

Schimmelpilze – altes Thema, neue Ansätze

Dr. Klaus Sedlbauer, Dr. 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 [5]. 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 [8] 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.

2. Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen

Schimmelpilze gedeihen im Unterschied zu Algen und Flechten auch unter biologisch ungünstigeren Umgebungsbedingungen. Sie werden daher häufig als "Erstkolonisierer" bezeichnet. Um von den über 100.000 existierenden Spezies auf die wichtigsten in Gebäuden anzutreffenden und auf Standardmedien kultivierbaren Spezies zu schließen, wurde in [8] die wesentliche Literatur

ausgewertet. Von verschiedenen Autoren werden ca. 200 in Gebäuden anzutreffende Spezies genannt.

In der in Tabelle 1 gezeigten Übersicht sind für unterschiedliche Einflussfaktoren die Wachstumsbereiche für Schimmelpilze auf Baustoffen dargestellt. Da an den Wachstums- und Entwicklungsprozessen eines Organismus eine große Anzahl biochemischer Umsetzungen beteiligt ist, ist für das Wachstum und die Entwicklung von Mikroorganismen eine Temperaturabhängigkeit zu erwarten. Aus der Mykologie ist bekannt, dass Pilzwachstum ab 0 °C und z. T. noch darunter auftritt. Das optimale Wachstum ist speziesabhängig; es liegt bei ca. 25 °C und z. T. darüber.

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. Aus den in [8] aufgeführten Daten lässt sich schließen, dass die Feuchtegrenze, unterhalb der, auch auf optimalem Substrat, kein Wachstum von gebäudetypischen Schimmelpilzen auftritt, bei ca. 70 % relativer Feuchte liegt.

Der Nährstoffgehalt des Substrats, auf dem der Pilz wächst, ist neben der Temperatur und Feuchte die wichtigste Einflussgröße für Schimmelpilzbildung. Schimmelpilze können in einem breiten Bereich des pH-Werts von stark sauer bis hoch alkalisch gedeihen. Da diese Pilze keine Photosynthese betreiben, können sie auch in Dunkelheit wachsen. Starke Sonneneinstrahlung wirkt eher wachstumshemmend; einige Spezies begegnen dem durch Einlagerung von Pigmenten (Schwärzepilze). Weil auch auf glatten Oberflächen Pilze wachsen, braucht der Einfluss der Oberflächenrauigkeit nicht betrachtet zu werden. Da das im Folgenden beschriebene Modell auf die generelle Vermeidung von Pilzbefall abzielt, spielt es keine Rolle, ob eine Spezies durch andere verdrängt wird; derartige Einflüsse werden deshalb nicht berücksichtigt.

Eine Bewertung der Einflussfaktoren für Schimmelpilzbildung in [8] 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. Wie die Auswertung der Literatur ergibt, beeinflussen Temperatur und relative Feuchte die Wachstumsvoraussetzungen auf verschiedene Weise. Je nach Pilzspezies ergeben sich unterschiedliche Wachstumsvoraussetzungen (siehe Tabelle 2).

3. Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen

Bei Bauprozessen beschäftigt man sich häufig mit den Ursachen für Schimmelpilzbefall in Gebäuden. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob die Baukonstruktion, 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. [11]), 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 dabei die Kenntnis des Einflusses der Oberflächentemperatur auf die Oberflächenluftfeuchte in Abhängigkeit der Raumluftklimarandbedingungen.

Anhand des Zustandsdiagramms von Luft in Bild 1 lassen sich die ablaufenden Vorgänge anschaulich erläutern. Dargestellt sind die in Abhängigkeit vom Was-

sergehalt der Luft (Ordinate) und der Temperatur (Abszisse) vorliegenden relativen Luftfeuchten. 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 aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen die innerseitige Oberflächentemperatur abgesenkt (für dieses Beispiel sei eine Oberflächentemperatur von 15 °C angenommen; siehe dazu auch Ziffer 3.1), 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 1 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.

3.1. 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:

$$\vartheta_{O_i} = \vartheta_{L_i} - U R_{s_i} (\vartheta_{L_i} - \vartheta_{L_a}) \quad (1)$$

ϑ_{O_i} [°C] Temperatur der Innenoberfläche
 ϑ_{L_i} [°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.

3.2. 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 2). Die Folgen von Wärmebrücken sind (neben den höheren Energieverlusten) ein Absinken der Temperatur, eine Erhöhung der Feuchte (Bild 1) an der Innenoberfläche und die Gefahr der Unterschreitung der Taupunkttemperatur und damit einer Schimmelpilzbildung.

Dieser Effekt wird in Bild 3 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 im Bereich der Dämmung von 0,5 W/(m² K) sowie von 1,0 W/(m² K) im Bereich der Pfosten und die daraus resultierenden maximal erlaubten Raumluftheuchten, 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.

3.3. 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 4 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 Raumlufffeuchte, 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 (1) werden in [7] 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:	$R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

3.4. Unzureichende Beheizung

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

3.5. Feuchteproduktion im Raum

Die sich an Innenoberflächen von Außenbauteilen einstellende relative Feuchte hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Oberfläche ab, sondern auch maßgeblich von der Feuchteproduktion im Wohnraum. Eine hohe Feuchteproduktion im Wohnraum führt bei gleicher Lüftung zu höheren Raumluftfeuchten und damit gekoppelt auch zu höheren Innenraumoberflächenfeuchten. In Tabelle 3 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 und 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.

3.6. 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 4 zeigt bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen und einer typischen relativen Außenluftfeuchte von 80 % die relative Feuchte der Luft, wenn sie auf jeweils 20 °C erwärmt wird. Beispielsweise bei –10 °C außen wird durch die Erwärmung die relative Luftfeuchte auf 9 % abgesenkt.

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 Luft-

wechsel. Die hierbei geforderten Werte variieren und liegen zwischen $0,3 \text{ h}^{-1}$ und $1,3 \text{ h}^{-1}$. [1] 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 erreicht. Vor allem nach kurzen Feuchtelastspitzen sollte durch Fensteröffnen gelüftet werden, um eine akkumulierende Feuchteaufnahme durch sorptive Innenoberflächenmaterialien zu vermeiden.

4. Neue Ansätze zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung

4.1. 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 [8]. 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 Sporenauskeimungszeiten (Bild 5), im Falle der Beschreibung des Myzelwachstums Wachstum pro Zeiteinheit (Bild 6) darstellen.

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich bei den Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemeingültiger 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 [8]. Die in den Bildern 7 und 8 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 Isoleth for Mould) genannt. Die oberen Isolethensysteme in den Bildern 7 und 8 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 Isolethensysteme für zwei Substratgruppen (Grenzkurve LIM_{Bau}) vorgeschlagen, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden. Dazu erfolgte in [8] eine Definition von Substratgruppen, denen unterschiedliche Untergründe zugeordnet werden:

- Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); diese Isolethensysteme 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 7 und 8 oben).
- Substratgruppe I: Biologisch gut verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material.
- Substratgruppe II: Biologisch kaum verwertbare Substrate, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

Ein eigenes Isolethensystem wird für diese Substratgruppen erstellt, wobei für die Substratgruppe 0 die Isolethen für optimalen Nährboden gelten. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets die Substratgruppe I zugrunde gelegt werden. Mithilfe dieser Isolethensysteme 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 [6] 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 ge-

messen und ausgewertet. Des Weiteren war die relative Feuchte im Schlafräum messtechnisch erfasst worden. In Bild 9 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 Stundenzitraum 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 9 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 [8] das bereits erwähnte, auf dem Isoplethenmodell aufbauende, biohygrothermische Verfahren entwickelt, auf das in [9] näher eingegangen wird.

4.3. Funktionsweise des biohygrothermischen Modells

Das vorgestellte Isoplethenmodell kann eine durch Trockenperioden auftretende Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen. Um auch diese Effekte korrekt beschreiben zu können, wurde in [8] das auf dem Isoplethenmodell aufbauende, biohygrothermische Modell entwickelt. Dieses soll im Folgenden beschrieben werden.

Der Wassergehalt einer Spore wird auch durch biologische Vorgänge mitgesteuert, für die allerdings der derzeitige Kenntnisstand nicht ausreichend ist, um sie genau zu modellieren. Man kann aber davon ausgehen, dass erst ab einem gewissen Grenzwassergehalt die Spore anfängt zu keimen und damit biologische Stoffwechselfvorgänge beginnen. Bis dahin kann die Spore als nichtlebendes Material betrachtet werden, dessen Eigenschaften mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden können. Das biohygrothermische Modell betrachtet die Entwicklung der Spore bis zu diesem Zeitpunkt. Die Spore kann aufgrund ihrer geringen Abmessungen isotherm betrachtet werden, somit können Flüssigtransportvorgänge (z. B. kapillares Saugen) der Diffusion zugeschlagen werden. Unter diesen Annahmen sind für die Berechnung des Feuchtehaushalts einer Spore als Materialkennwerte nur die Feuchtespeicherfunktion und der feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstand der Sporenwand erforderlich.

Bild 10 zeigt schematisch einen Wandaufbau mit an der Innenoberfläche anhaftender Spore (stark vergrößert). Im biohygrothermischen Modell wird die Pilzspore als ein „biologischer“ Wandaufbau betrachtet. Eine derartige gleichzeitige Berechnung der Spore als „Bauteilschicht vor der Wand“ ist aber nicht möglich, da die Spore in diesem Fall für die Wand einen (der Realität widersprechenden) hohen Diffusionswiderstand bewirken würde. Deshalb erfolgt in einem ersten Schritt die reine Berechnung des Feuchtehaushalts der Wand. Die berechneten Klimaverläufe der Bauteiloberfläche werden in einem zweiten Berechnungsschritt als Randbedingung für die biohygrothermischen Berechnung der „Modellspore“ verwendet. Es wird beim Vorhersagemodell davon ausgegangen, dass es einen Grenzwassergehalt gibt, ab dem es in der Spore zur Keimung

kommt. Wird dieser Wassergehalt in der Spore erreicht oder überschritten, ist mit Schimmelwachstum zu rechnen. Die Berechnungen der hygrothermischen Randbedingungen erfolgen mit dem hygrothermischen Rechenverfahren WUFI [3]. Für das biohygrothermische Modell zur Beurteilung des Befallsrisikos ist ein zusätzliches Softwaremodul entwickelt worden.

4.4. Anwendungsbeispiel für das biohygrothermischen Modell

Dächer mit Blecheindeckung weisen einen hohen Dampfdiffusionswiderstand auf, so dass nach außen so gut wie keine Feuchte entweichen kann. Dies bedeutet, dass mittels diffusionsoffener Dampfsperren auf der Innenseite die Austrocknung eines Daches, vor allem in den warmen Sommermonaten, nach innen, also zum Raum, erfolgen muss. Ein Vergleich verschiedener Dampfbremsen wurde in umfangreichen Freilanduntersuchungen im Gelände des Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführt [4]. Aufgrund hoher Einstrahlungen auf der Südseite und damit erhöhter Temperaturen im Bereich der Blecheindeckung kommt es zur sogenannten "Umkehrdiffusion". Dies bedeutet, dass in Richtung des Temperaturgradienten Feuchte von der Außenseite nach innen diffundiert und es somit an den Dampfbremsen vorübergehend zu einer erhöhten Feuchtelast kommen kann. Im Gegensatz zu Rauminnenwänden ergeben sich aufgrund der hohen solaren Einstrahlungen und des niedrigen Diffusionswiderstandes der Mineralwollendämmung erhebliche kurzfristige Oberflächenfeuchteschwankungen an den Dampfbremsen, weshalb hier für die Schimmelpilzvorhersage das quasistationäre Isoplethenmodell nicht ausreicht, sondern das instationäre biohygrothermische Modell anzuwenden ist.

Das Satteldach mit einer Neigung von 50° hat eine Ost/West-Orientierung. Das heißt, es ergeben sich nach Norden und Süden geneigte Dachflächen. Bild 11 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Versuchsdachflächen mit folgenden Ausführungen. Zwischen den Sparren war durchgehend Mineralwolle in der Dicke der Sparrenhöhe (18 cm) in der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040 eingebracht worden, so dass keine Luftschicht zwischen Dämmung und der rohen Holzschalung (30 mm) gegeben ist. Für Sparren und Holzschalung wurde feuchtes

Holz mit einem Wassergehalt von mindestens 30 M.-% verwendet. Bei den Dampfbremsen handelt es sich um eine Dampfbremspappe aus Natronkraftpapier mit einem s_d -Wert von ca. 3 m, einer Polyethylenfolie mit s_d -Wert 50 m und einer feuchteadaptiven Dampfbremsfolie aus Polyamid mit einem s_d -Wert, der je nach Umgebungsfeuchte, zwischen 0,4 m und 4 m liegt.

In Bild 12 oben sind für den beschriebenen Dachaufbau die gemessenen bzw. umgerechneten Verläufe der relativen Luftfeuchte auf der raumseitigen Oberfläche des Natronkraftpapiers und der feuchteadaptiven Dampfbremse dargestellt. Die Oberflächentemperaturen waren nahezu zeitlich konstant bei etwa 21 °C (nicht dargestellt). Die Verläufe der Temperatur und Luftfeuchte dienen als Randbedingung für die im zweiten Schritt berechneten Verläufe der Feuchtegehalte der Modellspore. Die in Bild 12 unten dargestellten Feuchtegehaltsverläufe der Spore auf beiden Materialien zeigen aufgrund des hohen Diffusionswiderstandes der Sporenwand einen im Vergleich zur Oberflächenfeuchte wesentlich ruhigeren Verlauf. Für die Spore auf dem Natronkraftpapier ergeben sich im Vergleich zur feuchteadaptiven Dampfbremse höhere Feuchten mit bis zu 60 Vol.-%. In das Diagramm mit eingezeichnet sind die die Keimung bestimmenden Grenzwassergehalte für die Substratgruppen I und II. Da bei diesem Aufbau annähernd konstante Oberflächentemperaturen vorliegen, sind die Grenzwassergehalte zeitlich fast unverändert. Man erkennt, dass der Feuchtegehalt der Spore auf dem Natronkraftpapier (Substratgruppe I) über einen relativ langen Zeitraum deutlich über seinem Keimungswassergehalt liegt. Nach rund 30 Tagen kommt es zu Schimmelwachstum, was mit den Beobachtungen während der Untersuchung übereinstimmt. Bei der Polyamidfolie ist nur eine kurzfristige geringfügige Überschreitung festzustellen; ein Schimmelwachstum ist hier nicht zu erwarten und auch nicht beobachtet worden.

5. Zusammenfassung

Die bisher üblichen Bewertungsmethoden für Schimmelpilzbefall gehen in der Regel von stationären Randbedingungen aus. Während in den gängigen Angaben in Deutschland meist nur die relative Feuchte als Kriterium genannt wird, werden international mittlerweile immer häufiger biologisch gemessene Isople-

thensysteme für die Bewertung zugrunde gelegt. Dabei sind temperaturabhängig relative Feuchten genannt, bei deren Überschreitung Schimmelpilzbefall auftreten kann. Es wird in der vorliegenden Publikation ein Vorhersagemodell auf Basis dieser Isoplethen vorgestellt und dessen Anwendbarkeit am Beispiel des Schimmelwachstums für verschiedene Stellen der Innenwände demonstriert. Das auf dem Isoplethenmodell aufbauende biohygrothermische Modell ermöglicht erstmals die Berücksichtigung von sich ändernden Temperaturen und relativen Feuchten und damit verbundene eventuelle Austrocknung der Sporen, indem das hygrothermische Verhalten einer Schimmelpilzspore beschrieben wird. Anhand des Beispiels eines eingehend messtechnisch untersuchten Blechdachs kann die Leistungsfähigkeit des Modells zur Klärung der Schimmelwachstumsgefahr demonstriert werden. Damit ist eine Basis geschaffen, Schimmelpilzbildung instationär zu beschreiben.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Hartmann, T.: Bauphysikalische und hygienische Aspekte der Wohnungslüftung. HLH – Heizung, Lüftung, Haustechnik Bd. 51 (2000), H. 7, S. 59 - 61.
- [2] Gertis, K.; Mehra, S. R.: Bauphysik, Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2001).
- [3] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart. (1994).
- [4] Künzel, H. M; Großkinsky, T.: Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an! wksb 43 (1998), H. 42, S. 22-27.
- [5] Mücke, W.; Lemmen, C.: Schimmelpilze. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (1999).
- [6] Reiß, J.; Erhorn, H.: Beurteilung von Feuchteschäden. IBP-Bericht WG 47/1997 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (1997).
- [7] Rudolphi, A.; Kirchner, D.: Ökologische und gesundheitsorientierte Baustoff- und Konstruktionsauswahl. Moriske, H.-J.; Turouski, E. (Hrsg.):

Handbuch für Bioklima und Lüfthygiene. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (2000), 3. Erg. Lfg., Kap. IV-7.1, S. 12 - 24.

- [8] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [9] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen – Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 167 – 176.
- [10] 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.
- [11] T 2914: Gewährleistung einer guten Raumlufthqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. Fraunhofer-IRB Verlag, Stuttgart (Jan. 1999).

Tabelle 1: Wesentliche Einflußfaktoren für das Auskeimen und Wachstum von Schimmelpilzen mit Angaben des minimalen und maximalen Wachstumsbereichs nach [8].

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 % relativer Feuchte wachsen.

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

Tabelle 2: Angabe der minimalen, optimalen sowie maximalen Werte der Wachstumsvoraussetzungen für einzelne Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur, relativer Feuchte und pH-Wert bzgl. Sporenauskeimung sowie Myzelwachstum nach [8].

Pilzspezies	Wachstumsvoraussetzungen												
	Temperatur [°C]						relative Feuchte [%]				pH-Wert [-]		
	Sporenauskeimung			Myzelwachst.			Sporenk.		Myzelw.		pH-Wert [-]		
	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 der Feuchteabgabe in Räumen bei einer Innenlufttemperatur von 20 °C, nach [2].

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 4: Relative Luftfeuchte 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 Luftfeuchte 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.

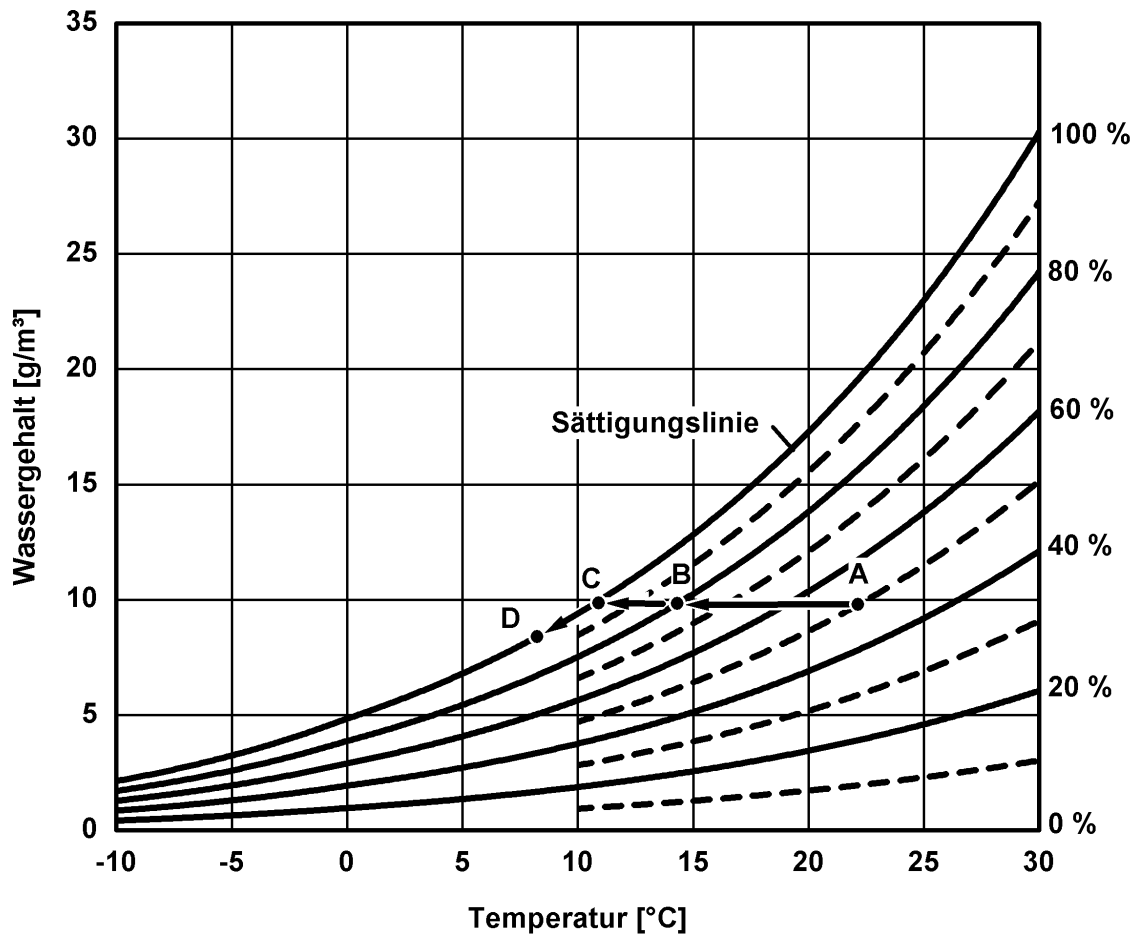


Bild 1: Wasserdampfgehalte der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Mit eingezeichnet sind als Beispiel die Zustandsänderungen der Luft mit anfänglich 22 °C und 50 % r.F. bei Abkühlung in mehreren Schritten (Punkte A → B → C → D).

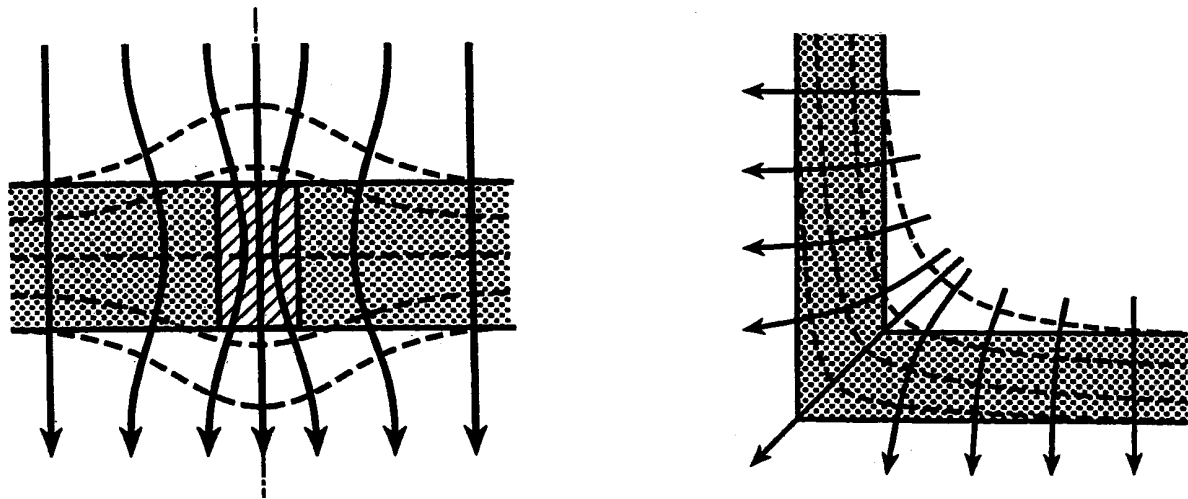
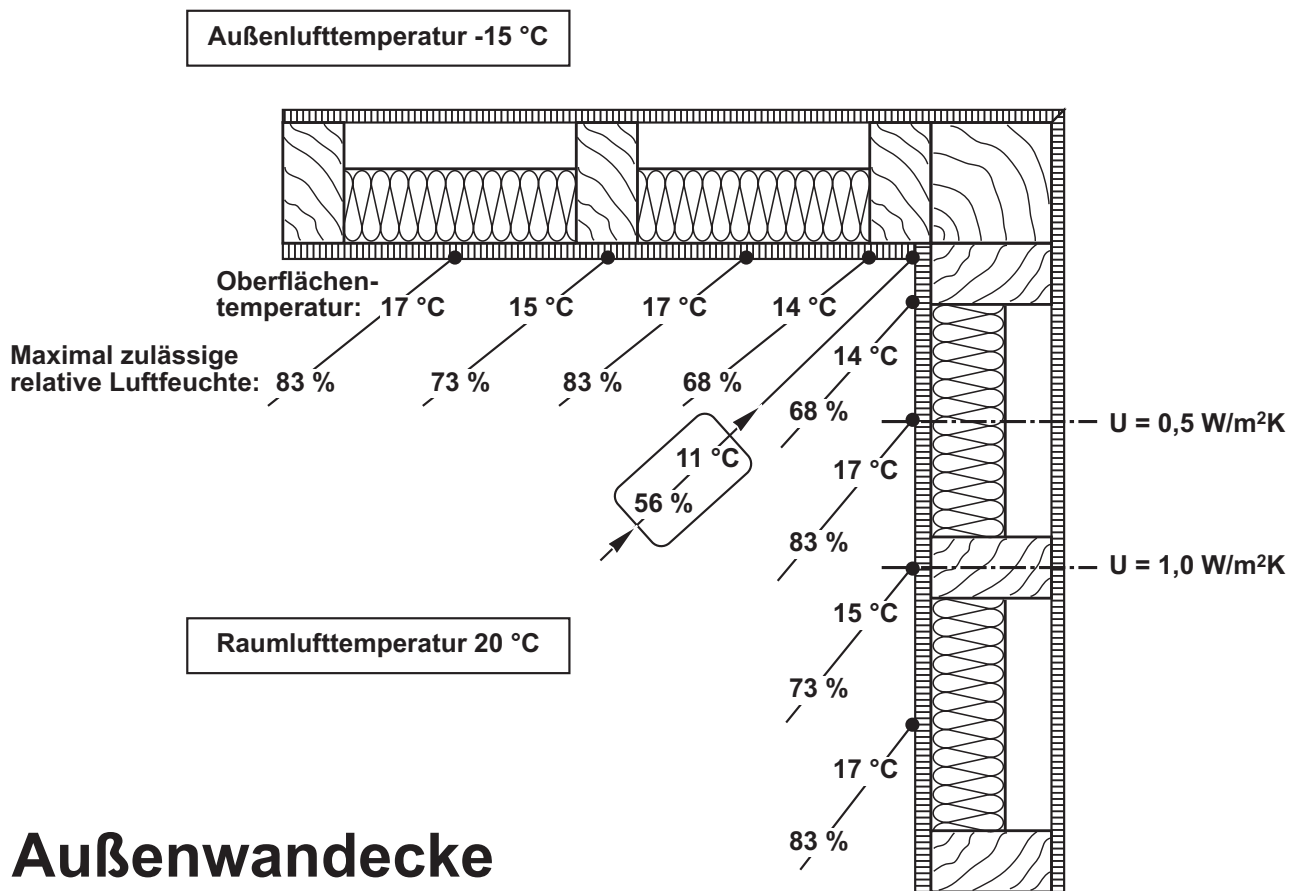


Bild 2: Schematische Darstellung von 2 Wärmebrücken mit Angabe der Wärmeströme (Adiabatens; durchgezogene Linie) und Isothermen (gestrichelte Linien), nach [2]. Wärmebrücken zeichnen sich aus durch verstärkten Wärmefluss mit Verdichtung der Adiabaten und Wölbung der Isothermen.

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

rechts: Wandecke; (geometrische Wärmebrücke).



Außenwanddecke

Bild 3: Darstellung des Wärmebrückeneffekts in einer Außenwanddecke, nach [2].

Angegeben werden die sich bei einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten in Wandmitte 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.

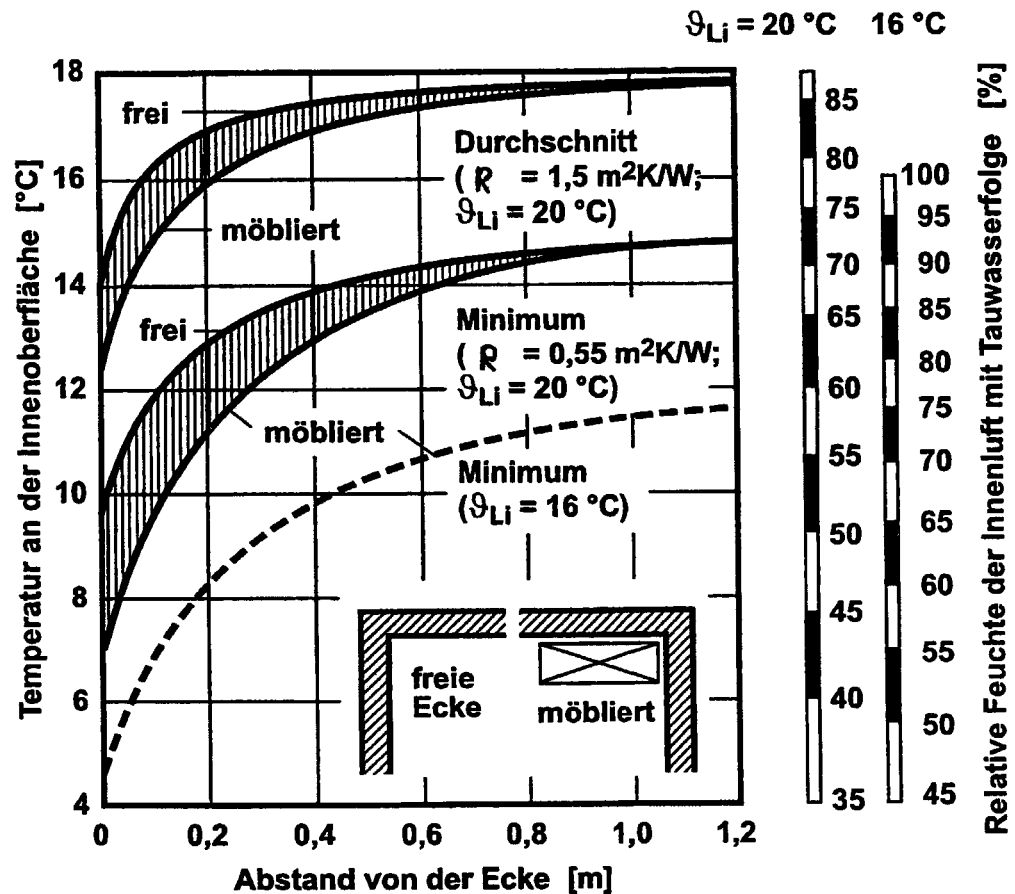


Bild 4: Innenoberflächentemperatur einer Außenwanddecke mit Durchschnittswärmeschutz und mit Mindestwärmeschutz in Abhängigkeit vom Abstand zur Außenecke, nach [2].

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.

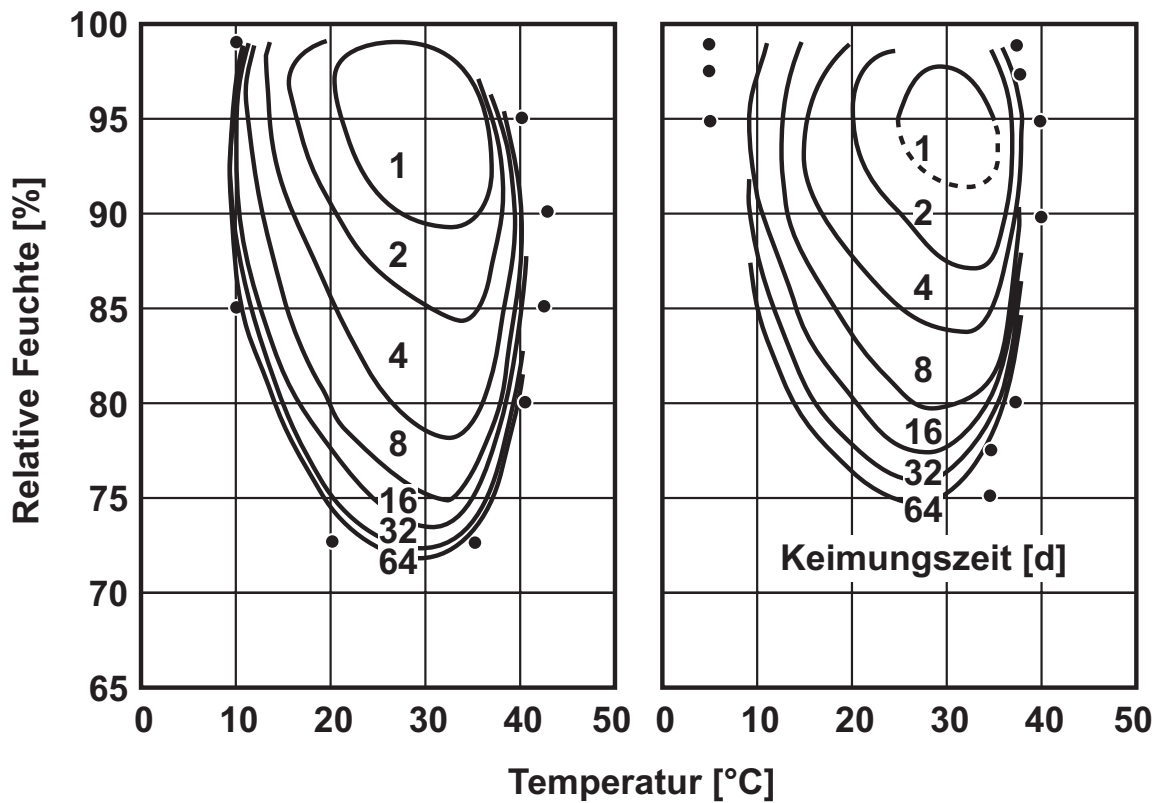


Bild 5: Isoplethensysteme für Sporenauskeimung der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) nach Smith [10]. Die Isolinien geben in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte die Keimungszeiten in Tagen an (eingetragene Zahlenwerte). Die Punkte zeigen Bedingungen, bei denen nach 95 Tagen noch keine Keimung stattgefunden hatte.

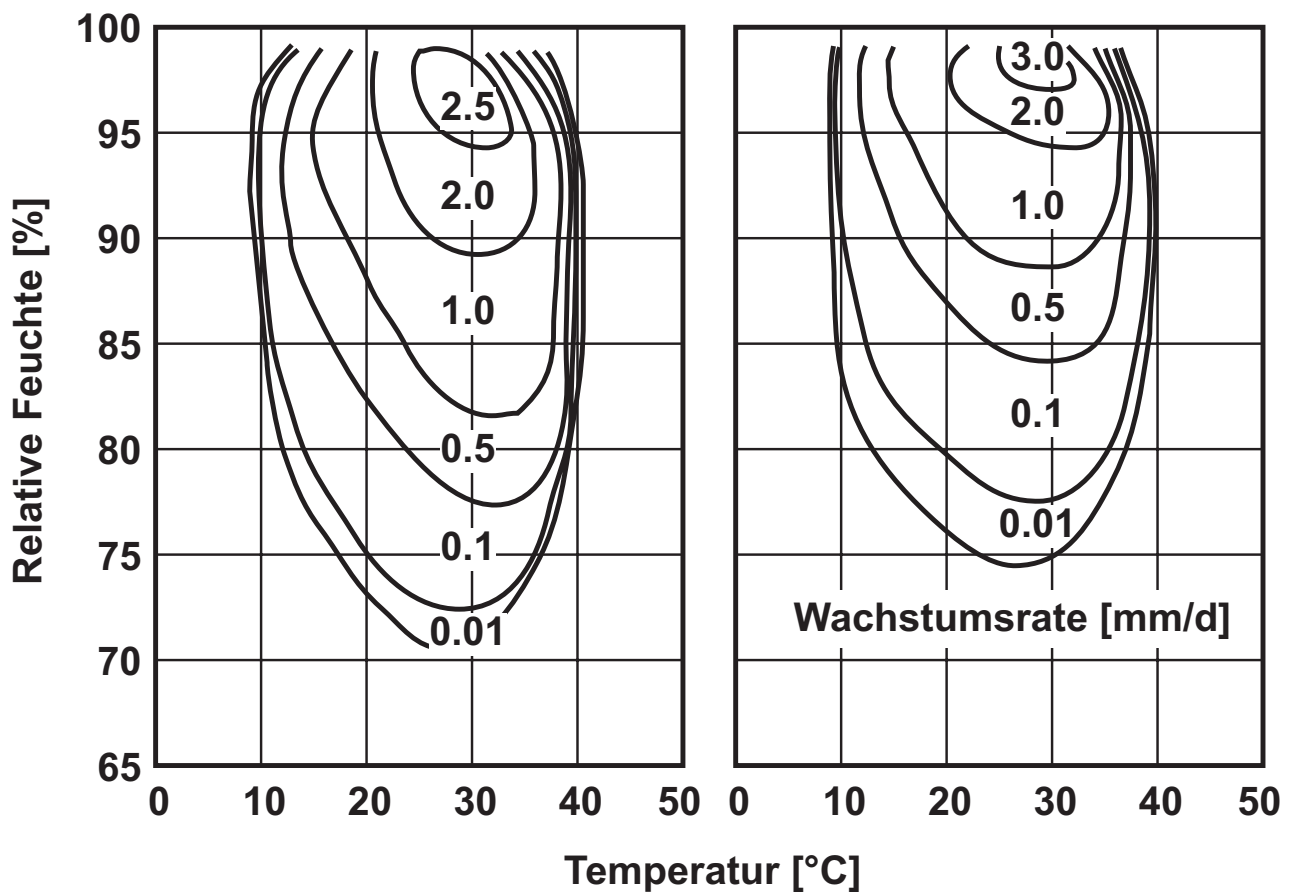


Bild 6: Isoplethensysteme für Myzelwachstum der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte nach Smith [10]. Die Zahlen an den Isolinien kennzeichnen die Wachstumsraten in mm/d.

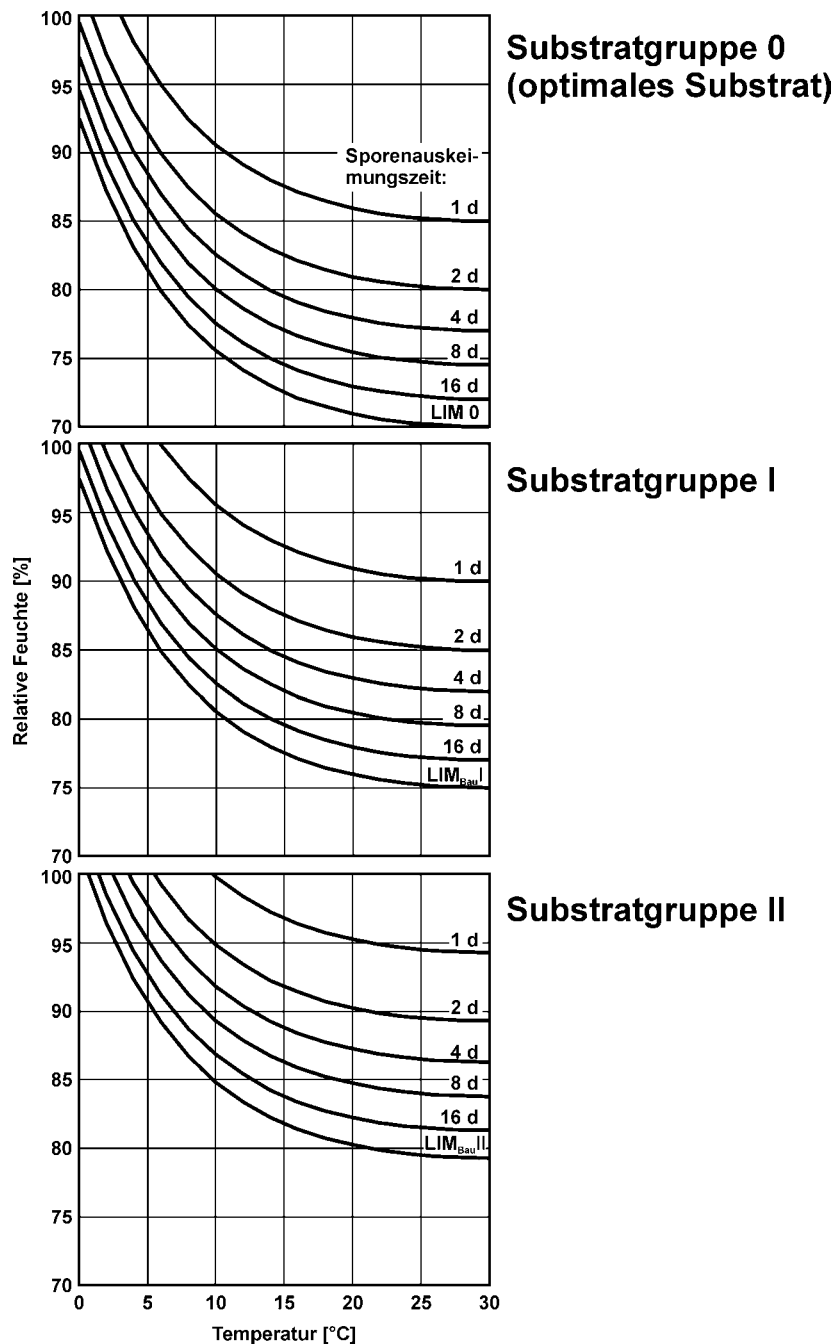


Bild 7: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung nach [8], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für II. Die angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist. LIM bedeutet: Lowest Isoleth for Mould.

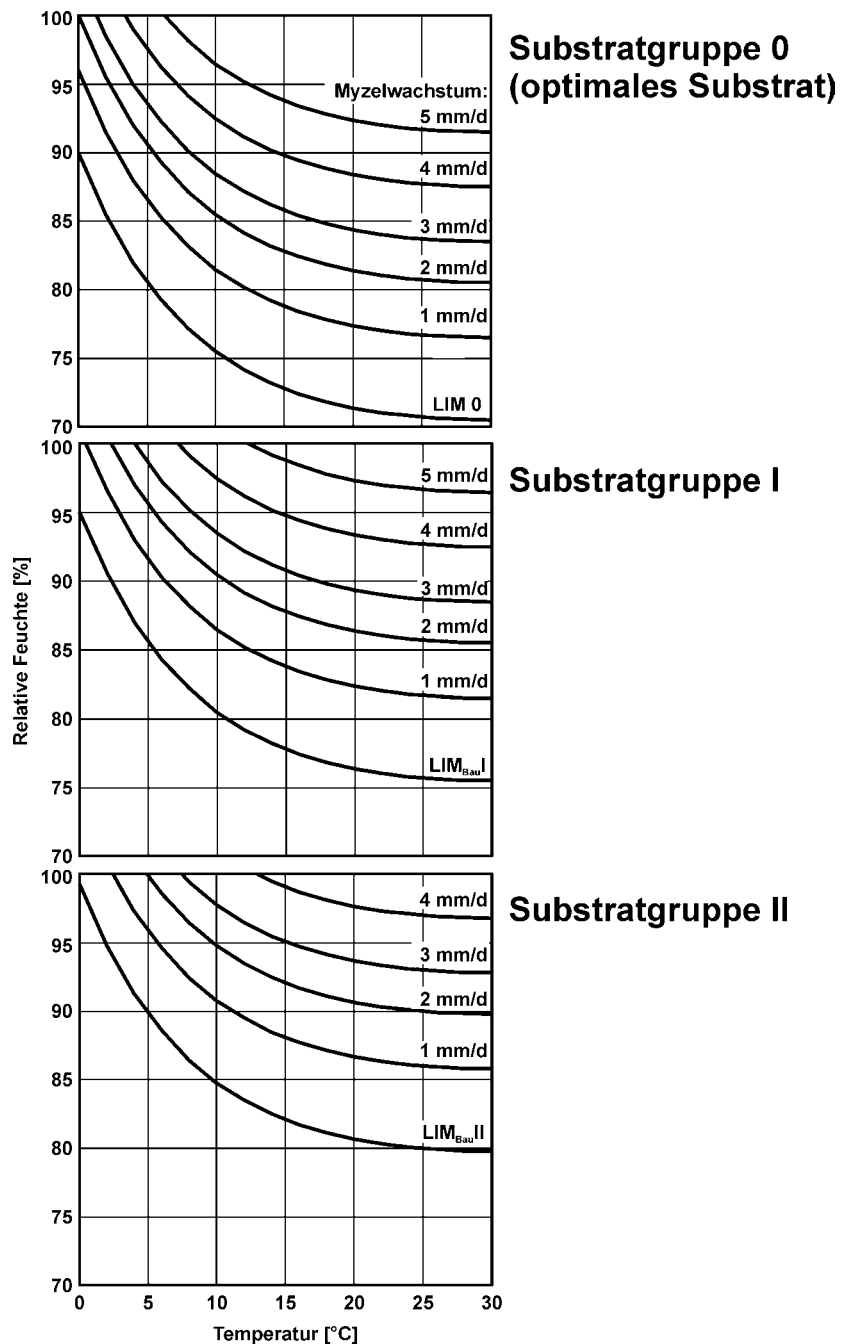


Bild 8: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Myzelwachstum nach [8], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für II. Die angegebenen Werte in mm/d charakterisieren das zu erwartende Wachstum. LIM bedeutet: Lowest Isopleth for Mould.

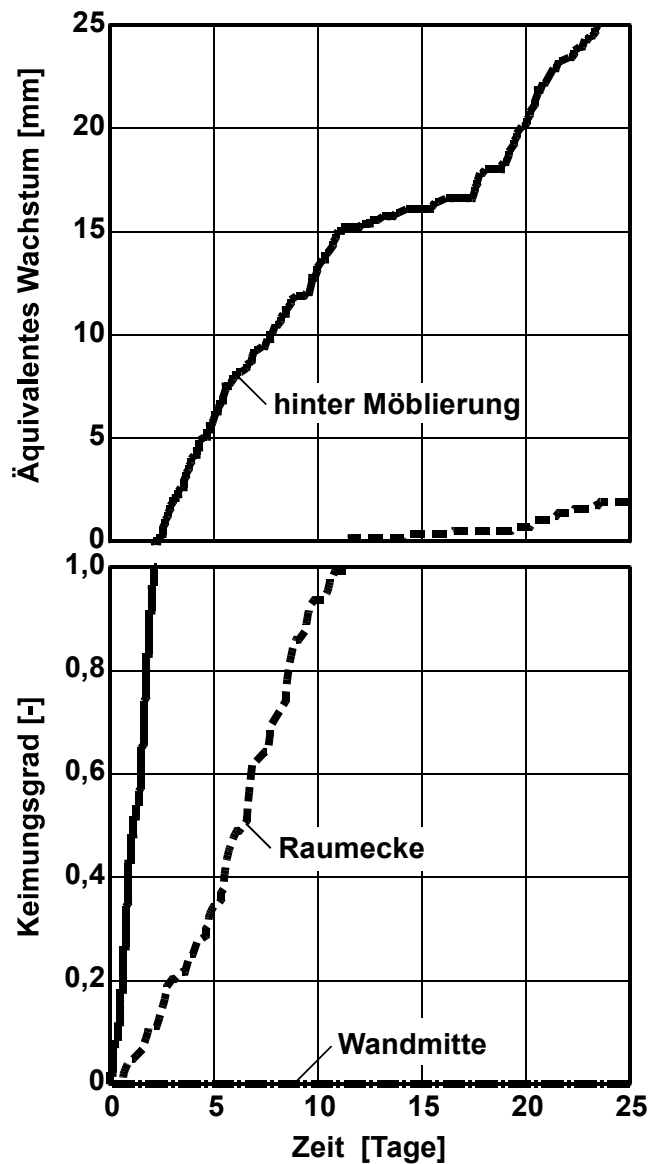


Bild 9: Mit dem Isoplethenmodell ermittelte Zeitverläufe von Keimung und Wachstum der Spore nach dem Isoplethenmodell für 3 verschiedene Stellen (Wandmitte, Ecke und hinter Möblierung), nach [8]. Zugrunde gelegt sind gemessene Oberflächentemperaturen und Feuchten eines im Jahr 1955 gebauten Gebäudes.

Modellspore

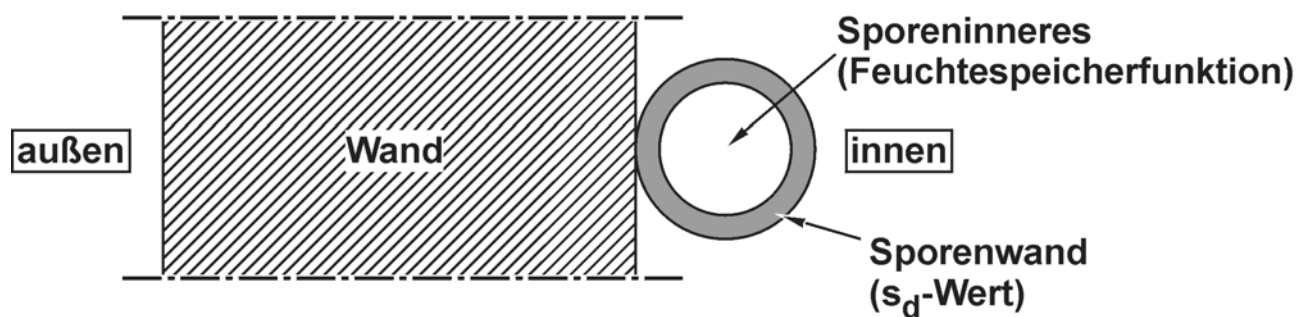
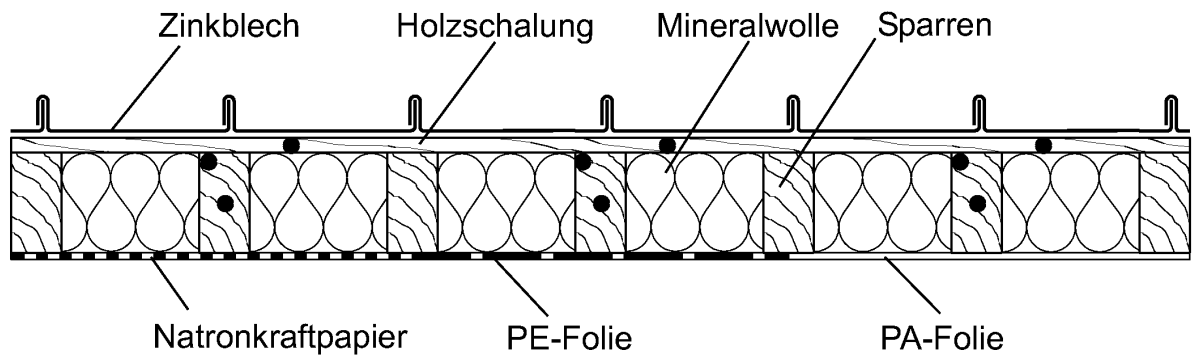


Bild 10: Schematisierte Darstellung einer (stark vergrößerten) Spore auf einer Wand nach [8].



- Holzfeuchte-meßstellen

Bild 11: Versuchsvarianten zum Austrocknungsverhalten von unbelüfteten Dächern. Der Aufbau mit Natronkraftpapier zeigte starke Schimmelpilzbildung.

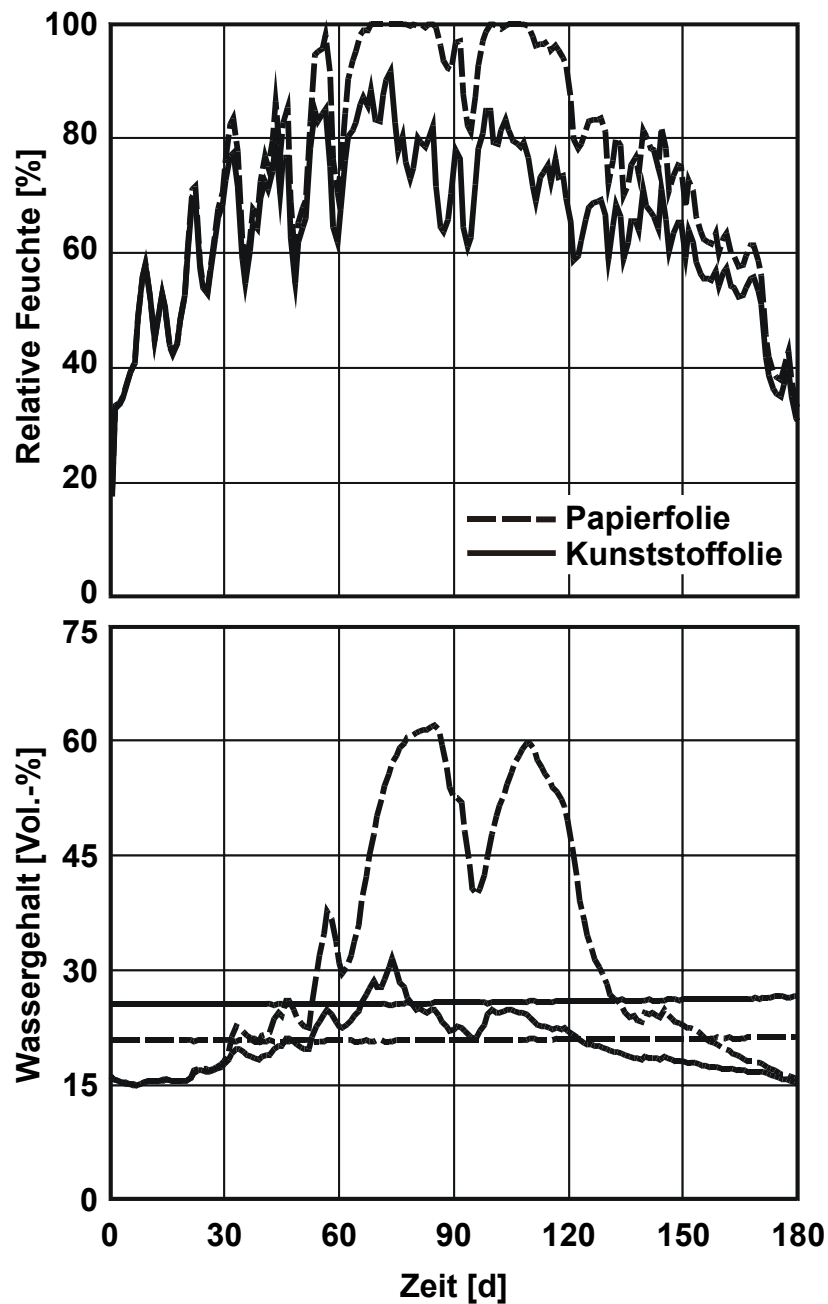


Bild 12: Zeitverläufe der mit dem Rechenprogramm WUFI ermittelten relativen Feuchten an den Dampfbremsen aus Papierfolie und Kunststoffolie (Bild oben) sowie des Wassergehalts in den auf den Dampfbremsen sich befindlichen Sporen (Bild unten).

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