baukonzepte (Hybride Heizsysteme) – Phase 2. IBP-Bericht GB 113/1994 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1994).
- [62] Korpi, A.; Pasanen, A.-L.; Pasanen, P.: Volatile compounds originating from mixed microbial cultures on building materials under various humidity conditions. *Applied and Environmental Microbiology* Vol. 64 (1998), H. 8, S. 2914 - 2919.
- [63] Kruppa, B.; Veer, I.; Rüden, H.: Experimentelle Untersuchungen zur Frage der aerogenen Übertragung von Luftmikroorganismen bei hybriden Heizsystemen. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 114 (1993), H. 1, S. 5 - 10.
- [64] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart (1995).
- [65] 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. Aug. 1996, S. 493 - 498.
- [66] Krus, M.; Künzel, H. M.: Berechnung des Feuchtehaushaltes von Porenbetonbauteilen. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 117 (1996), H. 3, S. 134 - 139.
- [67] Krus, M.; Sedlbauer, K.: Feuchteschutz, Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart und Lehrstuhl für Baukonstruktion, TU München (2001).
- [68] Krus, M.: Bauphysikalische Untersuchungen zum biologischen Befall der Wohnanlage McNair, Berlin-Steglitz. IBP-Bericht HTB-04/2001 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (2001).
- [69] Künzel, H. M.: Austrocknung von Wandkonstruktionen mit Wärmedämm-Verbundsystemen. *Bauphysik* 20 (1998), H. 1, S. 18 - 23.
- [70] Künzel, H. M.; Großkinsky, T.: Feuchtebelastungen beeinträchtigen die Wirkung von Dampfbremsspappen. *IBP-Mitteilung* 24 (1997), Nr. 309.
- [71] Künzel, H. M.; Kasper, F.-J.: Von der Idee einer feuchteadaptiven Dampfbremse bis zur Markteinführung. *Bauphysik* 20 (1998), H. 6, S. 257 - 260.
- [72] Künzel, H. M.; Schmidt, T.: Wetterdaten für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen. *IBP-Mitteilung* 27 (2000), Nr. 364.
- [73] Künzel, H. M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. *IBP-Mitteilung* 24 (1997), Nr. 314.
- [74] Künzel, H. M.: Außen dampfdicht, vollgedämmt? bauen mit Holz (1988), H. 8, S. 36 - 41.
- [75] Künzel, H. M.: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis? *IBP-Mitteilung* 26 (1999), Nr. 355.
- [76] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart (1994).
- [77] Künzel, H. M.; Großkinsky, T.: Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an! *wksb – Zeitschrift für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz* 43 (1998), H. 42, S. 22 - 27.
- [78] Künzel, H.: Richtiges Heizen und Lüften in Wohnungen. *wksb – Zeitschrift für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz* 32 (1987), H. 22, S. 12 - 18.

- [79] Künzel, H.: Müssen Außenwände „atmungs-fähig“ sein? wksb – Zeitschrift für Wärme-schutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brand-schutz 25 (1980), H. 11, S. 1 - 4.
- [80] Law, A. K. Y.; Chau, C. K.; Chan, G. Y. S.: Characteristics of bioaerosol profile in office buildings in Hong Kong. Building and Environment (2001), H. 36, S. 527 - 541.
- [81] Landesgesundheitsamt (LGA) Stuttgart: Pro-benahmeverfahren, Probenaufarbeitung und Nachweisverfahren von Schimmelpilzen und deren Stoffwechselprodukten im Innenraum. (unveröffentlicht: 01.2001).
- [82] Lochbühler, R.: Thermische und hygienische Verhältnisse in Bauteilen mit offenen Luft-kreisläufen. Analyse des hygienischen Ge-fährdungspotentials und Beurteilung der Ge-brauchstauglichkeit. Diplomarbeit, Universität Stuttgart (1994).
- [83] Luard, E. J.: Accumulation of intracellular solutes by two filamentous fungi in response to growth at low steady state osmotic poten-tial. Journal of General Microbiology 128, (1982), S. 2563 - 2574.
- [84] Magan, N.; Lacey, J.: Effect of temperature and pH on water relations on field and storage fungi. Transactions of the British Mycological Society Vol. 82 (1984), Part 1, S. 71 - 81.
- [85] Mainka, G.-W.; Paschen, H.: Wärmebrücken-katalog. Teubner-Verlag, Stuttgart (1986).
- [86] McGrath, J. J.; Wong, W. C.; Cooley, D.; Straus, D. C.: Continually measured fungal profiles in sick building syndrome. Current Microbiology 38, (1999), S. 33 - 36.
- [87] Mücke, W.; Lemmen, C.: Schimmelpilze. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (1999).
- [88] Müller, E.; Loeffler, W.: Mykologie – Grundriß für Naturwissenschaftler und Mediziner. Thieme-Verlag, Stuttgart (1982).
- [89] Nielsen, K. F.; Nielsen, P. A.; Holm, G.: Growth of moulds on building materials under different humidities. Proceedings of Healthy Buildings (2000), Vol. 3, S. 283 - 288.
- [90] Oswald, D.; Bertsch, K.: Wärmetechnische Bauteiluntersuchungen für hybride Heiz-systeme. CCI 25 (1991), H. 11, S. 19 - 20.
- [91] Oswald, D.; Sedlbauer, K.; König, N.: Analyse und Prognose der hygienischen Zustände und Wartungsnotwendigkeiten in Außen-wänden mit offenen Luftkreisläufen bei hybriden Heizsystemen – Außenwände mit offenen Luftkreisläufen. IBP-Bericht GB 128/1995 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1995).
- [92] Palmiter, L.; Wheeling, T.: SUNCODE – A program user's manual. Ecotope Groupe (1981).
- [93] Pasanen, P.; Pasanen, A. L.; Jantunen, M.: Water condensation promotes fungal growth in ventilation ducts. Indoor Air 3 (1993), H. 2, S. 106 - 112.
- [94] Pasanen, A. L.: A review: Fungal exposure assessment in indoor environments. Indoor Air 11 (2001), H. 2, S. 87 - 98.
- [95] Pitt, J. I.; Christian, J. H. B.: Water relations of xerophilic fungi isolated from prunes. Applied Microbiology Vol. 16 (1968), H. 12, S. 1853 - 1858.
- [96] Pitt, J. I.; Hocking, A. D.: Influence of solute and hydrogen ion concentration on the water relations of some xerophilic fungi. Journal of General Microbiology 101, (1977), S. 35 - 40.
- [97] Rao, C. Y.; Burge, H. A.; Chang, J. C. S.: Review of quantitative standards and guidelines for fungi in indoor air. Journal of the Air & Waste Management Association 46, (1996), S. 899 - 908.
- [98] Raschle, P.: Wohnraumklima, Schimmelpilze und andere Organismen. EMPA Tage „Ener-gie und Umwelt“ – Eidgenössische Material-prüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Biologie, St. Gallen (1995), S. 107 - 112.
- [99] Raschle, P.: Bauschäden durch Mikroorga-nismen: Mikrobiell bewirkte Schäden an mi-neralischen Baustoffen, Farben und Putzen. EMPA – Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Biologie, St. Gallen (1996).
- [100] Reichel, D.: Auswertung von Schadensproto-kollen über Feuchtigkeitsschäden in 34 Woh-nungen der Wohnbaugesellschaft Hellersdorf mbH. TU Dresden, Bereich Technische Ge-bäudeausrüstung (1997).
- [101] Reiman, M.; Kujanpää, L.; Vilkki, R.; Sundholm, P.; Kujanpää, R.: Microbes in buil-ding materials of different densities. Procee-dings of Healthy Buildings (2000), Vol. 3, S. 313 - 316.
- [102] Reiß, J.: Schimmelpilze – Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (1988).
- [103] Reiß, J.; Erhorn, H.: Instationäre bauphysika-lische Randbedingungen zum Einsetzen des Schimmelpilzwachstums auf Bauteiloberflä-chen. IBP-Bericht WB 78/1994 des Fraun-hofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1994).
- [104] Reiß, J.; Erhorn, H.: Beurteilung von Feuchte-schäden. IBP-Bericht WG 47/1997 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1997).
- [105] Richter, W.: Verhinderung der Schimmelpilz-bildung – welche Möglichkeiten bietet die Fensterlüftung? Vortrags-Manuskript Rosen-heimer Fenstertage 14. - 15. Okt. 1999, S. 89 - 98.
- [106] Riege, F. G.; Wenzel, E.; Eversmann, F.: Schimmelpilzbefall in Thüringer Archiven, De-pots und Magazinen. Exposition am Arbeits-platz – Prophylaxe – Beseitigung. Gefahr-stoffe – Reinhaltung der Luft 59 (1999), H. 4, S. 123 - 131.

- [107] Ritschkoff, A.-C.; Viitanen, H.; Koskela, K.: The response of building materials to the mould exposure at different humidity and temperature conditions. *Proceedings of Healthy Buildings* (2000), Vol. 3, S. 317 - 322.
- [108] Rowan, N. J. et al.: Prediction of toxigenic fungal growth in buildings by using a novel modelling system. *Applied and Environmental Microbiology* Vol. 65 (1999), H. 11, S. 4814 - 4821.
- [109] Rubel, G. O.: A non-intrusive method for the measurement of water vapour sorption by bacterial spores. *Journal of Applied Microbiology* 83, (1997), S. 243 - 247.
- [110] Rudolphi, A.; Kirchner, D.: Ökologische und gesundheitsorientierte Baustoff- und Konstruktionsauswahl. Moriske, H.-J.; Turouski, E. (Hrsg.): *Handbuch für Bioklima und Luft hygiene*. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (2000), 3. Erg. Lfg., Kap. IV-7.1, S. 12 - 24.
- [111] Schlegel, H.G.: *Allgemeine Mikrobiologie*. 6. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart (1985).
- [112] Schulte, U.: *Einführung in die Fuzzy-Logik*. Franzis-Verlag GmbH, München (1993).
- [113] Schultze-Werninghaus, G.: Atemwegs- und Lungenkrankheiten durch Schimmelpilze. Waubke, N. V.; Kusterle, W. (Hrsg.): *Schimmelbefall in Wohnbauten (Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen)*, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck, (1990).
- [114] Schumann, D.: Schimmelbefall in Wohngebäuden – ein typischer Streitfall. 10. Hanseatische Sanierungstage, Entfeuchtung / Entsalzung, Kühlungsborn. Venzmer, H. (Hrsg.): *Feuchte und Altbausanierung*, Schriftenreihe H. 10, Bauwesen-Verlag, Berlin (1999), S. 281 - 298.
- [115] Schüle, W.: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Wärmedämmung von Wänden im instationären Zustand. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 79 (1958), H.3, S. 72 - 77.
- [116] Schwantes, H. O.: *Biologie der Pilze*, Eugen Ulmer-Verlag, Stuttgart (1996).
- [117] Sedlbauer, K.; Lindauer, E.; Werner, H.: Erdreich/Luft-Wärmetauscher zur Wohnungslüftung. *Bauphysik* 16 (1994) H. 2, S. 37 - 41.
- [118] Sedlbauer, K.: *Luftkonditionierung mit einem Erdreich/Luft-Wärmetauscher*. Diplomarbeit, Universität München (1991).
- [119] Sedlbauer, K.; Oswald, D.; König, N.: Schimmelgefahr bei offenen Luftkreisläufen, *gi – Gesundheits-Ingenieur* 119 (1998), H. 5, S. 240 - 247.
- [120] Sedlbauer, K.: Schimmelpilzgefahr mit Fuzzy-Logik berechenbar? Kurzfassungen der Referate zur Gemeinschaftstagung des DIBT und IBP Fenster und Wohnhygiene in Stuttgart, 17. Feb. 1999.
- [121] Sedlbauer, K.; Krus, M.; Zillig, W.: Schimmelpilzbildung in dampfdichten Steildächern – den Ursachen auf den Grund gegangen. *IBP-Mitteilung*. Erscheint demnächst.
- [122] Senkpiel, K. et al.: Bestimmung des Mykotoxin-Gehaltes von Konidiosporen aus Wildstamm-Reinisolaten schimmelpilzbelasteter Wohnungen. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 121 (2000), H. 6, S. 312 - 319.
- [123] Senkpiel, K.; Ohgke, H.: Beurteilung der „Schimmelpilz“-Sporenkonzentration in der Innenraumluft und ihre gesundheitlichen Auswirkungen. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 113 (1992), H. 1, S. 42 - 45.
- [124] Senkpiel, K.; Soon, A.; Ohgke, H.: Untersuchungen zur mikrobioziden Wirkung von ausgewählten kommerziell erhältlichen Antischimmelpilz-Präparaten für den häuslichen Gebrauch. *gi – Gesundheits-Ingenieur* 117 (1996), H. 2, S. 86 - 92.
- [125] Sitte, P.; Ziegler, H.; Ehrendorfer, F.; Bresinsky, A.: *Strasburger - Lehrbuch der Botanik*. 34. Auflage, Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart (1998).
- [126] 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.
- [127] Snow, D.: The germination of mould spores at controlled humidities. *Ann. App. Biol.* Vol. 36 (1949), H. 1, S. 1 - 13.
- [128] Strasburger, E.: *Lehrbuch der Botanik*. 31. Auflage, Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart (1978).
- [129] Takahashi, T.: Airborne fungal colony-forming units in outdoor and indoor environments in Yokohama, Japan. *Mycopathologia* 139, (1997), S. 23 - 33.
- [130] Tanaka, K.: PC-STATWL. Programm zur Berechnung von stationären Wärmeleitungsproblemen. *Bedienerhandbuch* (unveröffentlicht: April 1994).
- [131] Tanaka, K.; Sedlbauer, K.: Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten und der Oberflächentemperaturen von Verglasungen mit verschiedenen Verglasungs-k-Werten und unterschiedlichen Abstandhalter-Ausführungen. *IBP-Prüfbericht P7-43/1996* des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1996).
- [132] Trombe, F.: *Maisons solaires. Techniques de l'ingenieur* 3 (1974), H. 3, S. 375 - 382.
- [133] Tsukahara, T.: Changes in chemical composition of conidia of *Aspergillus fumigatus* during maturation and germination. *Microbiol. Immunol.* Vol. 24 (1980), H. 8, S. 747 - 751.
- [134] T 2914: Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. *Fraunhofer-IRB Verlag*, Stuttgart (Jan. 1999).

- [135] Verhoeff, A. P.; Burge, H. A.: Health risk assessment of fungi in home environments. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 78, (1997), S. 544 - 556.
- [136] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden. Wärmeschutzverordnung vom 16. August 1994. Bundesgesetzblatt, Teil I, ausgegeben zu Bonn am 24. August 1994.
- [137] Viitanen, H.: Factors affecting the development of mould and brown root decay in wooden material and wooden structures. Dissertation, Uppsala (1996).
- [138] Viitanen, H.; Hanhijärvi, A.; Hukka, A.; Koskela, K.: Modelling mould growth and decay damages. *Proceedings of Healthy Buildings* (2000), Vol. 3, S. 341 - 346.
- [139] Wachter, R.: Pollenflugreport für Delmenhorst und Umgebung – gültig für den gesamten Nordwesten. Online im Internet: URL: http://www.nordwest.net/region/pollenflug_report.html [Stand 05. Mai 2001].
- [140] Wainwright, M.: Biotechnologie mit Pilzen – Eine Einführung. Springer-Verlag, Heidelberg (1995).
- [141] Warscheid, T.; Krumbein, W. E.: Biodeteriorationsprozesse an anorganischen Werkstoffen und mögliche Gegenmaßnahmen. *Werkstoffe und Korrosion* 45, (1994), S. 105 - 113.
- [142] Warscheid, T.: Persönliche Mitteilung (Januar 2001).
- [143] Warscheid, T.: Praxisgerechte Bewertung von mikrobiellem Befall. *Vbn-info – Verband der Bausachverständigen Norddeutschlands, Sonderheft Schimmelpilze* (2001), S. 95 - 108.
- [144] Wheeler, K. A.; Hocking, A. D.: Water relations of *Paecilomyces variotii*, *Eurotium amstelodami*, *Aspergillus candidus* and *Aspergillus sydowii*, xerophilic fungi isolated from indonesian dried fish. *International Journal of Food Microbiology* (1988), 7, S. 73 - 78.
- [145] Winter, S.: Schimmelbildungen in Dachkonstruktionen. *Informationsdienst Holzbautechnik* (1999), H. 12, S. 1 - 4.
- [146] Zillig, W.: Hygrothermisches Modell zur rechnerischen Vorhersage des Schimmelpilzbefalls. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim (2001).
- [147] Zöld, A.: Mindestluftwechsel im praktischen Test. *HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik* Bd. 41 (1990), H. 7, S. 620 - 622.