

Schimmel innen, Algen außen

Sedlbauer, K., Krus, M., Breuer, K.
Fraunhofer-Institut für Bauphysik

1 Einleitung

In Oberbayern werden an vielen Häusern Geranien an den Balkonen angebracht, um den Gebäuden den erwarteten optischen Eindruck zu verleihen. Dies gefällt nicht nur den Touristen in dieser Region. Auch in den Wohnungen sind Zimmerpflanzen als Schmuck die Regel. Während die Balkonbepflanzung meist keinen Einfluss auf bauphysikalische Belange eines Gebäudes besitzt, geht von der im Wohnzimmer aufgestellten „Botanik“ schon eine gewisse „Gefahr“ aus, weil das Gießwasser von den Pflanzen nur zu einem verschwindend kleinen Teil direkt zum Wachstum verwendet und die größte Menge der Feuchte an die Raumluft abgegeben wird. Aus bauphysikalischer Sicht könnte man eigentlich auch direkt unsere Wohnungen bewässern, anstatt den Umweg über Zimmerpflanzen zu gehen. Die Folge sind dann nicht selten graue, wenig ansehnliche Schimmelpilzbefallsstellen, z.B. an Wärmebrücken, wie sie Bild 1 links zeigt. Die Pilze können zwar bei näherem Hinsehen attraktiv aussehen (Bild 1 rechts), auf Grund der von ihnen potenziell ausgehenden Gesundheitsgefährdung [22] leitet sich jedoch Sanierungsbedarf ab. Mittlerweile sind die Wachstumsvoraussetzungen der im Innenraum üblicherweise auftretenden Spezies bekannt genug [21], um, was in Ziffer 1 der vorliegenden Veröffentlichung geschehen soll, die Ursachen am klassischen Beispiel einer Pilzbildung in einem Schlafzimmer aufzuzeigen. Im Anschluss daran wird auf das offensichtlich zunehmende Problem der Veralgung gut gedämmter Außenfassaden eingegangen. Es „blüht“ also nicht nur drinnen, sondern auch draußen!



Bild 1: Verschimmelte Ecke eines Raumes aufgrund einer geometrischen Wärmebrücke (Bild links) sowie Rasterelektromikroskopische Aufnahme eines Pinselschimmels (*Penicillium* sp.), nach [25] verändert (Bild rechts).

2 Schimmelpilze in Wohnräumen

Schimmelpilzbefall an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen, ist ein Thema, das immer wieder intensiv diskutiert wird. Dies hängt zum einen mit dem gestiegenen Bewusstsein für Wohnhygiene und Gesundheit der Bewohner bzw. den zu erwartenden Forderungen auf diesem Gebiet zusammen, zum anderen werden erstmals im Zuge der Übernahme europäischer Normen in deutsche Standards Anforderungen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung im Bereich von Außenbauteilen bzw. Wärmebrücken formuliert. Um Pilzbildung erfolgreich zu vermeiden, müssen die Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze bekannt sein. Feuchte spielt dabei bekanntlich eine zentrale Rolle. Im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wurde eine eingehende Recherche durchgeführt und darüber hinaus ein Verfahren entwickelt [21], das die Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf Basis der biologischen Wachstumsvoraussetzungen bei instationären Randbedingungen ermöglicht. Es beschreibt die Zusammenhänge zwischen der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Art des Substrates (Baustoffuntergrund), die für Schimmelpilzbildung und für das weitere Wachstum verantwortlich sind, auf der Basis sog. Isoplethensysteme.

Isoplethensysteme

Ein Isoplethensystem beschreibt Wachstumsvoraussetzungen bzw. –randbedingungen. Es besteht aus temperatur- und feuchteabhängigen Kurvenscharen, den sog. „Isoplethen“, die zur Vorhersage von Sporen-Auskeimungszeiten und zur Beschreibung des Myzelwachstums dienen (siehe Bild 2). Dabei werden die untersten Grenzen möglicher Pilzaktivitäten durch die sog. LIM-Kurven (Lowest Isopleth for Mould) wiedergegeben. Zwischen einzelnen Pilzspezies treten bezüglich der Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede in Erscheinung. Daher werden in [21] bei der Entwicklung allgemeingültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten und als gesundheitsbeeinträchtigend angesehen werden. Für die etwa 200

Arten sind quantitative Literaturangaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte verwertet worden. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden. Dazu erfolgt in [21] eine Definition von Substratgruppen, welchen unterschiedliche "nahrhafte" Materialien und jeweils eigene Isoplethensysteme zugeordnet werden:

Substratgruppe 0:

Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); das dafür gültige Isoplethensystem gibt die minimalen Wachstumsvoraussetzungen an, also auch die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Es bildet für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die unterste Wachstumsgrenze (Bild 2 links).

Substratgruppe I:

Biologisch gut verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material; die unteren Grenzkurven im Isoplethensystem ($LIM_{\text{Bau I}}$; Bild 2 Mitte) zeigen erhöhten Feuchtebedarf.

Substratgruppe II:

Biologisch kaum verwertbare Substrate, wie z.B. mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge (Putze etc., manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen; die unteren Grenzkurven im Isoplethensystem ($LIM_{\text{Bau II}}$; Bild 2 rechts) zeigen weiter erhöhten Feuchtebedarf.

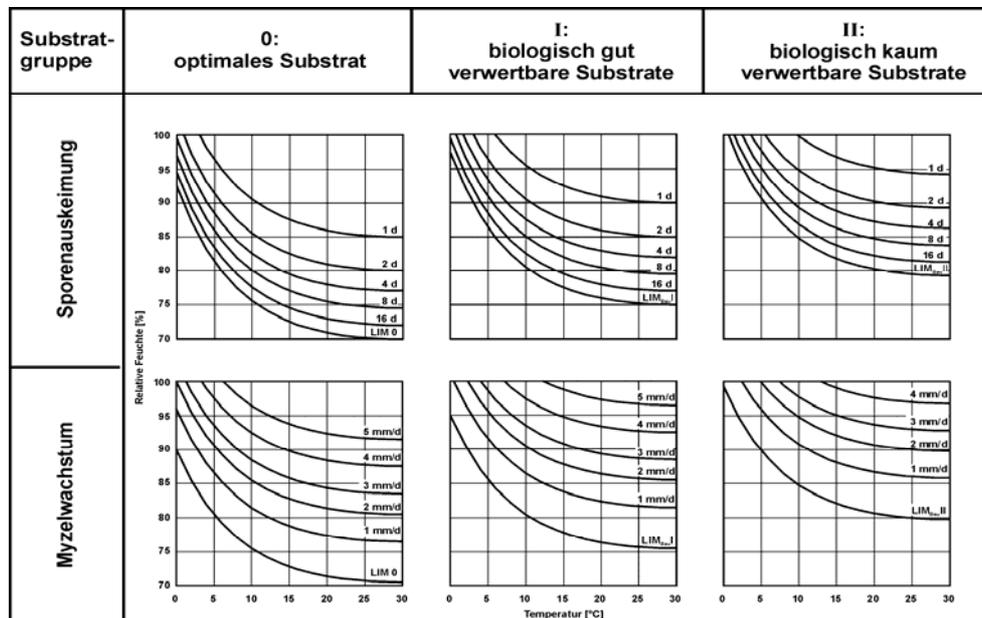


Bild 2: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten) nach [21], das für alle im Bau auftretenden Pilze gilt. Die im Bild dargestellten Diagramme gelten links für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und rechts für Substratgruppe II. Die angegebenen Kurvenscharparameter charakterisieren für die Sporenauskeimungszeit (oben) die Dauer in Tagen, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist und für das Myzelwachstum (unten) die zu erwartende Wachstumsrate in mm/d.

Im Folgenden soll die Funktionsweise des Isoplethenmodells exemplarisch erläutert werden.

Beispielfall I: Schimmel im Schlafzimmer

Probleme mit Schimmelpilzen treten vor allem dann häufig auf, wenn Möbel vor Außenwänden gestellt werden oder Zwischentüren offen stehen und Innenluft zwischen verschiedenen Wohnungszonen ausgetauscht wird. In diesem Fall kann es trotz Einhalten der Mindestdämmwerte zu Schimmelpilzbildung kommen. Zur Berechnung der Temperaturen an den Innenoberflächen von Außenwänden hinter Schränken oder Gardinen sollen in der künftigen DIN 4108 Vermeidung von Schimmelpilzen [3] geeignete Wärmeübergangswiderstände vorgeschlagen werden:

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:	$R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Diese wurden bei den folgenden Berechnungen berücksichtigt. Um mithilfe der Isoplethensysteme eine Vorhersage der möglichen Schimmelpilzbildung zu ermöglichen, müssen auf Basis des Isoplethenmodells die ermittelten instationären Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte an der Bauteiloberfläche mit den Sporenauskeimungszeiten bzw. den Wachstumsraten in den entsprechenden Isoplethensystemen verglichen werden. Die Wachstumsbedingungen, welche durch die zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte, z.B. als Stundenwerte, charakterisiert werden, trägt man als Mikroklima-Randbedingungen in die Isoplethensysteme ein, d.h. es wird mithilfe der einzelnen Isolinien (z.B. Sporenauskeimungszeit 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 im Sinne eines akkumulierten Keimungsgrades 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 (siehe Bild 3). Dadurch ergibt sich eine Bewertungsmöglichkeit; es kann also angegeben werden, ob es in einem bestimmten Zeitraum zu Sporenauskeimung kommt.

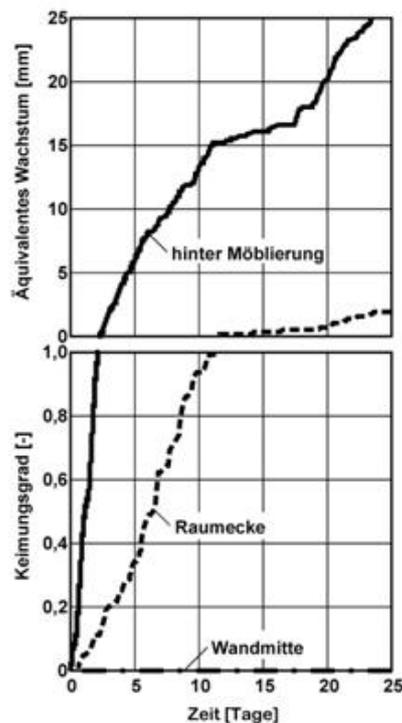


Bild 3: Mit dem Isoplethenmodell und mit hygrothermischen Berechnungen ermittelte Zeitverläufe von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für 3 verschiedene Stellen (Wandmitte, Ecke und hinter Möblierung).

Oberer Bildteil: Äquivalentes Myzelwachstum in mm.

Unterer Bildteil: Keimungsgrad, d.h. anteilige Sporenauskeimungszeit. Beträgt der Keimungsgrad 1, so kann davon ausgegangen werden, dass die Spore vollständig auskeimen konnte und nun zu wachsen beginnt.

In einem in [18] beschriebenen Schadensfall wurde im Schlafzimmer an der nordöstlichen Außenwand eines im Jahr 1955 gebauten Gebäudes Schimmelpilzbefall hinter einem Einbauschränk festgestellt. Die Oberflächen- und Lufttemperaturen wurden während einer kalten Periode über einen längeren Zeitraum gemessen und ausgewertet. Des Weiteren war die relative Feuchte im Schlafrum messtechnisch erfasst worden. In Bild 3 unten sind auf Basis dieser Messwerte die ermittelten Ergebnisse für die Sporenauskeimung an der Wandinnenoberfläche in Wandmitte, in der Raumecke und hinter einer Möblierung an der Außenwand dargestellt. In Wandmitte passiert nichts, nur hinter der Möblierung ergibt sich aufgrund der dort herrschenden Randbedingungen (geringere Temperatur, höhere Feuchten) eine rasche Sporenauskeimung. In der Raumecke wird die Sporenauskeimung erst nach wesentlich längerer Zeit erreicht. Analog kann mithilfe der substratspezifischen Isoplethensysteme für Myzelwachstum angegeben werden, wie die Pilze weiterwachsen. Liegt ein Stundenwert im Isoplethensystem beispielsweise im Bereich von 6 mm Wachstum pro Tag, so bedeutet dies, dass der Pilz in einer Stunde um 0,25 mm wächst. Es erfolgt auch hierbei wieder die Bildung eines Summenwertes, der für den Beispielfall eines Pilzbefalls im Innenraum, in der oberen Grafik von Bild 3 dargestellt wird. In der Raumecke wird durch kurzzeitig vor-

handene gute Wachstumsbedingungen die Sporenauskeimung erreicht, es kommt allerdings zu keinem nennenswerten Myzelwachstum. Dies ist hinter einer Möblierung anders. Dort wird ein großflächiger Pilzbefall prognostiziert, was auch in der Realität beobachtet werden konnte.

Der Beispielfall II verdeutlicht noch einmal, welchen bauphysikalischen Einfluss eine bestimmte Möblierungssituation im Innenraum ausübt. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten einer detaillierten biologischen Analyse aufgezeigt.

Beispielfall II: Schimmelpilze hinter dem Schrank eines Büroraumes

An einem bemerkenswerten Fall einer Pilzbildung hinter einem Einbauschränk an einer Außenwand eines Büroraumes, der sich durch weinrote Verfärbungen auszeichnet (Bild 4), soll im Folgenden die biologische Analyse kurz erläutert werden. Hervorzuheben ist, dass abgesehen von deutlichen Verfärbungen zunächst optisch (ohne Vergrößerung) kein watteartiger Schimmelbelag (Pilzfäden) festzustellen war, so dass anfangs nicht bestimmt war, ob es sich um eine mikrobielle (Bakterien, Hefen, Pilze) oder eine chemische/physikalische Ursache (Salzausblühungen) handelt.

Für eine mikroskopische Untersuchung der verfärbten Stellen wurden Klebefilm-Präparate angefertigt [16], [20]. Dazu wird frischer (sauberer) Klebefilm kurz auf die zu untersuchende Stelle gedrückt und anschließend sofort auf gereinigte Objektträger montiert. Zusätzlich wurden für weitere Untersuchungen Materialproben von verfärbten Bereichen entnommen [16], [20].

Bei der Herstellung der Proben zeigte sich, dass die Verfärbungen lediglich oberflächlich an und in der Farbschicht bestehen, aber nicht tiefer in das Material eindringen. Durch die mikroskopische Untersuchung der Klebefilm-Präparate konnte eine anorganische Ursache der Verfärbungen ausgeschlossen werden, da deutlich farbinkrustierte Hyphen (Pilzfäden) sowie Asco- und Konidiosporen zu erkennen sind. Die Analyse von Form und Struktur der Ascosporen legt einen Vertreter aus der Ordnung der Eurotiales, genauer aus der Gattung *Eurotium* nahe. Da die linsenförmigen Ascosporen ungeflügelt und an der Oberfläche etwas rau sind, ist das Originalmaterial in die Nähe von *Eurotium rubrum* Koenig, Spiekermann & Bremer 1901 zu stellen [11], [12], [20]. Die Gattung *Eurotium* stellt den Teleomorph (generative Hauptfruchtform) von bestimmten Arten der anamorphen Gattung *Aspergillus* (vegetative konidienbildende Nebenfruchtform) dar. Um zu klären, ob es sich bei dem untersuchten Pilz tatsächlich um *Eurotium rubrum* handelte, war eine Kultur auf Selektiv-Medien für mesophytische (in einem gemäßigten Bereich wachsende) als auch auf Medien für xerophytische (Trockenheit ertragende) Pilze notwendig. Nur auf dem Medium für xerophytische Pilze zeigte sich nach einigen Tagen Wachstum; die mikroskopische Untersuchung bestätigte die bisher vorliegende taxonomische Zuordnung.

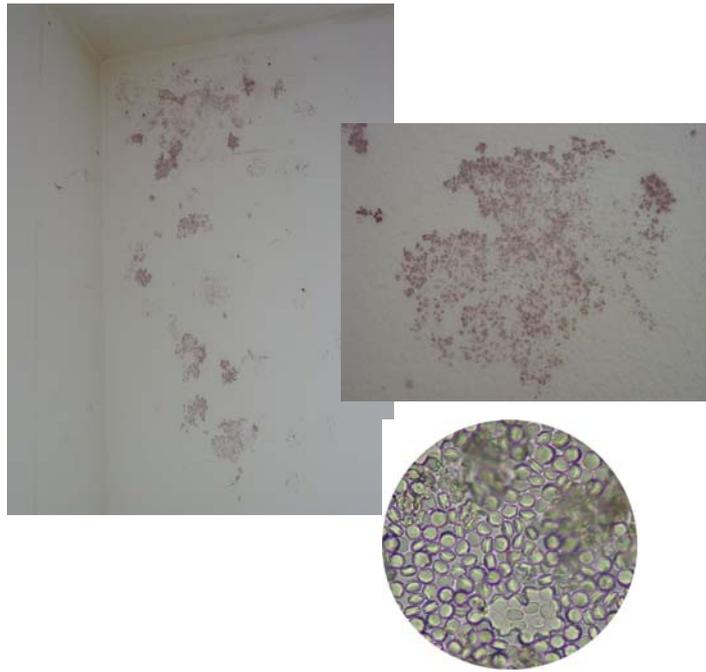


Bild 4: Fotografische Aufnahmen eines Schimmelpilzes an einer nach Westen gerichteten Außenwand eines Büros hinter einem Einbauschränk [10].

Die systematische Stellung des Pilzes *Eurotium rubrum* ist nicht ganz eindeutig. Während einige Autoren [11], [12], [20] das Taxon als selbstständige Art sehen, wird sie in [7] lediglich als Form von *Eurotium herbariorum* (Wiggers) Link ex Gray dargestellt. Unabhängig von der Einstufung ist die Bildung eines typisch orange bis roten Farbstoffes, der bei der Bildung der Kleistothecien (Fruchtkörper) von Hüllhyphen (Pilzfäden) abgegeben wird.

Eurotium rubrum gehört zu einer Gruppe von Pilzen, die auf relativ trockenen Oberflächen wachsen können (bis 30 % NaCl-Konzentration, toleriertes Wasserpotenzial -70 bis -410 bar [7]). Klinisch ist die Art (*E. rubrum*) bisher noch nicht in Erscheinung getreten, wobei nicht klar ist, ob in jedem Fall eine Unterscheidung zu *Eurotium herbariorum* (Teleomorph, *Aspergillus glaucus*, Anamorph) getroffen wurde. Die Pathogenität von *E. herbariorum* ist mit BSL1 angegeben, es sind bisher nur wenige Einzelfälle von klinischen Infektionen bekannt [7], [11].

Zusammenfassung

Der besprochene Fall von Schimmelpilzen hinter einem Schränk ist bemerkenswert, da visuell keine typische Schimmelbildung (watteartiger Belag) festzustellen war und auch olfaktorisch keine Hinweise auf unerwünschtes Pilzwachstum vorlagen. Vor allem der Kontrast durch weinrote Pigmente zum Anstrich charakterisierte der Auffälligkeit des Falles. Die Stellung von *Eurotium rubrum* im taxonomischen System wird diskutiert. Der bauphysikalische Hintergrund des aufgetretenen Befalls wird aufgezeigt.

Vergleich mit Normangaben

In den gängigen Baunormen existieren neben Angaben zur Vermeidung von Tauwasser auch Kriterien zur Beurteilung mikrobieller Aktivität. Genannt werden 80 % relative Feuchte in DIN 4108 [4] und DIN EN ISO 13 788 [6] als un-

tere Wachstumsgrenze für Schimmelpilzbildung sowie Materialfeuchtekrise-rien (z.B. 20 M.-%) für Bauprodukte aus Holz bzw. Holzwerkstoffen in DIN 68 800-2 [5]. Der 20 %-Wert bezieht sich auf holzerstörende Pilze. Vergleicht man diese beide Zahlenwerte mit den kritischen Feuchten (LIM) aus [21], so erkennt man in Bild 5, dass sich die Angaben in den Isolethensystemen für Substratgruppe II bei Temperaturen über 20 °C gut mit dem 80 %-Kriterium für Schimmelpilzbildung übereinstimmen. Der LIM für Substratgruppe I liegt etwa 4 % r.F. darunter. Bei tieferen Temperaturen bis zu 10 °C, z.B. typisch für Wärmebrücken in Altbauten, entsprechen die Normbedingungen von 20 °C Raumtemperatur und 50 % rel. Raumluftfeuchte in etwa dem LIM der Substratgruppe I. Dieser liegt nur geringfügig unterhalb des in Bild 5 angegebenen Zustandes (80 % relative Feuchte bei 12,6 °C) an einer Außenwandinnenoberfläche, ab dem mit Pilzbildung gemäß Norm gerechnet werden muss, bei 20 °C und 50 % relativer Feuchte im Raum. Bei Temperaturen von weniger als 10 °C sind die Angaben in den Normen „schärfer“. Sie würden sogar Schimmelpilzbildung im Winter an Außenbauteilen „vorhersagen“. Ebenfalls dargestellt ist in Bild 5 das in DIN 68 800-2 [5] genannte Materialfeuchte-kriterium von 20 M.-%, das sich mithilfe einer Sorptionsisotherme für Holz als relative Feuchte angeben lässt. Daraus erkennt man, dass für holzerstörende Pilze offenbar höhere relative Feuchten von etwa 90 % erforderlich sind (Bild 5).

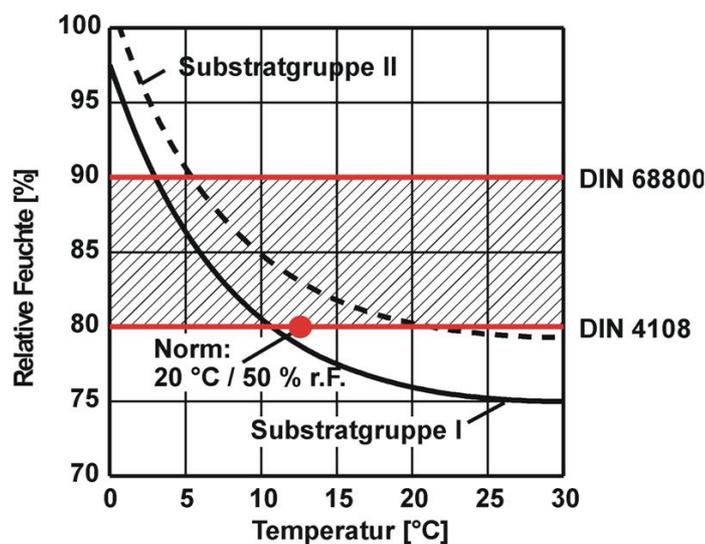


Bild 5: Vergleich der in DIN 4108 [4] als untere Wachstumsgrenze genannten relativen Feuchte von 80 % mit den LIM des Isolethensystems für Sporenauskeimung bei einer angenommenen Substratgruppe II nach [21]. Ebenfalls dargestellt ist das in DIN 68 800-2 [5] genannte Materialfeuchte-kriterium von 20 M.-%, das sich mithilfe einer Sorptionsisotherme für Holz (nicht dargestellt) als relative Feuchte von 90 % (gilt für holzerstörende Pilze) angeben lässt.

3 Algen auf Außenwänden

Flechten und Moose auf alten Denkmälern oder Gebäuden gehören zum gewohnten Erscheinungsbild und werden durchaus als „schön“ empfunden [19]. Wenn aber auf neuen Fassaden innerhalb kurzer Zeit biogene Verfärbungen auftreten, sind diese in der Regel unerwünscht [15], [19], [23].

Die auf Außenbauteilen vorkommenden Kryptogamen (niedere Pflanzen) zeichnen sich durch einige typische Merkmale aus. Ihre Verbreitungseinheiten sind Sporen oder Zellverbände, die mikroskopisch klein sind und in der Luft oder im Wasser transportiert werden. Kryptogamen sind nahezu allgegenwärtig und ein normaler Bestandteil der natürlichen Umgebung. Algen besitzen keinen nennenswerten Verdunstungsschutz und keine effektiven „Wasserleitungssysteme“ wie die höheren Pflanzen. Sie können aber effektiv Wasser aufnehmen und beinahe unmittelbar, mit nur kurzer Vorlaufzeit, als Quelle für ihre Lebensvorgänge nutzen. Eine wesentliche Eigenschaft ist somit die mehr oder minder stark ausgeprägte Austrocknungstoleranz. Dies ist auch ein wesentlicher Unterschied zu Mikroorganismen, die im Innenraum vorkommen, denn diese können eine Austrocknung in der Regel lediglich in Form von Dauerstadien (z.B. Sporen) überdauern.

Ein wesentliches Merkmal pflanzlicher Lebensformen, also auch der Algen, ist die Photosynthese. Diese Ernährungsweise wird autotroph (sich selbst ernährend) genannt. Pflanzen benötigen in der Regel keine anderen Lebewesen, auch keine Bakterien, um dauerhaft zu überleben.

Den differenzierten Voraussetzungen entsprechend ist der Bewuchs auf Außenwänden komplexer und unterschiedlicher Natur, meist kommen mehrere Arten von Algen, Pilzen etc. gemeinsam vor [19], [26]. Allen voran sind hier sogenannte aerophytische Algen, also Luftalgen, von Bedeutung [8]. Verschiedentlich wird die Ansicht vertreten, dass dieser Algenaufwuchs zu einer Schädigung des Putzsystems bzw. des Wandaufbaues führen könnte. Bis dato konnte eine derartige Schädigung aber in keinem Fall nachgewiesen werden [17]. Allerdings können Mängel in der Ausführung bzw. in der Planung der Grund für frühzeitigen Algenbewuchs sein.

In letzter Zeit häufen sich Schäden durch Algenwachstum auf Außenwänden, vor allem bei Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) [1], [13]. Da auf monolithischen Wänden wesentlich seltener Algen zu beobachten sind, liegt der Verdacht nahe, dass die Temperatur- und Feuchtebedingungen an der Außenoberfläche von WDVS das Algenwachstum begünstigen. Offensichtlich ist die Unterkühlung der Außenoberfläche durch nächtliche Abstrahlung ein bedeutender Faktor, wie die Untersuchungen von Blaich [1] in Bild 6 zeigen. Dort ist ein krasses Beispiel von „WDVS-Veralgung“ zu sehen, wobei jedoch punktförmige Bereiche zu erkennen sind, auf denen kein Wachstum stattfindet. Diese Bereiche, die mit Hilfe der Thermografie genauer analysiert wurden, sind auf Grund der Wärmebrückenwirkung der Befestigungsdübel wärmer als der Rest der Fassade. Ob an einer Oberfläche nächtliches Tauwasser auftritt und damit Algenwachstum möglich wird, hängt oftmals von einem Zehntel Grad ab, wie das untere Diagramm in Bild 6 zeigt. Deshalb ist eine sorgfältige Analyse der Oberflächenbedingungen die Voraussetzung für die Beurteilung der Wachstumswahrscheinlichkeit von Algen und Pilzen.

Zur Abschätzung der unterschiedlichen Oberflächenbedingungen bei Außenwänden wurden am IBP bereits vor einigen Jahren durchgeführte Freilanduntersuchungen im Hinblick auf die hygrothermischen Verhältnisse an den Fassadenoberflächen verschiedener Wandaufbauten neu ausgewertet [15]. Man suchte nach bauphysikalischen Lösungsmöglichkeiten. Wachstumsfördernde Temperatur- und Feuchtebedingungen an der Außenoberfläche von Wänden sind Grundvoraussetzung für den mikrobiologischen „Befall“ von Fassaden. Da Keimung und mikrobiologisches Wachstum immer eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, wird im Folgenden die periodische Befeuchtung genauer betrachtet. Dazu werden gemessene Stundenwerte von Temperatur und Feuchte über einem Zeitraum von mindestens einem Monat zeitklassifiziert gemittelt, so dass ein für diesen Zeitraum typischer Tag-Nachtzyklus entsteht. Dies wird sowohl für die in der IBP-eigenen Wetterstation ermittelten Umgebungsbedingungen als auch für die gemessenen Fassadenoberflächentemperaturen gemacht. Auf dem Freigelände des IBP wurden seit über zehn Jahren neben Außenluftbedingungen und Strahlungsdaten auch die Oberflächentemperaturen von westorientierten, rückseitig gedämmten Prüfflächen kontinuierlich erfasst, wobei die Temperaturen jeweils in der Mitte eines schwarzen und weißen Feldes direkt auf dem Anstrich gemessen werden. Eine Auswertung der mittleren Tageszyklen der Oberflächentemperatur und –feuchte des weißen Prüffeldes und der gleichzeitig gemessenen Außenluftbedingungen über einen Zeitraum von drei Jahren für die unterschiedlichen Jahreszeiten zeigt Bild 7.

Eine nächtliche Unterkühlung der Prüfflächen ist zu allen Jahreszeiten zu beobachten. Die langfristig höchste Oberflächenfeuchte bei gleichzeitig moderaten Temperaturen wird jedoch im Herbst verzeichnet. Ein Grund, warum die Wachstumsbedingungen für Algen im Herbst in der Regel günstiger als in den anderen Jahreszeiten sind.

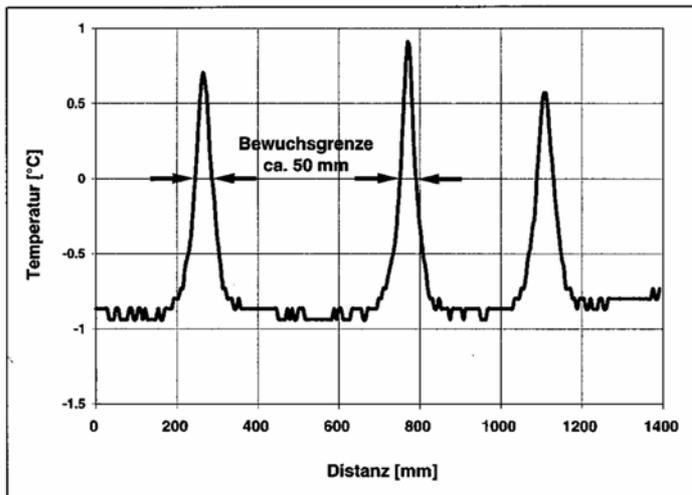


Bild 6: Fotografie (Bild oben) und Thermografie (Bild Mitte) sowie Temperaturverteilung entlang der Außenoberfläche (Bild unten) eines gedübelten Wärmedämm-Verbundsystems. Im Bereich der Dübel ist wegen deren Wärmebrückenwirkung kein Algenbewuchs festzustellen [1], [2].

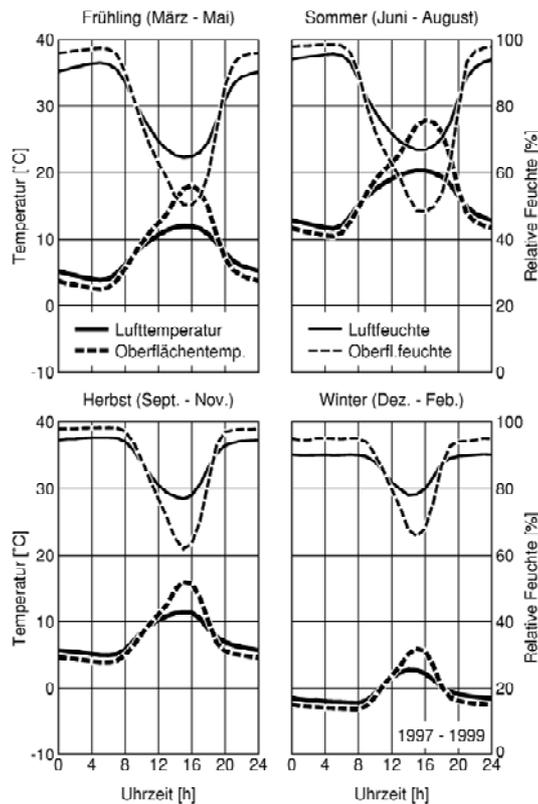


Bild 7: Mittlere Tageszyklen der gemessenen Oberflächentemperatur und der daraus ermittelten Oberflächenfeuchte (gestrichelte Linien) einer weißen Prüffläche im Vergleich zu den Außenluftbedingungen nach [14].

Inwieweit die Ergebnisse von exponierten Prüfflächen quantitativ auf die Verhältnisse an Gebäuden übertragbar sind kann durch parallele Objektmessungen beantwortet werden. Gegenstand von Untersuchungen hierzu ist ein beheiztes Testhaus im Freigelände des IBP in Holzkirchen. Die Umschließungsflächen bestehen aus unterschiedlichen Wandkonstruktionen mit ähnlichem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert). Betrachtet wird die Westwand ($U = 0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$) mit einer 80 mm dicken Außendämmung (WDVS) auf 240 mm Kalksandsteinmauerwerk sowie die nach Norden und Süden orientierten monolithischen Wandabschnitte ($U = 0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$) aus 365 mm porosiertem Leichtziegel mit weiß und rot gefärbtem Putz.

Die mittleren Tageszyklen der Außenoberflächentemperaturen, gemessen in der Mitte des WDVS und die daraus resultierenden Oberflächenfeuchten sind jeweils für den selben Zeitraum (16. Sept. bis 24. Okt. 1994) im Vergleich zu zwei monolithischen Konstruktionen unter Angabe der Außenluftbedingungen in Bild 8 dargestellt. Während bei dem westorientierten WDVS (Bild links) zur Mittagszeit höhere Oberflächentemperaturen und damit tiefere relative Feuchten im Vergleich zu den monolithischen Konstruktionen gemessen wurden, liegen nachts, bedingt durch die Abstrahlung und die geringe Wärmespeicherkapazität der relativ dünnen Putzschicht eines WDVS, die Oberflächentemperaturen etwas unter der Lufttemperatur. Erhöhte Feuchte an der

Oberfläche ist die Folge. Das bedeutet, dass die Wärme aus dem Innenraum die Außenoberflächentemperatur und damit auch -feuchte nur unwesentlich beeinflusst. Bei WDVS entsprechender Dämmschichtdicke kann deshalb von einer thermischen Entkopplung der Fassade von den Raumluftverhältnissen gesprochen werden. Die in Bild 8 Mitte gezeigten Verhältnisse an der südorientierten monolithischen Wand belegen, dass die Oberflächenfeuchte stets unter der der Luft bleibt. Auch unter Tags treten im Mittel geringe relative Feuchten von etwa 60 % an der Oberfläche der Wand auf. Bei Nordorientierung (Bild 8 rechts) liegt die Oberflächenfeuchte zwar nachts auch unter der Feuchte der Luft, tagsüber führt die große Wärmespeicherefähigkeit sowie die fehlende Einstrahlung aber zu einer gegenüber der Außenluft geringeren Oberflächentemperatur, verbunden mit einer erhöhten relativen Feuchte an der Fassade, die sich ebenfalls für Algenbildung günstig auswirken kann. Aufgrund dieser ersten Ergebnisse wird klar, dass eine pauschale Bewertung von Konstruktionen ohne Berücksichtigung des genauen Aufbaus bzw. der Ausrichtung nicht möglich ist. Um dies zu ermöglichen, werden im IBP derzeit umfangreiche experimentelle sowie rechnerische Untersuchungen durchgeführt.

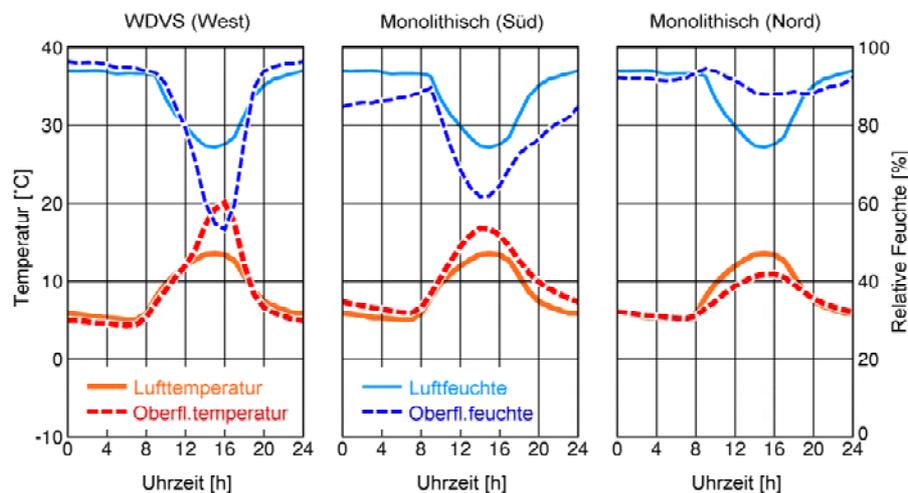


Bild 8: Mittlere Tageszyklen der gemessenen Oberflächentemperaturen und der daraus ermittelten Oberflächenfeuchten einer westorientierten WDVS-Fassade des HAMTIE-Hauses (Bild links), einer südorientierten (Bild Mitte) und nordorientierten (Bild rechts) monolithischen Konstruktion im Vergleich zu den Außenluftbedingungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bekanntlich kommt es in Innenräumen an gewissen Stellen bei ungünstigen hygrothermischen Randbedingungen zu Schimmelpilzwachstum. Die wesentlichen Einflussgrößen sind dabei die Temperatur, die Feuchte und das Substrat, wobei alle drei Parameter für gewisse Zeitperioden in einem für Pilze günstigen Bereich liegen müssen. Es werden zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen Isoplethensysteme angegeben, die für unterschiedliche Substratgruppen Temperaturen und relative Feuchten an der Bauteiloberfläche Sporenauskeimungszeiten bzw. Angaben zu einem möglichen Myzelwachstum aufzeigen. Um eine rea-

listische Bewertung der Gefahr einer Schimmelpilzbildung in Abhängigkeit von Raumgröße, Feuchteproduktion, Luftwechsel und Art der Heizung oder Kühlung durchzuführen, kann ein hygrothermisches Raummodell herangezogen werden, welches am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt wurde und derzeit validiert wird. Aus der Anwendung werden Ergebnisse erwartet, die eine Optimierung verschiedener Strategien gegen Schimmelpilzbildung, wie z.B. richtiges Heizen und Lüften bei verschiedenen Nutzungs- und Klimabedingungen, erlauben.

Die vorgestellten Daten zur Algenbildung auf Außenfassaden zeigen zwar eine bei Wärmedämm-Verbundsystemen im Vergleich zu monolithischen Wänden leicht erhöhte Außenputzfeuchte. Ob daraus generell eine stärkere Algenanfälligkeit von WDVS im Vergleich zu anderen Wandkonstruktionen abgeleitet werden kann, müssen weitere Untersuchungen zeigen, insbesondere was die Einflussfaktoren Niederschlagsbelastung und Baufeuchte angeht. Genauso wichtig sind auch eine exakte Bestandsaufnahme und ggf. gezielte Untersuchungen der biologischen Hintergründe des Algenwachstums. Dazu läuft derzeit am IBP ein umfangreiches Verbundvorhaben. Als Lösungsansätze werden neben infrarot-reflektierende Beschichtungen, unterschiedliche Hydrophobierungen der Fassade und der Einsatz wärmespeichernder Außenputze untersucht.

5 Literatur

- [1] Blaich, J.: Außenwände mit Wärmedämm-Verbundsystem, Algen- und Pilzbewuchs. Deutsches Architektenblatt 31 (1999), H.10, S.1393 - 1394.
- [2] Büchli, R. & Raschle, P.: Algen und Pilze an Fassaden. Ursachen und Vermeidung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2004), 109pp.
- [3] DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Manuskript: Vermeidung von Schimmelpilzen (Entwurfassung: 1999 - 05).
- [4] DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (2001 - 03).
- [5] DIN 68 800 – Holzschutz. Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau (1996 - 05).
- [6] DIN EN ISO 13 788 – Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchten und Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren (2001 – 11).
- [7] Domsch, K.H.; Gams, W.; Anderson, T.-H.: Compendium of soil fungi. Reprint der Ausgabe von 1980. IHW-Verlag, Eching (1993), S. 293 - 295.
- [8] Ettl, H., Gärtner, G.: Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. Gustav Fischer, Stuttgart, Jena, New York (1995).
- [9] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Sedlbauer, K.: Was wächst auf unseren Fassaden? Teil I: Algen, Flechten, Moose und Farne. Bauphysik 25 (2003), H. 6, S. 383 – 396.

- [10] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Tschakner, A.; Krus, M.; Sedlbauer, K.; Schock, T.: Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen – materialspezifische Wachstumsisoplethen. IBP-Mitteilung 32 (2005) Nr. 457.
- [11] Hoog de, G.S.; Guarro, J.; Gené, J.; Figueras, M.J.: Atlas of Clinical Fungi. 2nd edition. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht (2000), S. 476 - 477.
- [12] Klich, M. A.: Identification of Common Aspergillus Species. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht (2002), S. 52 - 53.
- [13] Klinkenberg, G. und Venzmer, H.: Algen auf Fassaden nachträglich wärmegeämmter Plattenbauten – Schadensmaß, Ursachen und Lösungen für ein Anti-Algenkonzept. FAS-Schriftenreihe (2000), H. 11, S.29 - 40.
- [14] Künzel H. M.; Krus M.; Sedlbauer K.: Algen auf Außenwänden – Bauphysik als Ursache? Bauphysik als Lösung! Tagungsband zum 3. Dahlberg-Kolloquium „Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung“, Wismar (2001), S. 75 - 84.
- [15] Künzel, H. M.; Sedlbauer, K.: Algen auf Wärmedämm-Verbundsystemen. IBP-Mitteilung 28 (2001), Nr. 382.
- [16] Landesgesundheitsamt (LGA) Stuttgart: Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. <http://www.landesgesundheitsamt.de/>
- [17] Nay, M.: Algen und Pilze an Fassaden – Forschung an der EMPA St. Gallen. Beitrag zum 4. Dahlberg-Kolloquium „Algen an Fassadenbaustoffen II“, Wismar (2003).
- [18] Reiß, J.; Erhorn, H.: Beurteilung von Feuchteschäden. IBP-Bericht WB 47/1997 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1997).
- [19] Richardson, D. H. S.: The vanishing Lichens. Their History, Biology and Importance. David & Charles, Newton Abbot, London, Vancouver (1975).
- [20] Samson, R. A.; Hoekstra, E. S.; Frisvad, J. C.; Filtenborg, O.(Eds.): Introduction to food- and airborne Fungi. Sixth Edition. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht (2002), S. 40 - 41.
- [21] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [22] Sedlbauer, K.; Gabrio, Th.: Schimmelpilze und Beurteilungsklassen zur Gesundheitsgefährdung. IBP-Mitteilung 29 (2002), Nr. 401.
- [23] Sedlbauer, K.; Krus M.: Schimmelpilzbildung auf WDVS infolge „Baufehlern“? IBP-Mitteilungen 28 (2001), Nr. 391.
- [24] Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. Bauphysik-Kalender 2003, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 435 - 531.
- [25] <http://www.vib.no/med/mic/gallery/pages/mould.html>.
- [26] Walter, W.: Vegetation und Klimazonen. Grundriß der globalen Ökologie. Eugen Ulmer, Stuttgart, sechste verbesserte Auflage (1990).