

Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht

Beurteilung durch a_w -Werte oder Isoplethensysteme?

Klaus Sedlbauer, Martin Krus

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

1. Hintergrund und Zielsetzung

Schimmelpilzbefall, insbesondere an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen hat in letzter Zeit wieder vermehrt von sich reden gemacht. Seine Beseitigung bzw. Vermeidung führt nicht nur zu erheblichen Kosten. Schimmelpilz kann auch die Gesundheit der Bewohner gefährden [12]. 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 vollständig ausgeschlossen werden. Eine Vermeidung von Schimmelpilzbildung in Gebäuden muß deshalb von den Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze ausgehen.

In [19] wurde ein Verfahren entwickelt, das die Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Basis von Isoplethensystemen ermöglicht. Diese geben temperaturabhängig eine für den Pilzmetabolismus erforderliche relative Feuchte an. In der Biologie ist dagegen als Maß für die Verfügbar-

keit von Feuchte für biologisches Wachstum die Wasseraktivität bzw. der a_w -Wert üblich. Zielsetzung dieser Veröffentlichung ist es daher, Unterschiede oder Gemeinsamkeiten der beiden Betrachtungsarten zu diskutieren, aber auch aufzuzeigen, welche Zusammenhänge zwischen Feuchte an der Oberfläche, im Baustoff und in der Raumluft bestehen und wie diese Einfluß auf eine mögliche Schimmelpilzbildung nehmen.

2. Zusammenhang zwischen Wasseraktivität und relativer Feuchte

Verschiedene Materialien bieten für Mikroorganismen die gleiche Verfügbarkeit von Feuchte bei unterschiedlichen Wassergehalten. Dies wird in der Biologie allgemein mit Hilfe der sogenannten Wasseraktivität (dem a_w -Wert) beschrieben, dessen Wert zwischen 0 und 1 liegen kann. Um zu verstehen, warum der gleiche Wassergehalt je nach Material in unterschiedlichem Maße verfügbar ist, sind die Feuchtespeichervorgänge physikalisch genauer zu betrachten.

Poröse Stoffe können in Abhängigkeit von ihrer Porenstruktur und inneren Oberfläche unterschiedliche Mengen an Wasser an sich binden. Sie stehen in stetigem Austausch mit der Feuchte der sie umgebenden Luft. Bringt man ein anfangs getrocknetes Material in eine Umgebung konstanter relativer Luftfeuchte, so nimmt dieses solange Feuchte auf bis ein Gleichgewicht entstanden ist. Bei einer Erhöhung dieser Luftfeuchte wird vom Material weitere Feuchte aufgenommen bzw. bei einer Erniedrigung abgegeben. Das Erreichen eines Gleichgewichts bedeutet, dass der Wasserdampfdruck in den Poren des Materials der gleiche ist, wie in der Umgebungsluft. Reiß [13] definiert die Wasseraktivität als Verhältnis des im Porenraum vorherrschenden Wasserdampfpartialdrucks zum der Temperatur entsprechenden Sättigungsdampfdruck. Dies stellt damit aber nichts anderes als die relative Luftfeuchte dar. Der Zusammenhang zwischen der Menge des eingelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird bei isothermen Verhältnisse durch die Sorptionsisotherme charakterisiert. Bild 1 zeigt für drei unterschiedliche Materialien (Beton, Holz und Ziegel) die Sorptionsisotherme, also deren Wassergehalt in

Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte oder gleichbedeutend dem a_w -Wert. Man erkennt, dass z.B. bei einem a_w -Wert bzw. einer relativen Luftfeuchte von 0,8 (bzw. 80 %) unterschiedliche Wassergehalte vorliegen; trotzdem ist bei allen das Wasser gleich stark gebunden bzw. in gleicher Weise für Mikroorganismen verfügbar. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass der a_w -Wert eines vorliegenden feuchten Materials nichts anderes als die an deren Oberfläche vorliegende relative Luftfeuchte darstellt:

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

mit:

φ	[%]	relative Luftfeuchte
a_w	[-]	Wasseraktivität.

3. Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen

Schimmelpilze gedeihen im Unterschied zu Algen und Flechten auch unter biologisch ungünstigeren Umgebungsbedingungen. Sie werden daher häufig als "Erstkolonisierer" bezeichnet. Im folgenden werden die unmittelbar auf den Pilzmetabolismus einwirkenden Parameter zusammengestellt. Es sollen die Grenzen aufgezeigt werden, in denen sich das Leben bzw. Überleben der Schimmelpilze abspielt. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der wesentlichen Einflußfaktoren auf das Wachstum von Mikroorganismen dargestellt.

3.1 Temperatur

Da an den Wachstums- und Entwicklungsprozessen eines Organismus eine große Anzahl biochemischer Umsetzungen beteiligt sind, ist eine Temperaturabhängigkeit der mikrobiologischen Vorgänge zu erwarten. Aus der Mykologie ist bekannt, daß Pilzwachstum vor allem in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 50 °C auftritt mit einer optimalen Wachstumstemperatur von etwa 30 °C.

Je nach Temperatur ändert sich die Biomassenproduktion. In Bild 2 erkennt man bei der in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragenen Wachstumsrate [7] ein ausgeprägtes Optimum. Demzufolge beeinflusst eine Veränderung der Temperatur den Metabolismus. Nach Strasburger [22] 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 [4].

Allerdings kann in vielen Fällen eine kleine Temperaturdifferenz von wenigen Kelvin darüber entscheiden, ob Wachstum einer bestimmten Spezies stattfindet oder nicht. Eine Übersicht des Temperaturbereichs sowie des entsprechenden Optimums einiger repräsentativer Pilze zeigt Bild 3. Man erkennt sowohl die große Bandbreite als auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Pilzen. In Tabelle 2 sind die minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstumsvoraussetzungen hinsichtlich Temperatur, relative Feuchte und pH-Wert für Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum angegeben.

3.2 Feuchte

Das entscheidende Kriterium für Keimung und Wachstum von Mikroorganismen ist das zur Verfügung stehende Wasser. Um Aussagen zu können, bei welchen klimatischen Randbedingungen mit Schimmelpilzbildung zu rechnen ist, muss bedacht werden, dass der Pilz sowohl vom Substrat als auch aus der Luft Wasser bzw. Wasserdampf entnehmen kann (z.B. [1]). Dabei wird allgemein davon ausgegangen, dass Sporen, bevor sie vollständig ausgekeimt sind und mit ihrem Myzelwachstum beginnen, die Feuchte nahezu ausschließlich aus der Luft entnehmen, da sie zunächst keinen Kontakt zum Untergrund, z.B. zu einer verputzten Wand haben. Erst nach Beginn der biologischen Aktivität, also nach vollendeter Auskeimung kann das Pilzmyzel auch Feuchte aus dem Baustoff entnehmen. Bei Schimmelpilzen muß mit einem bis zu 2 mm in das Porengefüge eines Baustoffs eindringenden Hyphengeflecht gerechnet werden.

Jede einzelne Pilzspezies besitzt ihren eigenen, charakteristischen Feuchtebereich, der ihr Leben ermöglicht und u.a. die Intensität des Wachstums bestimmt, wie die Werte in Tabelle 2 zeigen. Aus den in dieser Tabelle aufgeführten Daten läßt sich aussagen, daß die Feuchtegrenze, unterhalb der kein Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden auftritt, bei ca. 70 % relativer Feuchte liegt. Manche xerophile Pilze begnügen sich zwar schon mit einer relativen Feuchte von 65 %, aber diese Spezies treten in Gebäuden nicht auf [24]. Mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt die Wahrscheinlichkeit, daß Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei 80 % relativer Feuchte sind die Wachstumsbedingungen für fast alle Schimmelpilzarten erreicht. Bei höherer 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 ($a_w = 1,0$ bzw. $\varphi = 100\%$) ausreichende Lebensbedingungen finden [13]. Bild 4 gibt die Wachstumsrate verschiedener xerophiler Pilze in Abhängigkeit von der relativen Feuchte

bei optimaler Temperatur wider (nach [9]). Es zeigt sich, ähnlich dem Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur, auch eine deutliche Abhängigkeit des Wachstums von der Feuchte.

3.3 Kombination von Temperatur und Feuchte

Die Wachstumsvoraussetzungen, Temperatur und Feuchte, können nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sich die Lage der minimalen und optimalen Feuchten bei unterschiedlichen Temperaturen verschieben kann. Die minimalen Werte der relativen Luftfeuchte sind nur bei optimalen Temperaturen zu erreichen [18] bzw. umgekehrt. 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. 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 5 bzw. 6 zeigen beispielsweise für *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) entsprechende Darstellungen, die auf meßtechnisch ermittelten Daten beruhen [21].

3.4 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 a-

ber in Gebäuden geringere Mengen und schwerer abbaubare Nährstoffe zur Verfügung. Andererseits reichen selbst geringe organische Zusätze in Baustoffen (z.B. in Putzmörteln oder Beschichtungen) aus, um mikrobiologisches Wachstum zu ermöglichen.

Neben einigen mineralischen Substanzen bzw. Spurenelementen sind kohlenstoff- und stickstoffhaltige Nährstoffe essentiell. Mit Hilfe ihrer Enzyme können Pilze Substrate abbauen und in verwertbare Stoffe umwandeln. Liegen die Nährstoffe nicht in ausreichenden Mengen vor, führt dies zu verringertem Wachstum. Zur Anfälligkeit von Baumaterialien für Schimmelpilzbefall wurden von Gertis, Erhorn und Reiß [5SEQARABIC] umfangreiche Messungen durchgeführt. Diese Untersuchungen ergaben für den Einfluss der Nährböden, daß auch Verschmutzungen z.B. durch Staub, Fette, usw. das Wachstum entscheidend beeinflussen. Weitergehende Recherchen zeigen, daß für den Beginn des Myzelwachstums die Eigenschaften der Oberfläche entscheidend sind [5SEQARABIC] 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 dünne, aber doch relativ substratreiche Schicht zu bilden, auf der es, wenn auch etwas verzögert, zur Sporenauskeimung und erstem Myzelwachstum kommen kann.

Block [2] 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 [10] 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 Temperaturbedingungen von 10 °C bis 30 °C und einer relativen Luftfeuchte von 70 % schon 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 Wachstum in einem gut ausgebildeten Biofilm auf Baustoffen, der ggf. Nährstoffe in ausreichender Menge enthalten hat. Der Einfluß verschiedener Baumaterialien wurde auch von Ritschkoff [16] näher untersucht. In den meisten Fällen sind zur Auskeimung von Schimmelpilzen bei mineralischen Baustoffen im Vergleich zu Bauprodukten aus Holz geringfügig höhere relative Feuchten sowie längere Expositionszeiten im entsprechenden Laborklima erforderlich. Als Begründung werden die organischen Bestandteile im Holz angegeben.

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

3.5 Zeit

Die meisten Versuche zur Bestimmung der Auskeimungszeit bzw. der Wachstumsgeschwindigkeit wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Das mag für einige Industriezweige genügen (z.B. Konservierung von Lebensmitteln). Im Bauwesen unterliegen Temperatur und relative Luftfeuchte aber regelmäßigen Schwankungen. Aus bauphysikalischer Sicht ist es daher erforderlich, angeben zu können, welche Feuchtezustände wie lang und wie häufig auf ein Bauteil (z.B. eine Wandinnenoberfläche) einwirken dürfen, bevor eine Schimmelpilzbildung auftritt. Deshalb wurde von Gertis, Erhorn und Reiß [5SEQARABIC] der Einfluß von instationären Klimaverhältnissen auf das Schimmelpilzwachstum untersucht. Tabelle 3 zeigt neben den Untersuchungsergebnissen von Gertis [SEQARABIC] eine Zusammenstellung einiger Literaturangaben zur Abhängigkeit des Schimmelpilzwachstums von der Zeit sowie den entsprechenden Substraten. Die einzelnen Angaben werden im folgenden erläutert:

- Zöld benennt in [25] die Tagesstundenzahl, in der das Schimmelpilzwachstum bei Temperaturen unter 20 °C und relativen Feuchten von über 75 % beginnt. Als ungefährdeter Bereich wird derjenige bezeichnet, an dem, über einen langen Zeitraum, nicht länger als 8 bis 12 Stunden täglich die relative Feuchte von 75 % oder an dem 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 Czieielski [3] und Richter [15] 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) von Adan [1] stellt sich, wenn zunächst auch verzögert, Wachstum ein, wenn eine relative Feuchte von wenigstens 80 % an 4 Stunden täglich erreicht wird.

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

3.6 Weitere Einflußfaktoren

Es bestehen neben den genannten noch weitere Einflußfaktoren auf das Wachstum von Mikroorganismen, wie pH-Wert, Licht, Sauerstoffgehalt, Oberflächenbeschaffenheit und evtl. Konzentration wachstumshemmender Chemikalien. Zusammenfassend können diese wie folgt beurteilt werden:

pH-Wert

Der pH-Wert stellt für die Beurteilung der Qualität von Nährböden ein weiteres Kriterium der Schimmelpilzbildung dar. Bild 7 zeigt dazu die Bandbreite dieses Einflußfaktors für unterschiedliche Schimmelpilze auf Basis der Daten in Tabelle 2. Während der optimale Wachstumsbereich bei pH-Werten zwischen 5 und 7 liegt, werden insgesamt pH-Werte zwischen 2 und 11 von vereinzelt Pilzen toleriert [4]. Die meisten Spezies wachsen in einem Bereich zwischen 3 und 9. Tapeten und Anstriche weisen beispielsweise einen pH-Wert zwischen 5 (z.B. Rauhfasertapete) und 8 (z.B. Kunstharz-Dispersionsanstrich) auf. Andererseits können kalkhaltige Baustoffe, wie zum Beispiel Putzmörtel oder Beton, pH-Werte

kalkhaltige Baustoffe, wie zum Beispiel Putzmörtel oder Beton, pH-Werte von mehr als 12 besitzen; trotzdem kann Schimmelpilzwachstum auf diesen Materialien nicht ausgeschlossen werden, da es nur auf den pH-Wert des zur Verfügung stehenden Nährbodens ankommt. Dieser Nährboden ist aufgrund von Staubablagerungen in ausreichender Menge auf fast allen Bauteiloberflächen vorhanden.

Licht

Licht ist für das Wachstum der Schimmelpilze nicht erforderlich; dies erkennt man daran, daß auch im Inneren opaker Bauteile Pilzbildung auftritt. Zu hohe Einstrahlung von Sonnenlicht wirkt vor allem aufgrund seines UV-Anteils eher wachstumsbeeinträchtigend. Einige Pilze wirken dem durch Einlagerung von Pigmenten wirksam entgegen (Schwärzepilze).

Sauerstoffgehalt

Der Sauerstoffgehalt muß mindestens 0,25 % betragen [13]. Diese Konzentration liegt auf und in allen Baukonstruktionen vor. Unter diesem Wert können einige der aeroben Pilze sogar auf Gärung umstellen [4]. 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, da neben der Oberflächenstruktur auch deren Adhäsionswirkung eine Rolle spielt. Daher ist es schwierig, die Rauigkeit als Wachstumsvoraussetzung zu quantifizieren. Häufig wird in Zusammenhang mit Rauigkeit die Porosität bzw. Porenradialverteilung von Baustoffen als Einflußgröße genannt. Deren Wir-

kung beruht aber ausschließlich auf der Möglichkeit der Feuchtespeicherung im Material.

4. Isoplethenmodell

Es hat sich gezeigt, daß die drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen „Temperatur, Feuchte und Substrat“ über eine bestimmte Zeitperiode simultan vorhanden sein müssen, damit Schimmelpilzsporen keimen und anschließend das Myzel wachsen kann. Das Isoplethenmodell ermöglicht auf der Basis von Isoplethensystemen die Ermittlung der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums, wobei auch der Substrateinfluß bei der Vorhersage der Schimmelpilzbildung berücksichtigt wird [19]. 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 Sporenskeimung Auskeimungszeiten (Bild 5), im Falle der Beschreibung des Myzelwachstums Wachstum pro Zeiteinheit (Bild 6) darstellen.

4.1 Isoplethensysteme

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich bei den Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemein gültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten und gesundheitsbeeinträchtigend sein könnten. Für diese etwa 200 Spezies sind quantitative Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte zusammengestellt worden [19]. Die in den Bildern 8 und 9 gezeigten Isoplethensysteme berücksichtigen die Wachstumsvoraussetzungen aller dieser Pilze, für die ausreichende Literaturdaten zur Verfügung standen. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen möglicher Pilzaktivität werden LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt. Die oberen Isoplethensysteme in den Bil-

den 8 und 9 zeigen die Wachstumsvoraussetzungen für optimalen Nährboden. 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 in [19] eine Definition von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); diese Isoplethensysteme besitzen daher die anspruchslosesten Wachstumsvoraussetzungen, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die absolute Wachstumsgrenze (Bilder 8 und 9 oben).

Substratgruppe I: Biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material,

Substratgruppe II: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

Ein eigenes Isoplethensystem wird für diese Substratgruppen erstellt, wobei für die Substratgruppe 0 die Isoplethen für optimalen Nährboden gelten. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets die Substratgruppe I zugrunde gelegt werden. Mithilfe dieser Isoplethensysteme können für Angaben der Temperatur und relativen Feuchte entweder die Sporenauskeimungszeiten oder das Myzelwachstum ermittelt werden, wie im folgenden an einem Beispiel erläutert wird.

4.2 Funktionsweise des Isoplethenmodells anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels

Um einen Vergleich der biologischen Wachstumsvoraussetzungen mit den errechneten hygrothermischen Bedingungen zu ermöglichen, müssen auf Basis des Isoplethenmodells die ermittelten instationären Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte in der Bauteiloberfläche mit den Angaben der Sporenauskeimungszeiten bzw. des Myzelwachstums in den entsprechenden Isoplethensystemen verglichen werden. Die Wachstumsbedingungen, welche durch die zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte charakterisiert werden, dienen als Eingangsdaten. Man trägt diese Mikroklima-Randbedingungen als Stundenwerte in die Isoplethensysteme ein. Liegen die Wachstumsbedingungen für eine bestimmte Zeitdauer oberhalb der entsprechenden LIM-Kurve, kann es je nach Substratgruppe zu Schimmelpilzaktivität kommen.

In der Regel treten aber instationäre Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf. Um diese Verläufe, 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 liefert, nämlich $1 \text{ Stunde} / (4 \text{ (Tage)} \cdot 24 \text{ Stunden}) = 0,01$. 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 einem in [14] beschriebenen Schadensfall wurde im Schlafzimmer einer Wohnung im 1. Obergeschoß an der nordöstlichen Außenwand eines

im Jahr 1955 gebauten und 1993/94 sanierten Gebäudes Schimmelpilzbefall hinter einem Einbauschränk festgestellt. Die innere und äußere Oberflächen- sowie Lufttemperatur wurde während einer kalten Periode über eine längere Zeitspanne gemessen und ausgewertet. Des Weiteren war die relative Feuchte im Schlafräum meßtechnisch erfaßt worden. In Bild 10 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. Nur hinter der Möblierung ergibt sich 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. Das Myzelwachstum wird dazu in analoger Weise auf Basis der entsprechenden Isoplethensysteme ermittelt. Liegt ein Stundenwert im Isoplethensystem beispielsweise im Bereich von 6 mm Wachstum pro Tag, so bedeutet dies, daß der Pilz im betrachteten Stundenzeitraum um 6 mm pro 24 Stunden, also um 0,25 mm pro Stunde wächst. Es erfolgt auch hierbei wieder die Bildung eines Summenwertes, der, für den Beispielfall eines Pilzbefalls im Innenraum, in der oberen Graphik des Bildes 10 dargestellt wird. In der Raumecke wird durch kurzzeitig vorhandene gute Wachstumsbedingungen die Sporenauskeimung erreicht, es kommt allerdings zu keinem nennenswerten Myzelwachstum. Dies ist hinter einer Möblierung anders. Dort wird ein großflächiger Pilzbefall prognostiziert, was auch in der Realität beobachtet werden konnte.

Das vorgestellte Isoplethenmodell kann zwar eine durch Trockenperioden auftretende Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen, bietet aber dennoch eine einfach handhabbare Möglichkeit einer Bewertung möglicher Schimmelpilzbildungen. Um auch Austrocknungseffekte von Pilzsporen beschreiben zu können, wurde in

[19] das bereits erwähnte, auf dem Isoplethenmodell aufbauende, bio-hygrothermische Verfahren entwickelt, auf das in [20] näher eingegangen wird.

5. Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen

Bei Bauprozessen beschäftigen sich Gerichte häufig mit den 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 die Wachstumsvoraussetzungen erfüllt sind. Feuchte spielt dabei die wesentliche Rolle. Es ist bekannt (u.a. [23]), daß Feuchte- und Schimmelpilzschäden vor allem hervorgerufen werden durch:

- ungenügendes Wärmedämmniveau,
- Wärmebrücken,
- erhöhte Wärmeübergangswiderstände,
- unzureichende Beheizung,
- erhöhte Feuchteproduktion in Innenräumen,
- mangelhaftes Lüftungsverhalten der Bewohner,
- Schlagregenpenetration,
- sowie Baufeuchte in Konstruktionen.

Im folgenden soll dargestellt werden in welcher Weise die aufgezählten Einflussgrößen das Schimmelpilzwachstumsrisiko beeinflussen. Eine Grundvoraussetzung zum Verständnis der ablaufenden Mechanismen ist die Kenntnis des Einflusses der Oberflächentemperatur auf die Oberflächenluftfeuchte in Abhängigkeit der Raumluftklimarandbedingungen.

Anhand des Zustandsdiagramms von Luft in Bild 11 lassen sich die ablaufenden Vorgänge anschaulich und leicht verständlich erläutern. Dargestellt sind die in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Luft (Ordinate) und der Temperatur (Abszisse) vorliegenden relativen Luftfeuchten (in %). Die Luft in einem Raum mit beispielsweise 22 °C und einem Wassergehalt von 10 g/m³ besitzt eine relative Luftfeuchte von 50 % (Punkt A). Hat die Innenwandoberfläche ebenfalls 22 °C, werden auch dort 50 % Luftfeuchte vorliegen. Gerade im Winter wird aber aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen die innerseitige Oberflächentemperatur abgesenkt (für dieses Beispiel sei eine Oberflächentemperatur von 15 °C angenommen; siehe dazu auch Ziffer 5.2), wogegen durch die Raumheizung die Innenlufttemperatur auf 22 °C konstant gehalten wird. In Wandoberflächennähe ist aber weiterhin der absolute Wassergehalt der gleiche wie in Raummitte (in diesem Beispiel weiterhin 10 g/m³). Das bedeutet: Bei Annäherung an die Wand ändert sich der Zustand der Luft, wie in Bild 11 dargestellt, parallel zur Abszisse bis zum Punkt B. Man erkennt, dass in Wandnähe somit eine höhere Luftfeuchte von 80 % vorliegt, was für das Schimmelwachstum günstigere Voraussetzungen bringt. Eine weitere Abkühlung der Wandinnenoberfläche würde unter diesen Bedingungen das Erreichen des Taupunktes (bei ca. 11°C; Punkt C) bedeuten. Bei Unterschreitung dieser 11°C läuft der Zustand der Luft entlang der Sättigungslinie (bis z.B. zu Punkt D), d.h. der Wassergehalt der Luft muss abnehmen, da ansonsten relative Luftfeuchten über 100 % erreicht würden. Die Folge ist, dass an der kühlen Oberfläche Tauwasser ausfällt.

5.1 Einfluss des Dämmniveaus

Das Auftreten von Schimmelpilzen auf der Raumseite von Baukonstruktionen hängt von der sich einstellenden Oberflächentemperatur sowie -feuchte ab. Diese werden wiederum beeinflusst vom Wärmedurchgangskoeffizienten 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/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
R_{si}	[(m ² K)/W]	Wärmeübergangswiderstand innen

Das Dämmniveau, das mit Hilfe des U-Wertes charakterisiert wird, beeinflusst maßgeblich die Oberflächentemperatur an der Innenwand und damit die dort vorliegende relative Luftfeuchte. Eine schlechte Wärmedämmung bzw. ein hoher U-Wert bewirkt niedrige Oberflächentemperaturen und mit der damit verbundenen Erhöhung der Luftfeuchte hohe Schimmelpilzgefahr.

5.2 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Stellen in den Umfassungsflächen eines Gebäudes, durch die nach außen ein größerer Wärmeabfluß als in den angrenzenden Bereichen stattfindet, was zu einer Erniedrigung der inneren Oberflächentemperatur führt. Sie können durch die geometrischen Verhältnisse bedingt sein (z.B. Ecken) oder durch die Aneinanderreihung von Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Tragpfeiler in einer Wand) (siehe Bild 12). Die Folgen von Wärmebrücken sind (neben den höheren Energieverlusten) ein Absinken der Temperatur, eine Erhöhung der Feuchte (Bild 11) an der Innenoberfläche und die Gefahr der Unterschreitung der Taupunkttemperatur und damit einer Schimmelpilzbildung.

Dieser Effekt wird in Bild 13 am Beispiel einer Außenwanddecke veranschaulicht. 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 $0,5\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ sowie von $1,0\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ im Bereich der Pfosten und die daraus resultierenden maximal erlaubten Raumlufftfeuchten, bei deren Überschreitung bei Annahme einer Raumluffttemperatur 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.

5.3 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 hinter den Gardinen einstellenden niedrigeren Temperaturen. In Bild 14 sind die Oberflächentemperaturen einer Außenecke mit Durchschnitts- 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 Raumlufftfeuchte, 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 [17] folgende Wärmeübergangswiderstände vorgeschlagen:

Einbauschränke: $R_{si} = 1,0\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Freistehende Schränke: $R_{si} = 0,5\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ und

Gardinen:

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

5.4 Unzureichende Beheizung

Bei gleichem absolutem Wassergehalt wird die relative Luftfeuchte durch eine Erhöhung der Raumlufthtemperatur erniedrigt (siehe auch Bild 1) und die Innenoberflächentemperatur erhöht, was die Schimmelpilzgefahr vermindert. Ungünstig sind natürlich Wohnungen mit einzelnen unbeheizten Zimmern (meist Schlafzimmer). In diesen Räumen liegt eine niedrigere Raumlufth- und damit Oberflächentemperatur vor, verbunden mit einer hohen Oberflächenluftfeuchte.

5.5 Feuchteproduktion im Raum

Die sich an Innenoberflächen von Außenbauteilen einstellende relative Feuchte hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raumlufth und Oberfläche ab, sondern auch maßgeblich von der Feuchteproduktion im Wohnraum. Eine hohe Feuchteproduktion im Wohnraum führt bei gleicher Lüftung zu höheren Raumlufthfeuchten und damit gekoppelt auch zu höheren Innenraumoberflächenfeuchten. In Tabelle 4 sind typische Feuchteabgabemengen in Wohnräumen aufgelistet. Daran läßt sich erkennen, in welcher Weise die Feuchteproduktion in Gebäuden durch die Bewohner beeinflußt werden kann. Es verwundert nicht, daß Schimmelpilzbefall vor allem dann auftreten kann, wenn Fenster erneuert wurden, aber keine wärmetechnische Fassadensanierung erfolgte. Dabei kommt es durch die Reduktion des Luftwechsels aufgrund höherer Dichtheit der Fensterfugen zu erhöhten Feuchtelasten in den Räumen, da meist das Lüftungsverhalten nicht verändert wird. Auch wenn die Fensterindustrie moderne Fenster mit hoher Fugendichtheit herstellen kann, muß im geschlossenen Fensterzustand ein gewisser Grundluftwechsel möglich sein.

5.6 Lüftung

Die Lüftung des Wohnraumes stellt das wirksamste Mittel dar, um Feuchte aus dem Raum abzuführen. Vor allem im Winter enthält die Außenluft trotz hoher relativer Feuchte eine geringe absolute Feuchte. Bei Winterlüftung wird die relative Feuchte im Raum erniedrigt. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Tabelle 5 zeigt bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen und einer typischen relativen Außenluftfeuchte von 80 % die entsprechenden relativen Feuchten der Raumluft, wenn sie z.B. nach der Lüftung auf jeweils 20 °C erwärmt wird. Bei –10 °C außen werden nach der Lüftung innen 9 % relative Feuchte erreicht.

Charakteristische Größe für den Luftwechsel 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 CO₂-Konzentration). Die hierbei geforderten Angaben variieren stark und liegen zwischen 0,3 h⁻¹ und 1,3 h⁻¹. [8] gibt zur Verhinderung von Schimmelpilzbildung Luftwechselzahlen von 0,15 h⁻¹ bis 0,70 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 erreicht. Vor allem nach kurzen Feuchtelastspitzen sollte durch Fensteröffnen gelüftet werden, um eine akkumulierende Feuchteaufnahme durch sorptive Innenoberflächenmaterialien zu vermeiden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Adan, O.: On the fungal defacement of interior finishes. Dissertation, University of Technology, Eindhoven (1994).
- [2] Block, S. S.: Humidity requirements for mold growth. Applied Mi-

crobiology 1 (1953), H. 6, S. 287 - 293.

- [3] Cziesielski, E.: Schimmelpilz – ein komplexes Thema. Wo liegen die Fehler? wksb – Zeitschrift für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz 44 (1999), H. 43, S. 25 - 28.
- [4] Deacon, J. W.: Modern mycology. 3. Auflage, Blackwell Science-Verlag (1997).
- [5] Gertis, K.; Erhorn, H.; Reiß, J.: Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden. Proceedings Bauphysik-Kongreß in Berlin (1999), S. 241 - 253.
- [6] Gertis, K.; Mehra, S. R.: Bauphysik, Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2001).
- [7] 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.
- [8] Hartmann, T.: Bauphysikalische und hygienische Aspekte der Wohnungslüftung. HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik Bd. 51 (2000), H. 7, S. 59 - 61.
- [9] 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).
- [10] 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.

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

- [12] Mücke, W.; Lemmen, C.: Schimmelpilze. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (1999).

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

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

- [15] Richter, W.: Verhinderung der Schimmelpilzbildung – welche Möglichkeiten bietet die Fensterlüftung? Vortrags-Manuskript, Rosenheimer Fenstertage 14. - 15. Okt. 1999, S. 89 - 98.

- [16] 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.

- [17] Rudolphi, A.; Kirchner, D.: Ökologische und gesundheitsorientierte Baustoff- und Konstruktionsauswahl. Moriske, H.-J.; Turouski, E. (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. ecomed-

Verlag, Landsberg am Lech (2000), 3. Erg. Lfg., Kap. IV-7.1, S. 12 - 24.

- [18] Schwantes, H. O.: Biologie der Pilze, Eugen Ulmer-Verlag, Stuttgart (1996).
- [19] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [20] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen – Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 167 – 176.
- [21] 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.
- [22] Strasburger, E.: Lehrbuch der Botanik. 31. Auflage, Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart (1978).
- [23] T 2914: Gewährleistung einer guten Raumlufthqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. Fraunhofer-IRB Verlag, Stuttgart (Jan. 1999).

- [24] Zillig, W.: Hygrothermisches Modell zur rechnerischen Vorhersage des Schimmelpilzbefalls. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim (2001).
- [25] Zöld, A.: Mindestluftwechsel im praktischen Test. HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik Bd. 41 (1990), H. 7, S. 620 - 622.

Tabelle 1: Wesentliche Einflußfaktoren für das Auskeimen und Wachstum von Schimmelpilzen mit Angaben des minimalen und maximalen Wachstumsbereichs nach [19].

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

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

2) Der pH-Wert kann vom Pilz beeinflusst werden.

Tabelle 2: Angabe der minimalen, optimalen sowie maximalen Wachstumsvoraussetzungen für einzelne Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur, relativer Feuchte und pH-Wert bzgl. Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum nach [19].

Pilzspezies	Wachstumsvoraussetzungen												
	Temperatur [°C]						relative Feuchte [%]				pH-Wert [-]		
	Sporenauskeimung			Myzelwachst.			Sporenk.		Myzelw.				
	min.	opt.	max.	min.	opt.	max.	min.	opt.	min.	opt.	min.	opt.	max.
<i>Asp. flavus</i>	10	30	45	6	40	45	80	100	78	98	2,5	7,5	>10
<i>Absidia corymbifera</i>					35	45					3		8
<i>Absidia glauca</i>				-8	30	43			70				
<i>Alternaria alternata</i>	3	35	37	-2	30	32	84		85	98	<2,7	5,4	>8
<i>Asp. amstelodami</i>	5	35	43	7	33	42	70	90	71	100			
<i>Asp. candidus</i>	10	35	45	3	32	57	70	95	74	90	2,1		7,7
<i>Asp. fumigatus</i>	10	40	50	10	43	57	80	97	82	97	3	6,5	8
<i>Asp. nidulans</i>	10	37	50	6	40	48	75	95	78	97			
<i>Asp. niger</i>	10	35	50	6	37	47	77	98	76	98	1,5		9,8
<i>Asp. ochraceus</i>					32				77	95	3	6,5	10
<i>Asp. parasiticus</i>				10	37				82		2	6,5	10,5
<i>Asp. penicillioides</i>				5	25	37							
<i>Asp. restrictus</i>	10	28		10	28		73	95	71	90			
<i>Asp. ruber</i>	5	30	42	4	27	38	70	90	71	93			
<i>Asp. terreus</i>	14	40	50	11	40	47	75	99	77	97			
<i>Asp. versicolor</i>	8	30	42	4	30	40	74	91	75	95			
<i>Aureobasidium pullulans</i>				2	25	35			88				
<i>Botrytis cinera</i>				-3	21	36			93				
<i>Chaetomium globosum</i>					35								
<i>Chrysosporium fastidium</i>							69	93	72	92			
<i>Cla. cladosporioides</i>				-5	28	32	85		84	96	3,1		7,7
<i>Cla. sphaerosperum</i>					25				82				
<i>Eurotium herbariorum</i>					30	40	73		75	96			
<i>Fusarium culmorum</i>	3	25	37	0	25	31	87		90				
<i>Fusarium oxysporum</i>				5	30	37			90		2		9
<i>Fusarium solani</i>									90				
<i>Mucor plumbeus</i>				4	25	35	93		93	98		7	
<i>Paecilomyces lilachinus</i>					35	60	84		84				
<i>Pen. brevicompactum</i>	5	25	32	-2	25	30	78		75	96			
<i>Pen. chrysogenum</i>				-4	28	38	78		79	98			
<i>Pen. citrinum</i>							84		80		2	5,5	10
<i>Pen. cyclopium</i>	5	25	33	2	25	37	80	97	80	98	2		10
<i>Pen. expansum</i>	<0			-3	26	35	82		82	95			
<i>Rhizopus stolonifer</i>	1,5	28	33	10	26	37	84		92	98			<6,8
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>				5	30	37			85	94		9,5	
<i>Stachybotrys atra</i>	5	25	40	2	23	37	85	97	89	98			
<i>Trichoderma viride</i>				0	28	37				99			
<i>Trichothecium roseum</i>	5			15	25	35	90		86	96			
<i>Ulocladium sp.</i>									89				
<i>Wallemia sebi</i>		30		5	30	40	69		70				

Tabelle 3: 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	keine Angabe	⁴⁾	3	verschiedene Materialien	[10]
		12	5		[15]
80		6			[25]
		12	täglich		Gipskarton
					[1]
95	14	< 24	6 Wochen	Putze und Anstriche ohne Verschmutzung	[5SEQARABIC]
	18,5	6			
	14	< 24		Putze mit leichter Verschmutzung	
		6			
	18,5	1		Dispersionsfarbe, Gipskarton und Raufasertapete 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.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Feuchteabgabe in Räumen bei einer Innenlufttemperatur von 20°C nach [19].

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) Gramm pro Quadratmeter und Stunde, je nach Umgebungsbedingungen.

Tabelle 5: Relative Innenluftfeuchte bei unterschiedlichen Aussenlufttemperaturen durch Erwärmen auf 20 °C von 80 % feuchter Aussenluft bei jeweils gleichbleibender absoluter Feuchte.

Aussenlufttemperatur [°C]	Relative Feuchte aussen [%]	Absolute Feuchte ¹⁾ [g/m ³]	Relative Innenluftfeuchte bei 20 °C [%]
-10	80	1,7	9
0		3,9	21
10		7,5	42
20		13,5	80

1) Absolute Feuchte ist aussen und innen gleich.

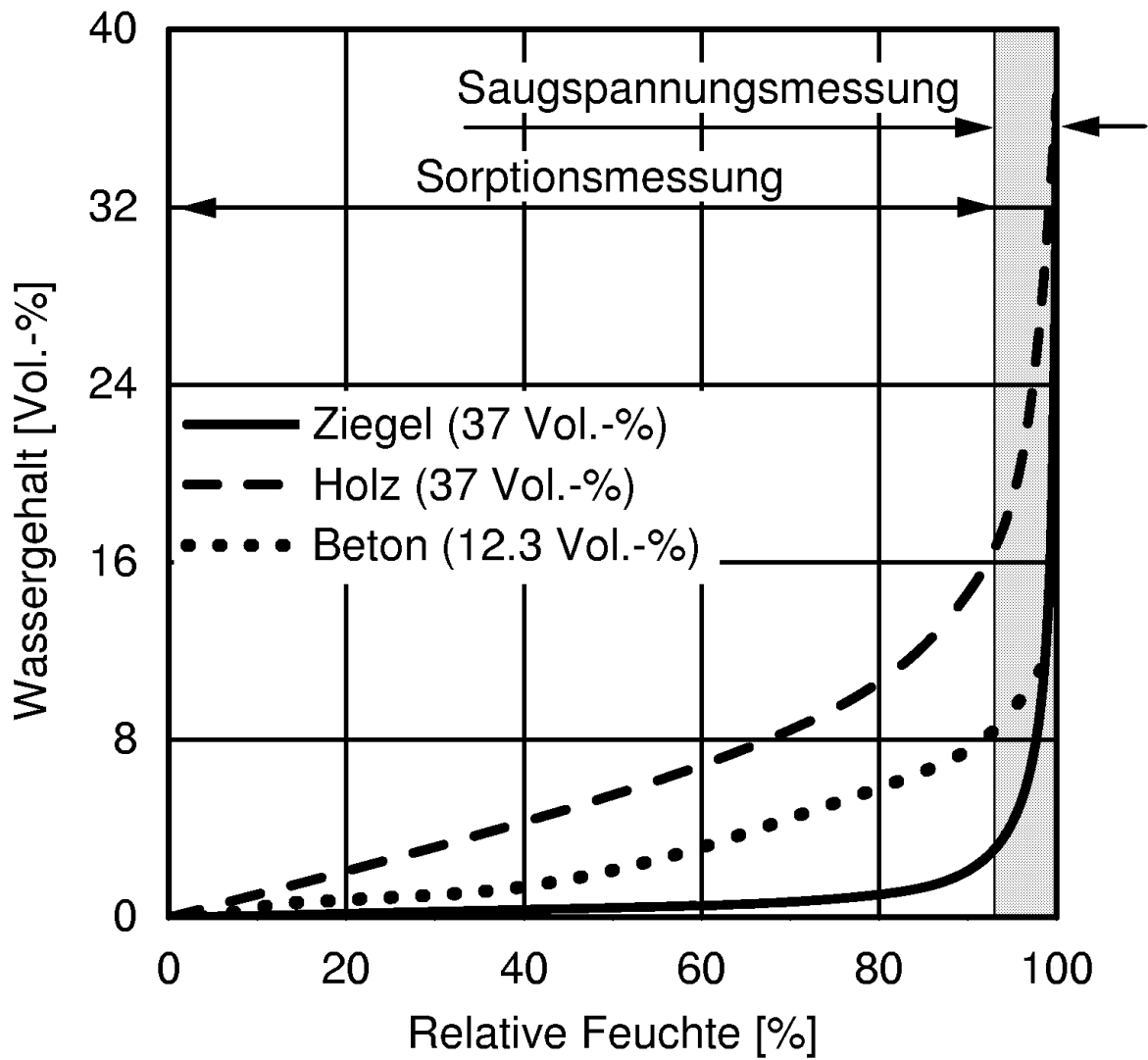


Bild 1: Typische Feuchtespeicherfunktionen für schwach (Ziegel), mäßig (Beton) und stark (Holz) hygroskopische Baustoffe. Die Feuchtespeicherfunktion kann bis 95% r. F. über sorptionsmessungen bestimmt werden, darüber wird sie über Saugspannungsmessungen ermittelt [11].

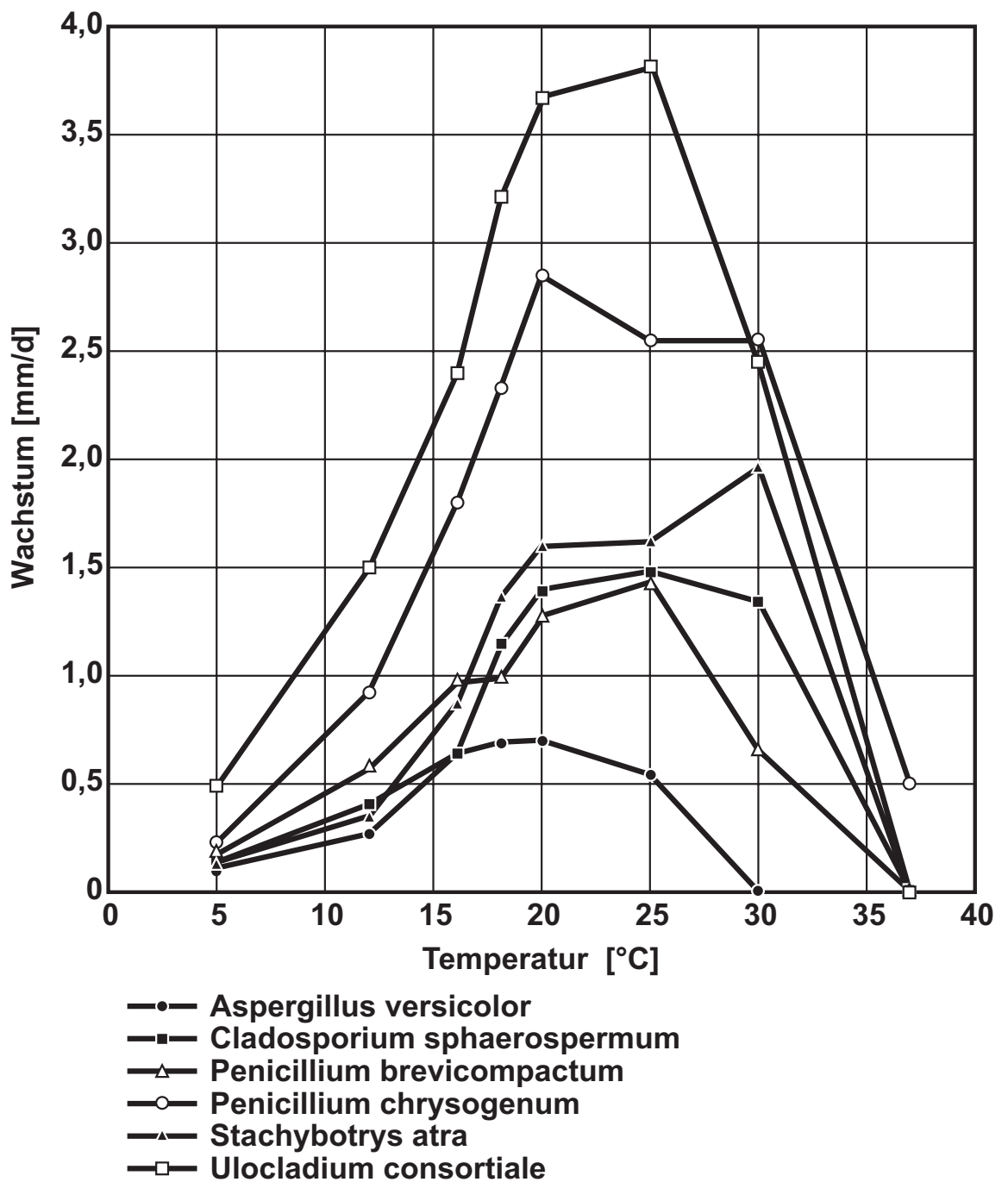


Bild 2: Wachstumsraten verschiedener Schimmelpilze in Abhängigkeit von der Temperatur nach Grant [7].

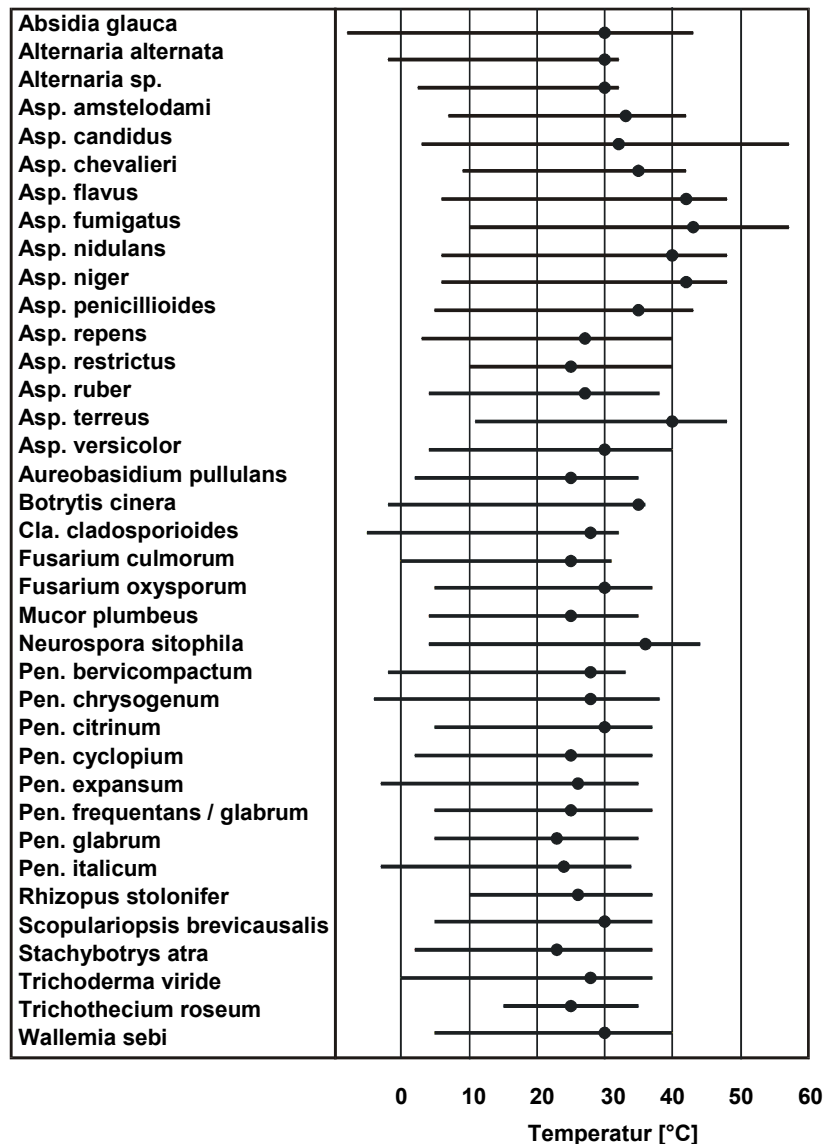


Bild 3: Schematische Darstellung des Temperaturbereichs für das Vorkommen verschiedener Schimmelpilze nach [19]. Die Optima sind jeweils durch Punkte gekennzeichnet. Die Abkürzungen bedeuten:

- Asp.: *Aspergillus*
- Cla.: *Cladosporium*
- Pen.: *Penicillium*
- sp.: Spezies.

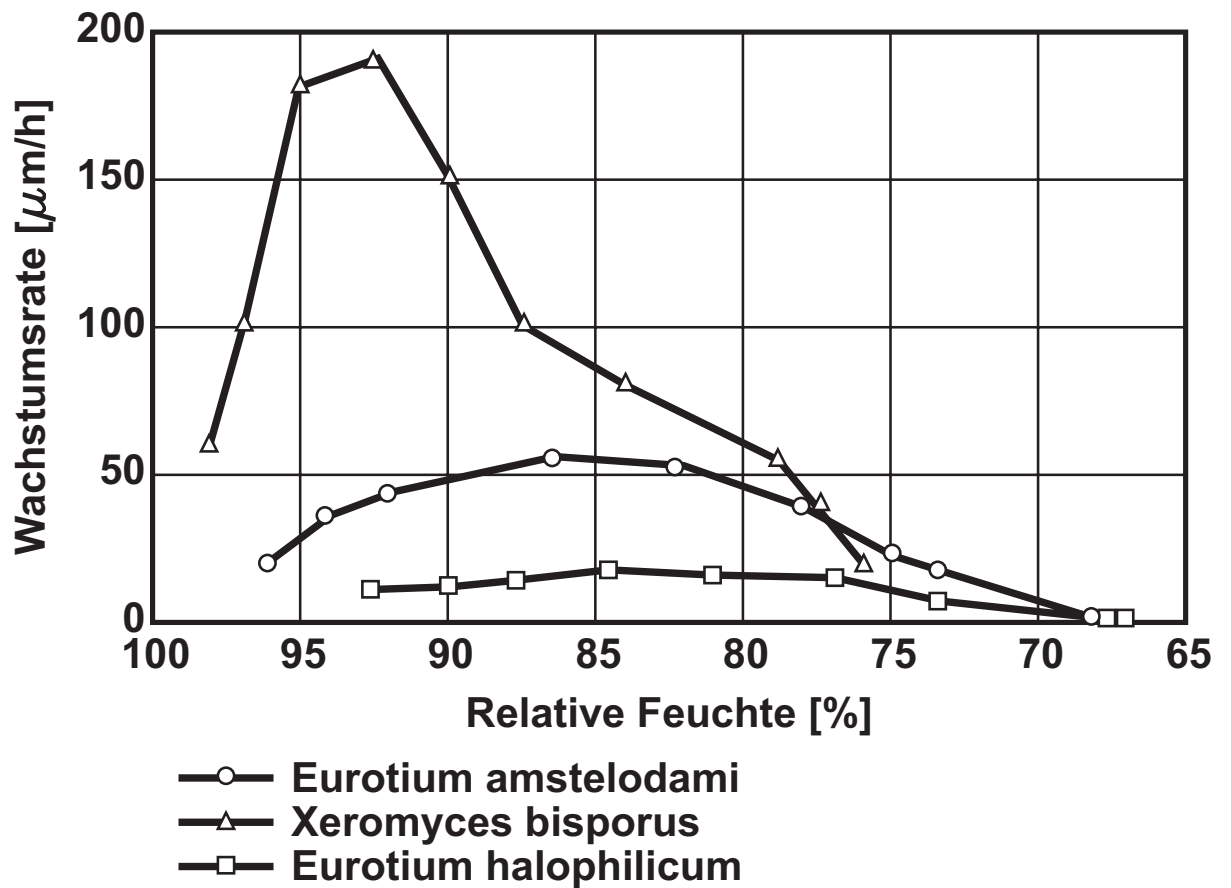


Bild 4: Wachstumsraten dreier xerophiler Pilze in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte auf einem Nährboden aus Glucose und Fructose bei 25 °C nach Hocking [9].

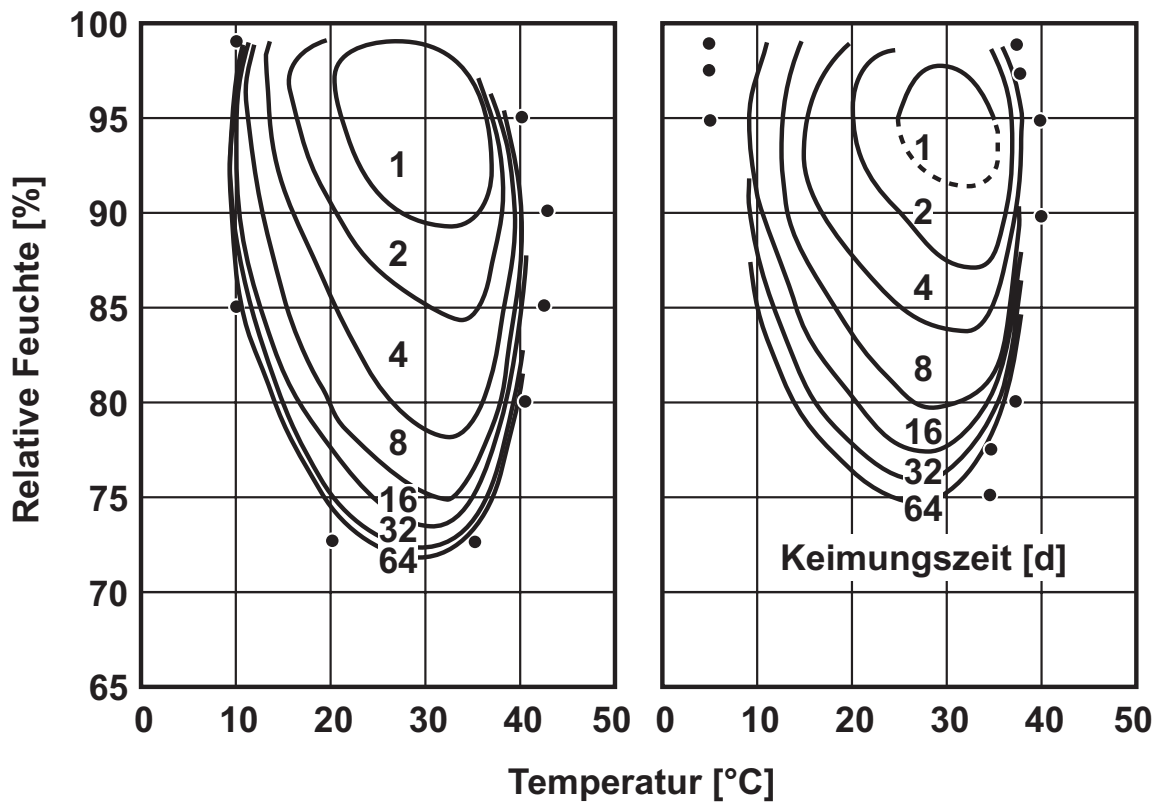


Bild 5: Isoplethensysteme für Sporenauskeimung der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) nach Smith [21]. Die Isolinien geben in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte die Keimungszeiten in Tagen an (eingetragene Zahlenwerte). Die Punkte zeigen Bedingungen, bei denen nach 95 Tagen noch keine Keimung stattgefunden hatte.

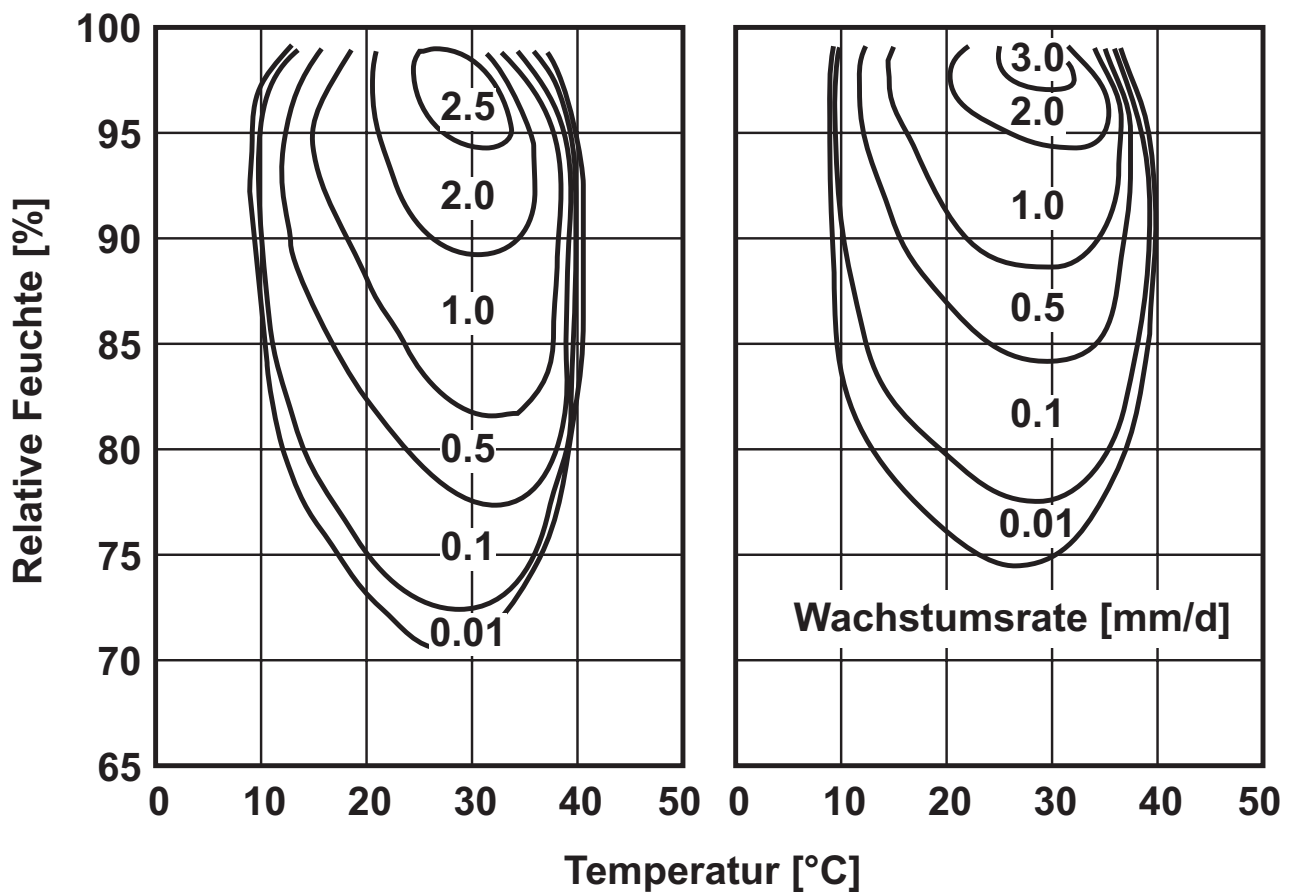


Bild 6: Isoplethensysteme für Myzelwachstum der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte nach Smith [21]. Die Zahlen an den Isolinien kennzeichnen die Wachstumsraten in mm/d.

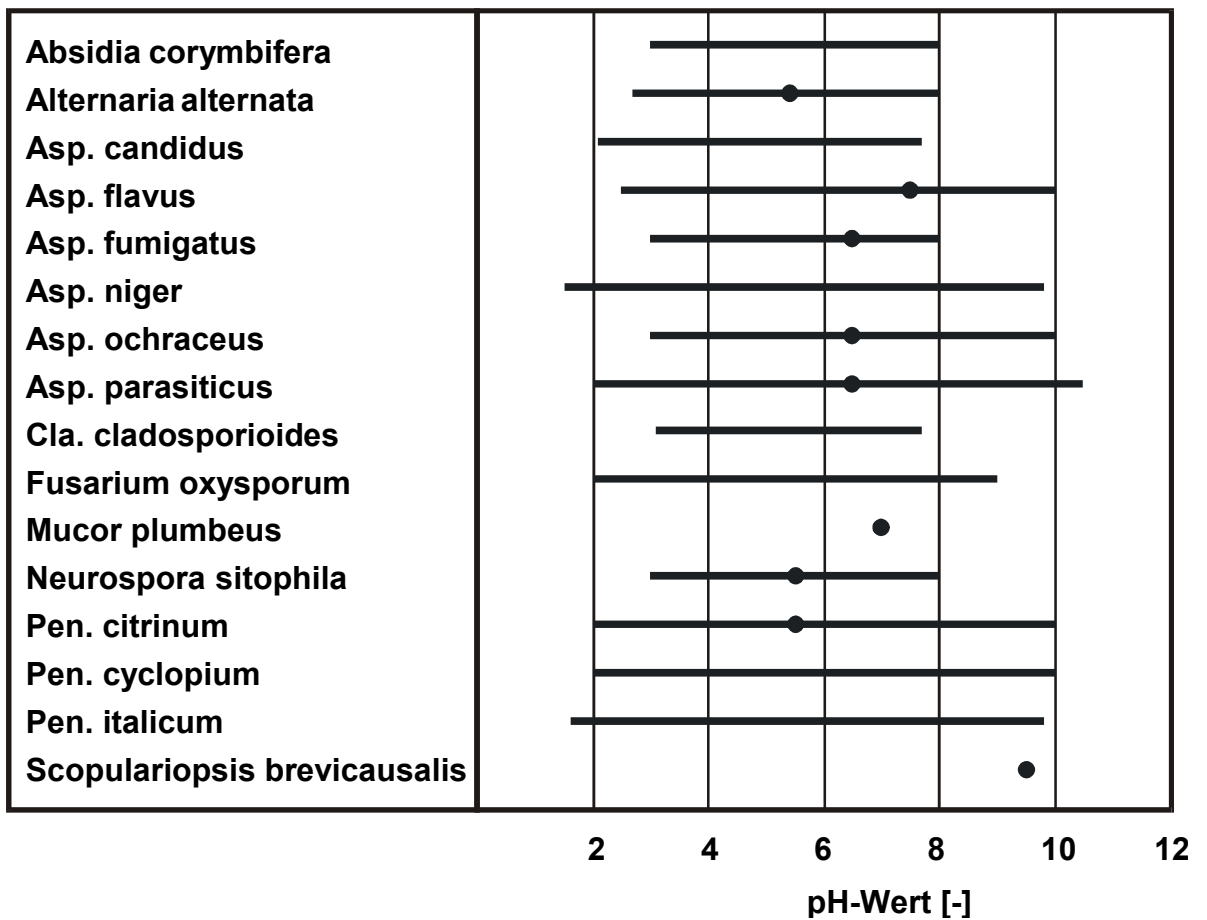


Bild 7: Schematische Darstellung des pH-Wertbereichs für Schimmelpilze an besiedelten Materialoberflächen gemäß Literaturlauswertung in Tabelle 2 für repräsentative Schimmelpilze. Die Optima sind jeweils durch Punkte gekennzeichnet.

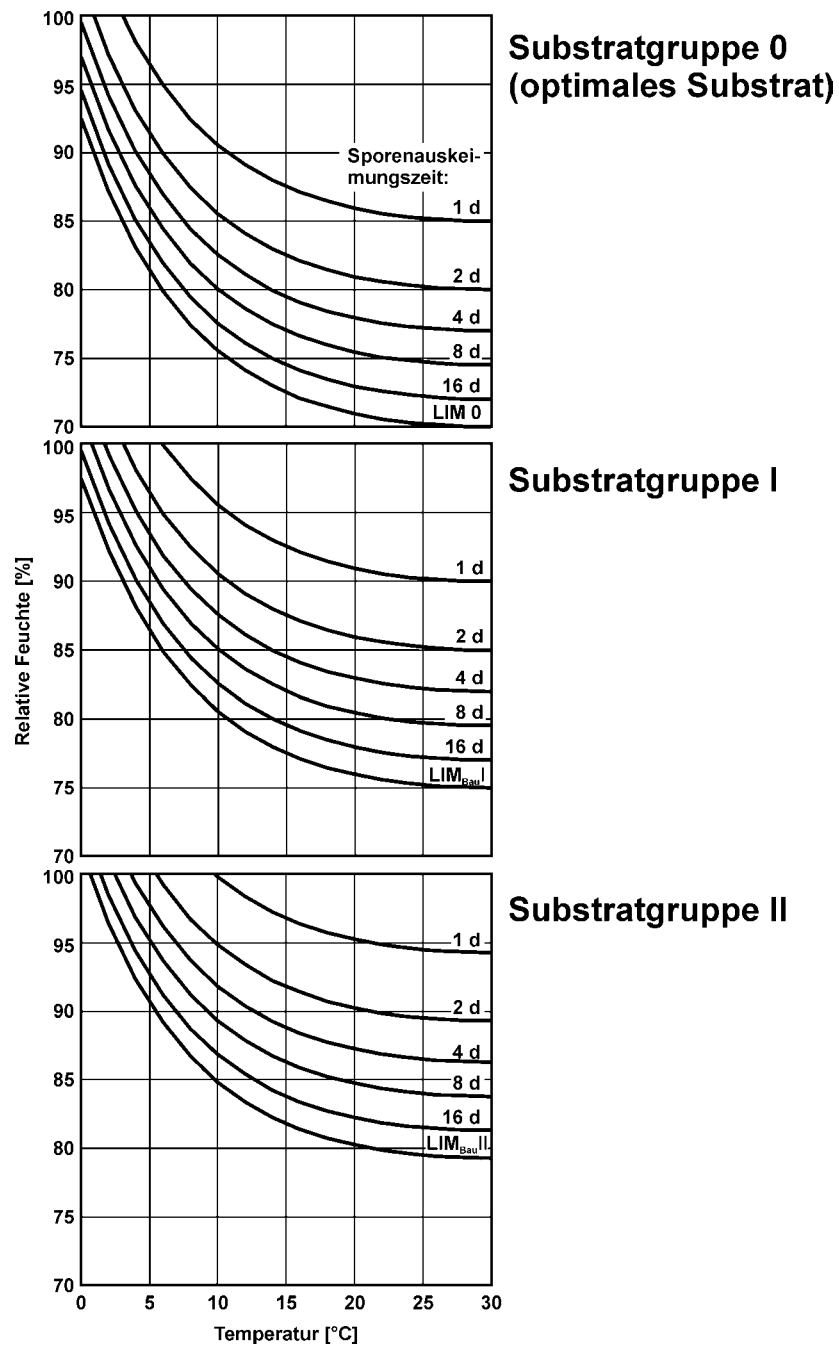


Bild 8: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung nach [19], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für II. Die angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist. LIM bedeutet: Lowest Isopleth for Mould.

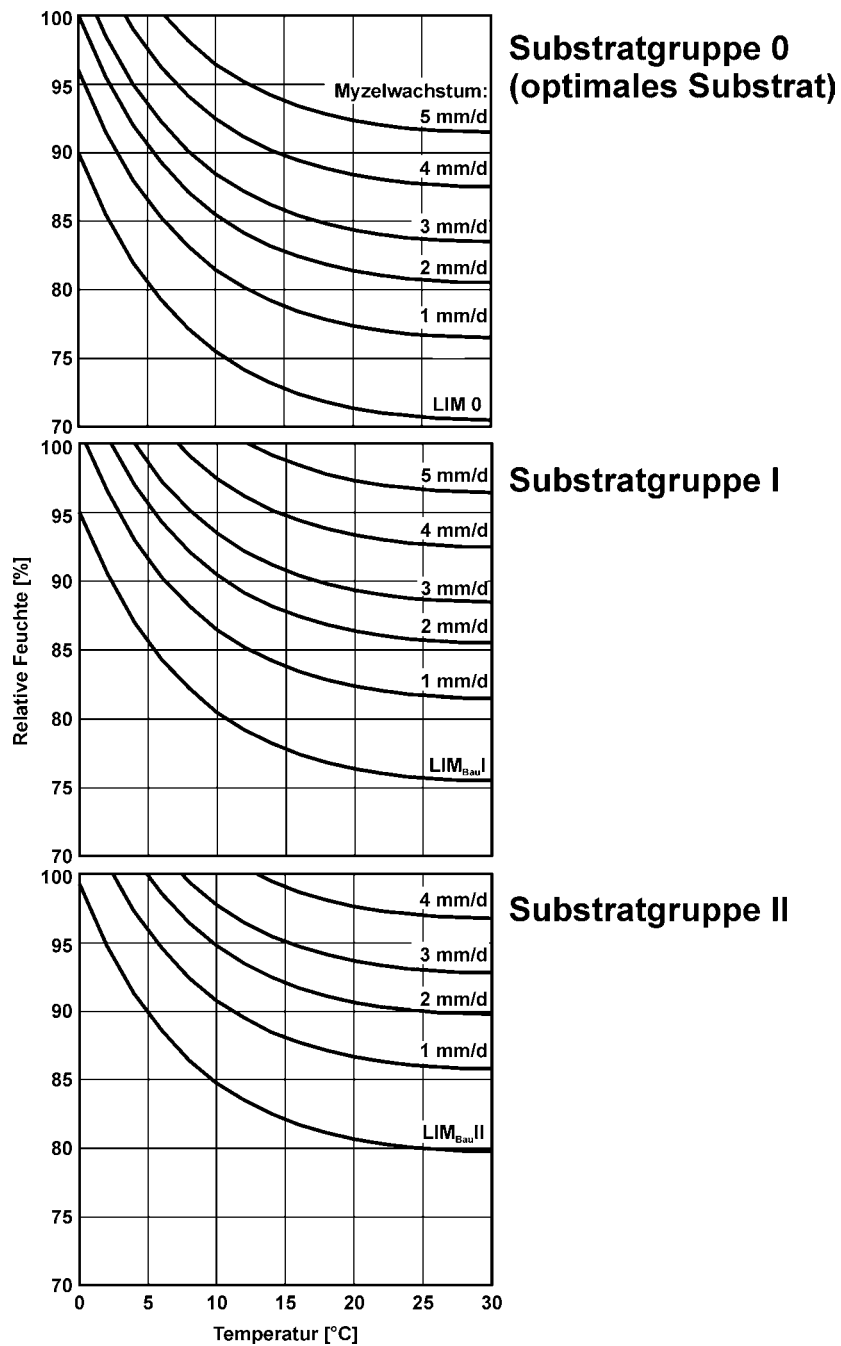


Bild 9: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Myzelwachstum nach [19], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für II. Die angegebenen Werte in mm/d charakterisieren das zu erwartende Wachstum. LIM bedeutet: Lowest Isopleth for Mould.

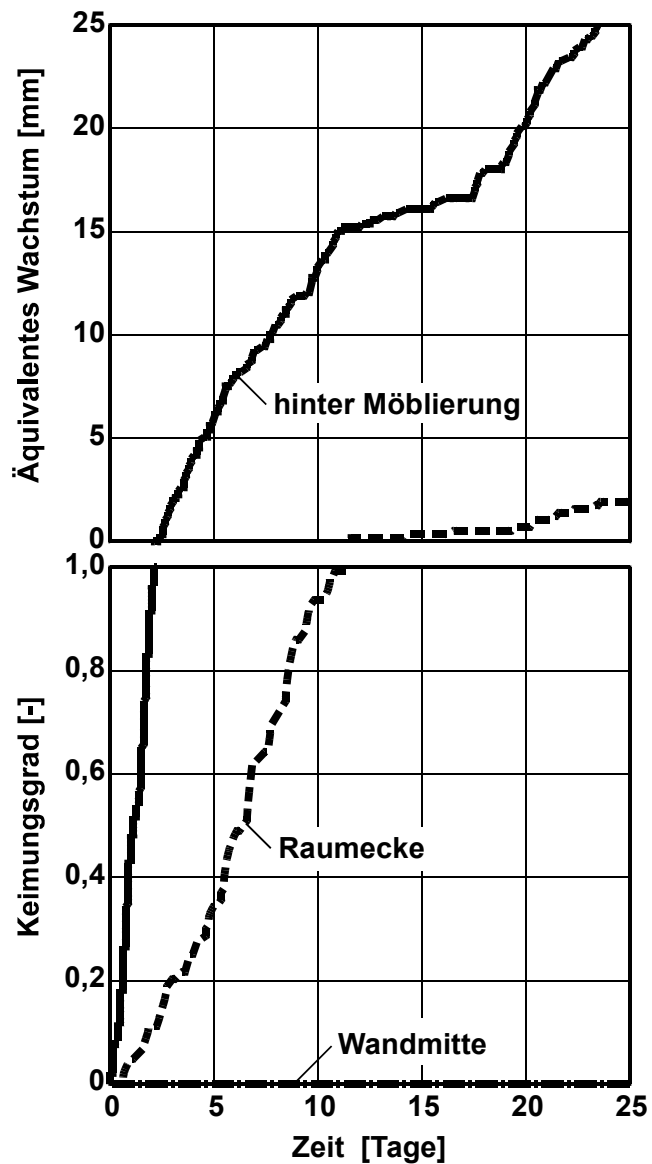


Bild 10: Mit dem Isoplethenmodell ermittelte Zeitverläufe von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für 3 verschiedene Stellen (Wandmitte, Ecke und hinter Möblierung). Zugrunde gelegt sind gemessene Oberflächentemperaturen und Feuchten eines im Jahr 1955 gebauten Gebäudes.

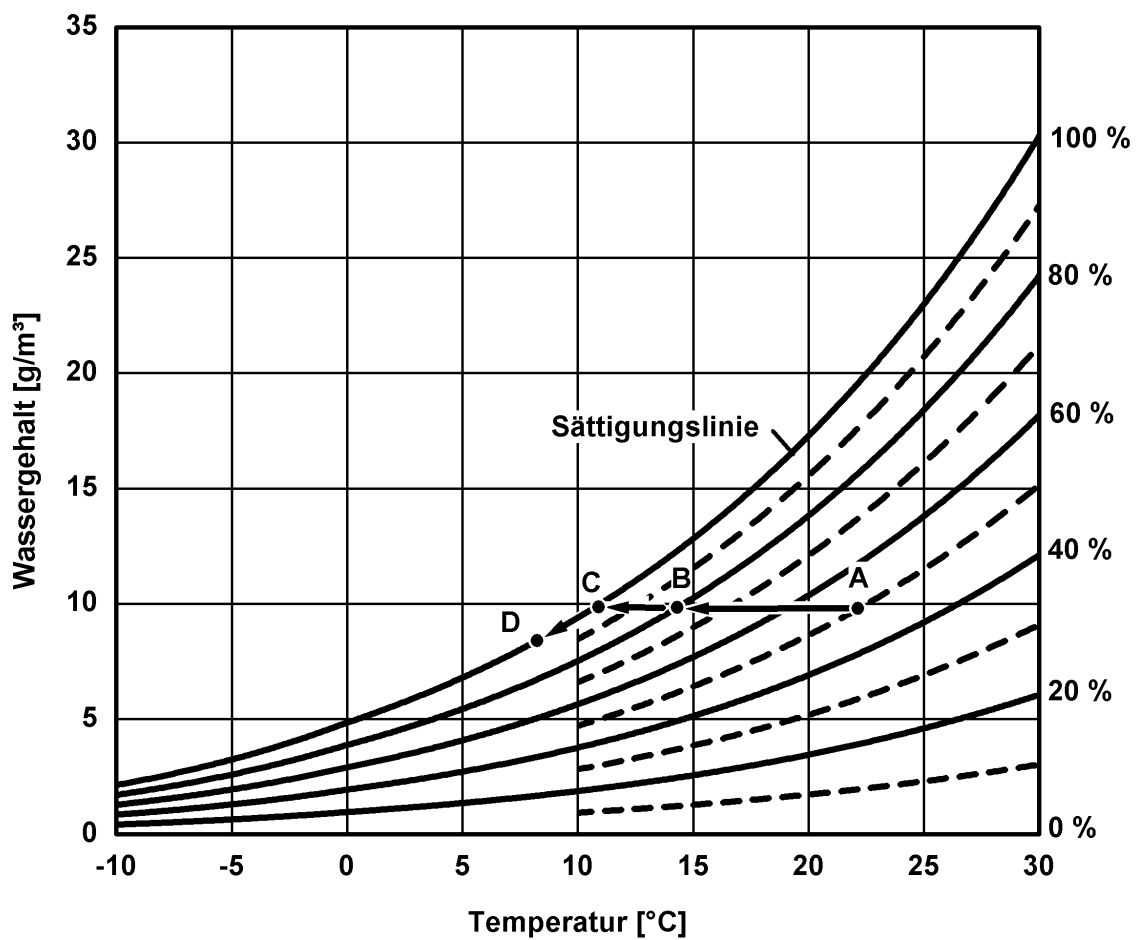


Bild 11: Wasserdampfgehalte der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Mit eingezeichnet sind als Beispiel die Zustandsänderungen der Luft mit anfänglich 22 °C und 50% r.F. bei Abkühlung in mehreren Schritten (Punkte A → B → C → D).

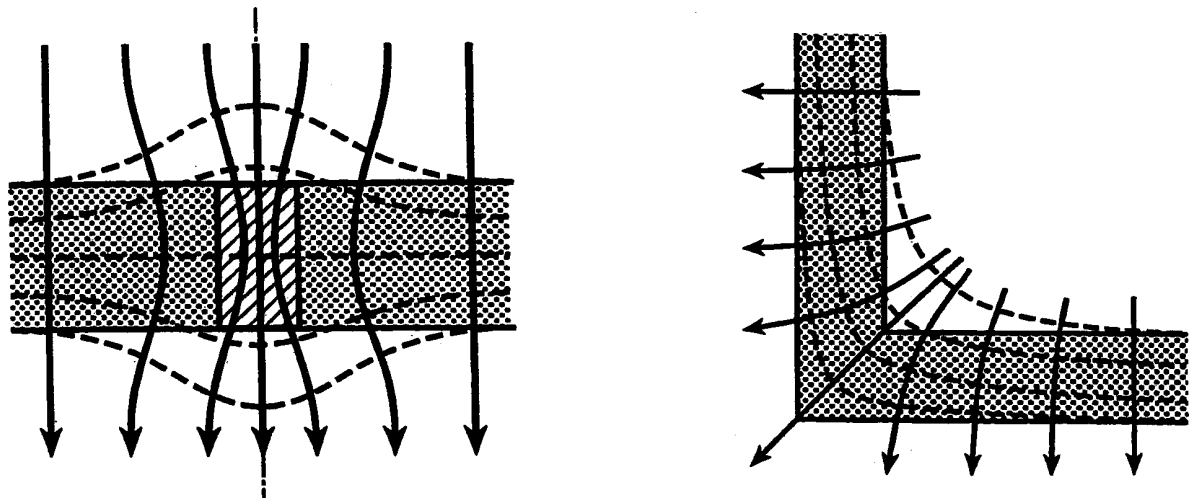
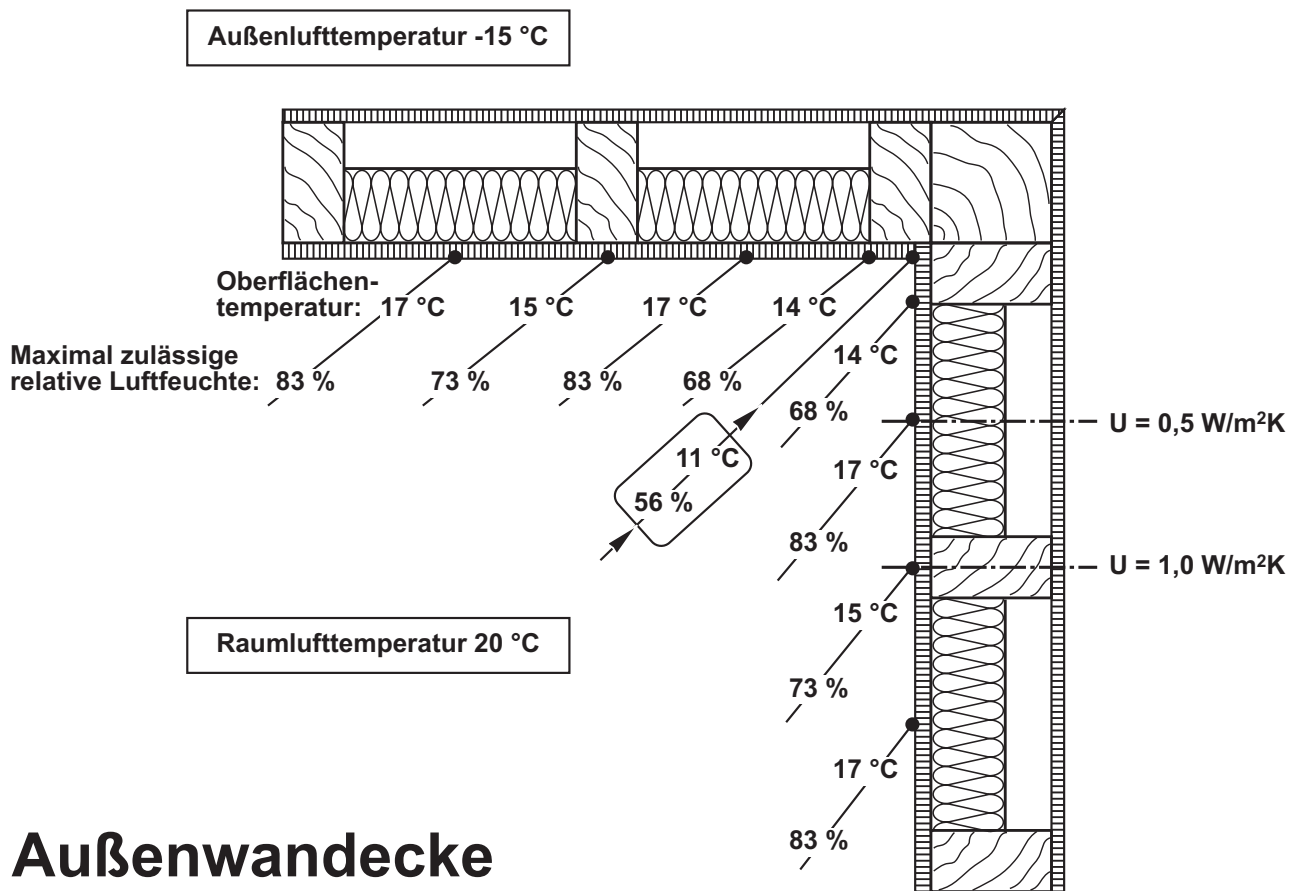


Bild 12: Schematische Darstellung von 2 Wärmebrücken mit Angabe der Wärmeströme (Adiabat; durchgezogene Linie) und Isothermen (gestrichelte Linien). Wärmebrücken zeichnen sich aus durch verstärkten Wärmefluss mit Verdichtung der Adiabat und Wölbung der Isothermen, nach [6].

links: tragende Stütze innerhalb eines Gefaches; (materialbedingte Wärmebrücke),

rechts: Wandecke; (geometrische Wärmebrücke).



Außenwanddecke

Bild 13: Darstellung des Wärmebrückeneffekts in einer Außenwanddecke, nach [6].

Angegeben werden die sich bei einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten der Dämmung von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ sowie von $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 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.

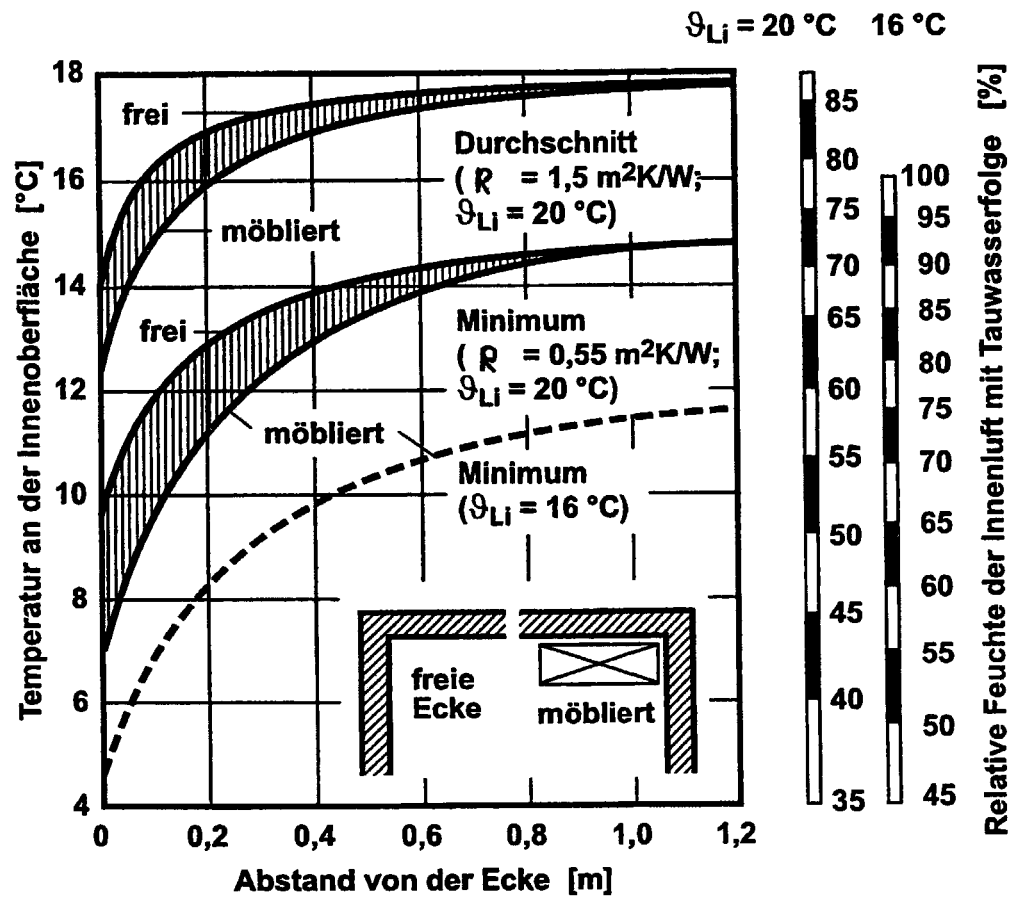


Bild 14: Innenoberflächentemperatur einer Außenwanddecke mit Durchschnittswärmeschutz und mit Mindestwärmeschutz in Abhängigkeit vom Abstand zur Außenecke, nach [6].

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.

