

Schimmelpilze im Innenraum – eine Betrachtung aus bausubstanztechnischer und innenraumhygienisch-medizinischer Sicht vor dem Hintergrund der besonderen innenraumklimatischen Bedingungen in Kirchen und Sacralbauten.

Dr. med. Ulrich-Friedrich Schmelz,
UmAnLab Malsfeld, Buchenweg 20, 34323 Malsfeld, Tel.+Fax: 05661/4875
E.Mail: UmAnLab@aol.com

1. Einleitung:

„Pilze“ stellen ein eigenständiges, sehr umfangreiches Reich des Lebendigen dar: Im Gegensatz zu Pflanzen besteht die *Zellwand* der Pilze nicht aus Cellulose, sondern aus Chitin. Ferner ist als weitere taxonomische (klassifizierende) Besonderheit im Hinblick auf die *Zellmembranfette* in Abgrenzung zu tierischen Zellen kein Cholesterol und in Abgrenzung zu pflanzlichen Zellen keine Phytosterole vorhanden, sondern die Substanz Ergosterol. Das Vorhandensein von *differenzierten zellulären Stoffwechselräumen*, eines *Zellkerns* und *zellulärer Energiestoffwechselstrukturen* (Mitochondrien) grenzt Pilze darüber hinaus zu den Bakterien (Procaryonten) ab, bei denen diese genannten Strukturen fehlen.

Das Reich der Pilze kann weiterhin in viele Familien und Ordnungen unterteilt werden (z.B. Ständerpilze, Schlauchpilze, Jochpilze, etc.).

Speziell unter dem Begriff „Schimmelpilze“ werden unterschiedliche Pilzgattungen zusammengefasst, deren Kennzeichen eine (von wenigen Ausnahmen abgesehen) ungeschlechtliche Vermehrung durch vegetative Sporen ist. Die entsprechenden Pilzgattungen werden daher auch als „imperfekte Pilze“ oder „Fungi imperfecti“ bezeichnet.

Schimmelpilze sind ein natürlicher und relevanter Bestandteil der belebten Umwelt: Sie dienen auf Grund ihrer heterotrophen Stoffwechsellage (es werden *organische* Stoffe als Nährstoffe benötigt) in der Umwelt dem Abbau abgestorbener, organischer Substanz und damit der Wiederaufführung dieser in den natürlichen Stoffkreislauf (sog. Dissimilation) in Form von mineralischen Abbauprodukten. Pflanzen assimilieren diese anorganischen Stoffwechselprodukte durch ihren autotrophen Stoffwechsel wieder zu organischen Naturstoffen, so daß der biologische Stoffkreislauf geschlossen wird.

Die Vermehrung und Verbreitung von Schimmelpilzen erfolgt durch vegetative Sporen. Hierzu ist zu bemerken, daß Pilze mehrzellige Organismen darstellen; die Zellen sind in Form von Strängen angeordnet, diese Zellstränge werden als Hyphen bezeichnet. Die Summe aller Hyphen bildet ein Geflecht, das als Mycel bezeichnet wird. An den Enden einer jeden Hyphe können nun vegetative Zellen in Form von Sporen (Konidien) abgegeben werden. Im einfachsten Falle zerfällt die jeweilige Hyphe an ihren Enden in solche Sporen (Arthrosporen; z.B. bei *Geotrichum* sp.), es können aber auch recht filigrane spezielle Fruchtkörper (Konidiophoren) vorhanden sein, die die Sporen freisetzen (z.B. bei *Aspergillus* sp. oder *Penicillium* sp.). Die Form und Ausprägung der Konidien und Konidiophoren erlaubt im mikroskopischen Bild die Zuordnung eines Schimmelpilzes zu einer bestimmten Gattung (z.B. *Penicillium* sp.).

Sporen von Schimmelpilzen sind ein natürlicher Bestandteil jeglicher Raumluft und daher ubiquitär anzutreffen. Schimmelpilzsporen als natürliche Hintergrundbelastung stellen damit noch keine Problematik dar. Erst das Auskeimen dieser Sporen am „Falschen Ort“ (d.h. an Oberflächen im Innenraum) führt zur nachteiligen Beeinflussung der Bausubstanz und der Lufthygiene.

2. Disponanzfaktoren (Determinanten) für ein Auskeimen von Schimmelpilzsporen im Innenraum und damit die Manifestation des Befalls:

Damit ein Auskeimen von Schimmelpilzsporen und somit ein Befall der Bausubstanz im Innenraum möglich wird, sind verschiedene Determinanten (Kenngrößen) seitens der Standortbedingungen erforderlich.

Die obligaten Determinanten sind:

- Feuchte
- Gehalt der Bausubstanz an organischen Stoffen
- Temperatur

Als fakultative Determinanten können folgende Punkte festgehalten werden:

- Fehlender Lichtzutritt zur Bausubstanzoberfläche
- Unzureichende Luftzirkulation im Innenraum
- Unzureichende Luftwechselrate

Alles in allem können also ubiquitäre Schimmelpilzsporen der Luft an einem bestimmten Standort im Innenraum nur dann auskeimen, wenn praktisch alle obligaten Determinanten (wenigstens teilweise) erfüllt sind. Fakultative Determinanten wirken darüber hinaus noch verstärkend auf die Manifestation eines Befalls und die Befalls-Intensität.

Daher ist das nachfolgend abgebildete Schnittmengen-Modell der obligaten Faktoren in Ergänzung der Einbindung in die weiteren Kenngrößen sinnvoll:

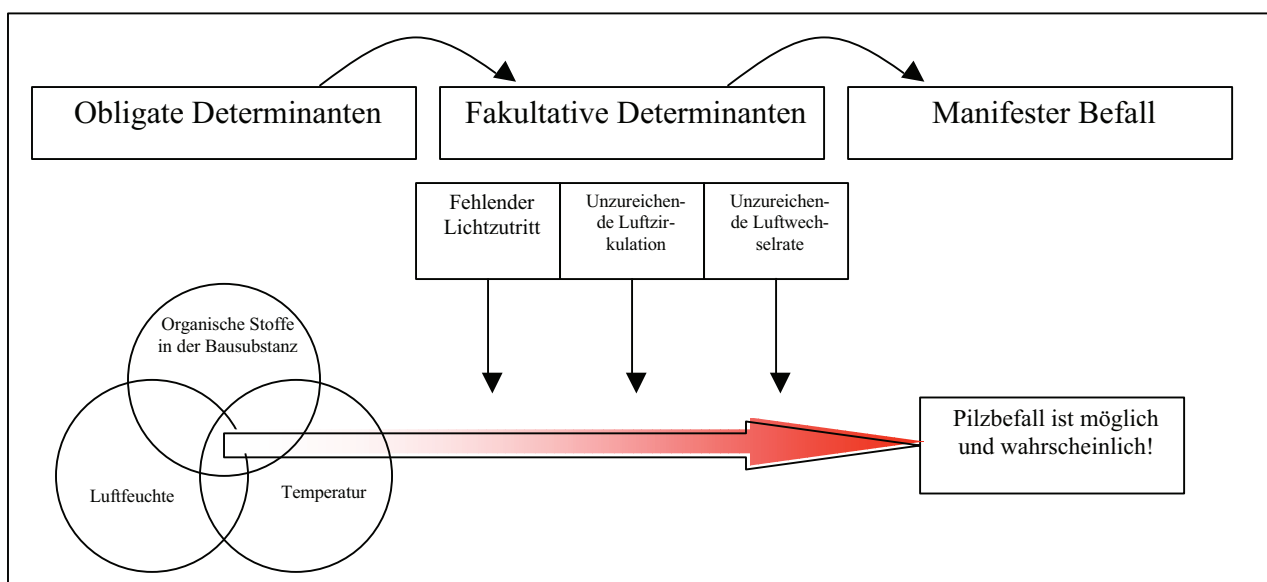


Abb. 1

Es ist gleichzeitig ersichtlich, daß die Einflussnahme auf nur eine der drei obligaten Determinanten ausreichend ist, um einen Pilzbefall zu verhindern. – In welcher Weise diese Einflussnahme gestaltet werden kann, ist nachfolgend dargestellt.

2.1 Luftfeuchte:

Im Hinblick auf die Luftfeuchte ist festzuhalten, daß ein Schimmelpilzwachstum der meisten Schimmelpilzgattungen zwischen 70% und 100% relativer Luftfeuchte möglich ist. Praktisch alle Gattungen keimen darüber hinaus bei kondensierender Feuchte (Sättigung von 100% ist überschritten) in Verbindung mit entsprechenden weiteren Standortfaktoren bevorzugt aus.

Die relative Luftfeuchte beschreibt den Anteil an Wasserdampf, der bis zur Dampfsättigung vorliegt (genau ausgedrückt: das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdampfdruck).

Wichtig: Die Dampfsättigung der Luft ist temperaturabhängig; bei niedrigerer Temperatur kann grundsätzlich weniger Dampf in der Luft bis zur Sättigung von 100% verteilt werden, als bei höherer Temperatur. Einer relativen Luftfeuchte von 100% entsprechen daher bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche absolute Wasserdampfmassen !

Temperatur	Maximale H ₂ O – Dampfsättigung:
0 °C	4,8 g/m ³
5 °C	6,8 g/m ³
10 °C	9,4 g/m ³
15 °C	12,8 g/m ³
20 °C	17,3 g/m ³
25 °C	23,1 g/m ³
30 °C	30,3 g/m ³
35 °C	39,6 g/m ³
40 °C	51,1 g/m ³

Tab. 1

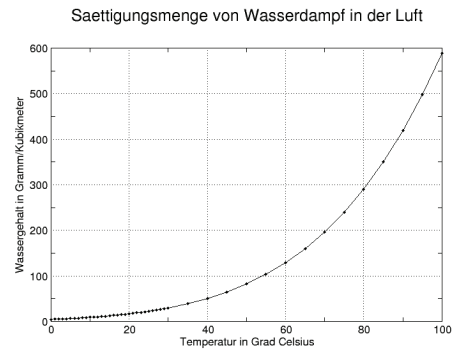


Abb. 2

Liegt die Dampfsättigung entsprechend Tab.1 beispielsweise für eine Lufttemperatur von 25°C bei 23,1 g Wasserdampf pro m³ Luftvolumen, so entspricht eine absolute Feuchte von 23,1 g/m³ einem Wert von 100% rel. Luftfeuchte. Ein Wasserdampfgehalt von 11,55 g/m³ würde dann 50% rel. Feuchte bei 25°C entsprechen.

Wichtig ist, daß es bei Überschreiten der temperaturabhängigen Dampfsättigung (meist durch Abkühlen der Luft bedingt) zum Auftreten von Kondensat (kondensierender Feuchte, Taubildung) kommt. Bei 25°C entspricht einer relativen Feuchte von 50% eine Dampfkonzentration von 11,55 g/m³. Nach Abkühlung der Luft auf 5°C entspricht einer absoluten Feuchte von 11,55 g/m³ schon eine rel. Feuchte von 169 % (da die Dampfsättigung = 100% rel. Feuchte für 5°C bei 6,8 g/m³ liegt) und zeigt damit eine Übersättigung. In der unmittelbaren Folge kommt es daher zum Auftreten von Kondenswasser (es würden in diesem Beispiel ca. 4,75 g Wasser pro Kubikmeter Luftvolumen als Kondenswasser z.B. an kühleren Oberflächen abgeschieden).

Die Temperatur, ab der bei einer absoluten Feuchte von 11,55 g/m³ Wasserdampf eine Sättigung vorliegt, ist (nach Tab. 1 und Abb. 3) bei ca. 15 °C anzunehmen.

Demnach wird die Temperatur, die unterschritten sein müsste, damit bei definierter (gemessener) rel. Luftfeuchte und Lufttemperatur eine Dampfsättigung erreicht wird, als Taupunkttemperatur bezeichnet.

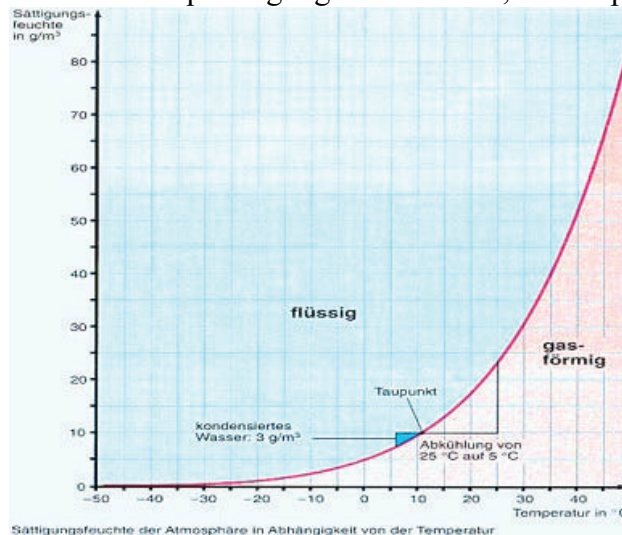


Abb. 3

Deutlicher und unmittelbar nachvollziehbar wird das Kondensieren an kälteren Oberflächen durch Taupunkttemperaturunterschreitung im Hinblick auf kalte Getränkegläser im Sommer. Um beim genannten Beispiel zu bleiben, stelle man sich z.B. ein ca. 5°C kaltes Bierglas vor, das bei den genannten sommerlichen Bedingungen (50% rel. Feuchte, 25°C Lufttemperatur) ausgeschenkt wird. Da die Temperatur der Glasoberfläche durch den 5°C kühlen Inhalt unter 15°C (Taupunkttemperatur für 25°C und 50% rel. Feuchte) liegt, kommt es zur Taubildung.

Was am Beispiel des Getränkeglases durchaus erwünscht ist, bereitet dem Schimmelpilzbefall im Innenraum in besonderer Weise den Weg. Insbesondere im Hinblick auf inkonstante Beheizungsregime

großvolumiger Bauwerkskonstruktionen kann dies problematisch sein, da hier meist rasch und kurzzeitig erwärmte, hohe Lufttemperaturen und (noch) niedrige Oberflächentemperaturen zu einer Taupunkttemperaturunterschreitung (im Sinne einer Kältebrücke) und damit zur Kondenswasserbildung an den Oberflächen (z.B. den Wänden) führen. Dies trifft insbesondere auf Kirchenräume und das darin befindliche Mobiliar samt der Instrumente zu. Häufig werden aufgrund einer zusätzlichen Unterbrechung der Luftströmung in den Raumecken, aber auch geschlossenen Orgelgehäusen und Chorgestühlen feuchte Stellen angetroffen, da hier eine Wärmeübertragung auf die Oberflächen durch Konvektion besonders schlecht erfolgt und zudem durch die unzureichende Luftströmung eine Abtrocknung des Oberflächenkondensats eingeschränkt wird.

Während die Beheizung quasi durch Dauer und Intensität die Kondensation regelt, ist doch die eigentliche Ursache des Feuchteintrags in die Innenraumluft zu betrachten. Die Ursachen dieses Feuchteintrags in die warme Raumluft geschlossener Räume können unterschiedlich sein:

2.1.1 Nutzerseitiger Feuchteintrag (Transpirationsfeuchte):

Jeder Mensch transpiriert ca. 50 mL Wasser in Form von Wasserdampf pro Stunde durch unmerkliches Schwitzen und Atmung in die Raumluft (sog. „Perspiratio insensibilis“). Bei z.B. 500 Personen im Raum werden daher auf diese Weise ca. 25 Liter Wasser in Form von Wasserdampf in die Raumluft allein bei einem einstündigen Aufenthalt (z.B. Gottesdienst) freigesetzt. Geht man von einem Raummaß von zum Beispiel $L*B*H = 40m * 20m * 15m$ (mittelgroßes, gotisches Gotteshaus) aus, so resultiert ein Luftvolumen von ca. 12000 m³ und für dieses Beispiel ein zusätzlicher Feuchteintrag in Form von Wasserdampf von ca. 2 g / m³.

Angenommen, die Luft eines solchen Kirchenraumes hätte zu Beginn des Gottesdienstes eine Temperatur von 25 °C und eine rel. Feuchte von 75%, dann resultiert eine absolute Feuchte von 17,33 g/m³. Durch den zusätzlichen Wasserdampfeintrag liegt nach der Veranstaltung eine absolute Feuchte von 19,33 g/m³ vor.

Eine Oberflächentemperatur der Kirchenwände von angenommenen 15°C führt schon zur Überschreitung der Dampfsättigung und damit zur Kondenswasserbildung (da bei 15°C maximal 12,8 g/m³ Wasser in Form von Dampf in der Luft gesättigt werden können, die Luft aber bereits 19,33 g/m³ Wasserdampf enthält). Die Oberflächentemperatur der Wände müsste in diesem Exempel daher mindestens ca. 21 °C betragen, um eine Kondenswasserbildung zu verhindern (die Temperatur von 21 °C entspricht der Taupunkttemperatur bei den angenommenen Luftverhältnissen).

2.1.2 Bauseitiger Feuchteintrag:

Auch weitere, rein bauseitige Ursachen, können zu einem Feuchteintritt in das Mauerwerk (Durchfeuchtung) und u.U auch zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchte (durch Verdampfen des eingedrungenen Wassers) führen. Wichtig ist hier, zunächst nach Leckagen der Regenrinnen und Dachentwässerungen, bzw. deren Fallrohre und nach Leckagen weiterer Entwässerungsleitungen zu suchen. Auch Frischwasserleitungen können verdeckte Leckagen aufweisen (z.B. an druckbelasteten Totleitungen), weswegen eine Leckortung bei begrenztem Feuchteintrag (z.B. eine größere Stelle an einer Wand zeigt Feuchtespuren) darüber hinaus empfehlenswert ist.

Nicht zuletzt muß bauseitig aufsteigende (sog. „ascendierende“) Feuchte ausgeschlossen werden. Bei grundwasserführendem Untergrund und unzureichender, bzw. defekter Horizontalsperrschicht kann Wasser aus dem Untergrund über die Kapillarasension im Mauerwerk aufsteigen und zu einer Durchfeuchtung des Mauerwerks führen. Typisch ist hier ein in Abhängigkeit der Wandhöhe abnehmender Wassergehalt der Bausubstanz („Baufeuchtegradient“).

Die Kausalursache des bauseitigen Feuchteintrages muß in der Regel durch umfangreichere, interdisziplinäre Untersuchungen (Ingenieure, Innenraumhygieniker, etc.) festgestellt und behoben werden.

2.2 Gehalt der Bausubstanz an organischen Stoffen:

Wie eingangs erwähnt, stellen Pilze heterotrophe Organismen dar, d.h. es werden fast ausschließlich organische Stoffe als Substrate (=Nährstoffe im weitesten Sinne) für den Energie- und Baustoffwechsel verwendet. In der natürlichen Umwelt werden diese Substrate in der Regel durch abgestorbenes Pflanzenmaterial dargestellt, hier haben Schimmelpilze ihren natürlichen Standort als Destruenten. Im Innenraum jedoch können verschiedene Materialien die im Hochbau und im Musikinstrumentenbau, speziell Orgelbau eingesetzt werden, ebenfalls als (falsches) Substrat von auskeimenden Sporen im Rahmen eines Befalls besiedelt werden:

- Holzteile (Oberflächen, vor allem im Sedimentationsbereich = horizontal)
- Leder (Balgfalten, Pulpeten)
- Filz (ubiquitäres Material an Windladen, Mechanik und Spieltisch)
- Mixtion (Grundierung für Vergoldungen)
- Organische Farbanstriche (Caseinfarben häufiger, als Acrylfarben)
- Leimverbindungen, insbesondere unter Verwendung von Warmleim (da dieser aus einem Naturstoff, namentlich dem Kollagen, besteht).

Nachteilig ist dies insbesondere im Hinblick auf den Orgelbau, da hier hohe Anforderungen an die Oberflächenkontinuität der verwendeten Hölzer und die Stabilität und Dichtigkeit von Leimverbindungen gestellt werden. Ferner müssen im Orgelbau auch Lederteile (wie Balgfalten, Zwickel, Schwimmerbälge und Leder-Pulpeten) im Hinblick auf Dichtigkeit und mechanische Leichtgängigkeit hohen Anforderungen standhalten, die durch einen Pilzbefall in Frage gestellt werden. Daher stellt der bauseitige Werkstoff eine natürliche Determinante für einen Schimmelpilzbefall dar, die direkt und unmittelbar allein vor dem Hintergrund der Natur der Sache nicht beeinflusst werden kann und in vielen Fällen nicht beeinflusst werden muß. Es kann eventuell eine Konservierung oder mikrobiostatische Imprägnierung der Oberflächen erfolgen.

Befall an organischen Stoffen (Holz, Leder, Filze) hat daher immer den Wert eines Frühindikators für innenraumklimatische Defizite. Es sollten entsprechende Maßnahmen, bzw. Ursachen (vor allem unter Berücksichtigung des unter 2.1 gesagten) gesucht werden, bevor es zu einer Progression des Befalls kommt.

2.3 Temperatur:

Aus Sicht der Ökologie kann Schimmelpilzen ein sog. euryöker, mesothermer Gedeihbereich zugewiesen werden. Das bedeutet, daß Schimmelpilze im Gegensatz zu zum Beispiel bestimmten bakteriellen Erregern mit hohen Standortansprüchen, über einen weiten Temperaturoptimumbereich ein nennenswertes Wachstum durch Zellteilung aufweisen. Dieser Temperaturbereich umfasst (obgleich in Abhängigkeit der einzelnen Gattung Unterschiede bestehen können), ein Intervall zwischen +10°C und +40°C.

Das hat zum einen zur Konsequenz, daß im üblichen Innenraum-Temperaturbereich grundsätzlich Schimmelpilze gedeihen können, zum anderen hat dies zur Konsequenz, daß alleinige Veränderungen der Luft- und Oberflächentemperatur mit dem Zweck einer nennenswerten Hemmung des Schimmelpilzwachstums mit innenraumspezifischen Behaglichkeitsansprüchen nicht in Einklang gebracht werden können (Temperaturen < 10°C oder > 40°C).

2.4 Fakultative Determinanten:

Einführend wurden fehlender Lichtzutritt, mangelnde Luftzirkulation und eine unzureichende Luftwechselrate als fakultative Determinanten genannt. Diese drei Aspekte sollen hier nur kurz betrachtet werden.

2.4.1 Fehlender Lichtzutritt:

Da Pilze im Hinblick auf oxidativen Stress empfindlich reagieren (antioxidative Stoffwechselprozesse sind auf zellulärer Ebene nur gering ausgeprägt), führen sämtliche Oxidationsvorgänge zur Hemmung des Pilzwachstums. Licht, im UV-Bereich noch wirksamer als im sichtbaren Bereich, bedingt immer eine gewisse Sauerstoffradikalbildung, insbesondere im Zugesein von Wasser. Daher führt Lichtzutritt im weitesten Sinne zu einem oxidativen Stress, der ein mikrobiologisches Pilzwachstum in gewissen Grenzen hemmt. Fehlender Lichtzutritt wird vor allem im Hinblick auf Chorgestühle und Orgelgehäuse beobachtet. Es kann daher durchaus sinnvoll sein, in kunstvoller Weise geschlossene Oberflächen (durch z.B. Bohr-Ornamente) für Licht- und Luftzutritt zu öffnen.

2.4.2 Unzureichende Luftzirkulation:

Mangelnde Luftzirkulation bedingt eine unzureichende Erwärmung der Bausubstanzoberflächen durch Konvektion der warmen und geheizten Raumluft und verursacht auf diese Weise Kältebrücken mit lokaler, oberflächennaher Taupunkttemperaturunterschreitung. Es entsteht das für einen Befall disponierende Oberflächenkondensat. Darüber hinaus kann in Verbindung mit mangelnder Luftzirkulation kondensierte Oberflächenfeuchte umgekehrt in geringerer Weise durch Verdampfung abtrocknen, was dazu führt, daß kondensierte Feuchte vor Ort an der Oberfläche verbleibt. Die unzureichende Luftwechselrate führt zu einer unzureichenden Abfuhr von im Rahmen der Nutzung mit Wasserdampf angereicherten Luft (vergl. Kapitel 2.1) nach außen. Daher sollten, wie zuvor unter 2.1 erwähnt, regelmäßige, kurzzeitige Stoß- oder (besser) Querlüftungen nach größeren Veranstaltungen durch Luftwechsel und Luftaustausch mit der Außenluft einen überschüssigen Feuchteeintrag eliminieren.

2.5 Konsequenz der Betrachtung der innenraumklimatischen Faktoren:

Als allgemeine Konsequenz für den Innenraum, speziell für den Kirchenraum und das Kircheninventar, kann daher von den drei obligaten Faktoren nur die Determinante „Luftfeuchte“ im Rahmen der Nutzung nennenswert beeinflusst werden. Der Gehalt der Bausubstanz an organischen Stoffen ist eine bausubstanzabhängige, wenig beeinflussbare Größe und die Temperatur kann nicht ohne Einbußen der Behaglichkeit in einen Bereich hin verändert werden, der ein Schimmelpilzwachstum ausschließt. Da aber im wesentlichen die Luftfeuchte in Verbindung mit der Kondensationstemperatur als Stellglied beeinflussbar ist, und die Schnittmenge aus allen drei Determinanten (vergl. Abb.1) von Relevanz ist, kann durch Beeinflussung der Feuchte ein Pilzbefall umgangen werden. Im Hinblick auf Prävention und Vermeidung gilt das unter 2.1 beschriebene.

3. Der manifestierte Befall und dessen Auswirkungen:

Ein manifestierter Schimmelpilzbefall hat immer gravierende Auswirkungen auf die Bausubstanz und die Innenraumhygiene. Die wesentlichen Auswirkungen sind nachfolgend zusammengefasst:

3.1 Bautechnische Auswirkungen:

- Bausubstanzkorrosion im Sinne der Veränderung von Holzoberflächen:
 - Oberflächenveränderungen
 - Stockflecken
 - Lockerung von Leimverbindungen
 - Undichtigkeiten (Heuler und Durchstecher an Orgeln), insbesondere wenn Leimverbindungen im Kanzellenbereich betroffen sind.
 - Beeinträchtigung der Stabilität tragender Teile.
 - Befall von Lederteilen
 - Versprödung
 - Undichtigkeiten

Grundsätzlich kann festgehalten werden, daß ein Schimmelpilzbefall im Innenraum bei Nichtbeachten zu einer Schädigung und zu einem Wertverlust führt, der immens ist und dessen Ausmaß in der Regel auf den ersten Blick nicht zu erfassen ist. Kulturgüter vergangener Generationen und historisch wertvolle Instrumente können auf diese Weise innerhalb weniger Jahre irreparablen Schaden nehmen. Daher ist die explizite und regelmäßige Kontrolle des Kircheninnenraums (auf die rein „organoleptischen“ Parameter, wie: moderiger Luftgeruch, auffällige Stockflecken, wiederkehrende, unerklärliche Undichtigkeiten bei Orgeln, sich lösende Vergoldungen und Tastenbeläge oder Leimverbindungen allgemein) wichtig und sinnvoll.

Im Zweifelsfall kann eine Materialprobe und / oder eine Luftsedimentationsprobe auf Schimmelpilzbefall hin untersucht werden (in der Regel eine Bohrmehl-Mischprobe). Solche Dienstleistungen im Hinblick auf eine mycologische Begutachtung werden durch das Labor des Autors in Verbindung mit einer umfangreichen Beratung durchgeführt.

Einige beispielhafte Abbildungen des makroskopischen Aspekts von Schimmelpilzbefall an Orgeln:



Abb.4: Schimmelpilzbefall an Holzpfеifen in geschlossenem Orgelgehäuse



Abb.5: Schimmelpilzbefallenes Leder (Balgfalten)



Abb.6: Schimmelpilzbefall an Leimanstrich (Bolsleimrot) am Gesims des Orgelgehäuses

3.2 Gesundheitliche Auswirkungen:

- Allergisierung durch Schimmelpilzsporen in der Raumluft
- Gesundheitsbeeinträchtigung durch partikelgebundene Mycotoxine
- Unästhetische Empfindung durch unangenehm riechende, leichtflüchtige Stoffwechselprodukte des Pilzes (MVOCs, „mutziger Kellergeruch“).

Während die bautechnischen Auswirkungen selbsterklärend und aus der Praxis im allgemeinen bekannt sind, sollen die gesundheitlichen Auswirkungen an dieser Stelle etwas intensiver betrachtet werden. Grundsätzlich stellen Sporen und Mycelbestandteile von Schimmelpilzen starke Antigene dar. Es handelt sich also um Fremdeiweiße, die bei Kontakt mit Schleimhaut (im Rahmen des Einatmens) oder (seltener) bei Kontakt mit der Haut zu einer immunologischen Reaktion führen können. Liegt eine

gewisse Disposition eines Menschen zu überschießenden Immunreaktionen vor, so kann der wiederholte Kontakt (regelmäßige Gottesdienstbesucher, Pastoren, Kirchenmusiker) mit solchen Pilzbestandteilen, beispielsweise als Staub in der Raumluft zu einer Sensibilisierung mit der Folge einer überschießenden Immunreaktion führen. Diese überschießende Immunreaktion wird als Allergie bezeichnet. Für den Betroffenen ist dies in vielen Fällen folgenschwer, denn chronische Atemwegserkrankungen, nicht selten ein allergisches Asthma, können auftreten.

Mycotoxine sind meist kleinmolekulare Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen, die an die Umwelt abgegeben werden. Nicht selten kann es im Innenraum zu einer partikelgebundenen Freisetzung dieser Stoffe in die Luft kommen. Als Partikel kommen mineralische und organische Staubpartikel allgemein oder Sporen des Pilzes direkt in Frage. In Abhängigkeit der Schimmelpilzgattung sind die gebildeten Mycotoxine sehr variabel. Einige Pilzgattungen produzieren praktisch keine Mycotoxine, andere wiederum (z.B. die Gattungen *Penicillium* sp. und *Aspergillus* sp.) können hochtoxische Mycotoxine bilden. Es seien hier die Aflatoxine als Stoffwechselprodukte verschiedener *Aspergillus*-Spezies erwähnt, ferner noch das Ochratoxin A und das Patulin im Hinblick auf *Penicillium*-Spezies. Aflatoxine wirken cancerogen, sie können Lebertumore verursachen; Ochratoxin A und Patulin wirken als Neurotoxin, bzw. als Nierengift. Welche Wirkung wirklich befürchtet werden muß, hängt von komplizierten Schwellendosen und Expositionshäufigkeiten ab. Aus Gründen der allgemeinen Primärprävention kann daher gesagt werden, daß sicherheitshalber im Innenraum eine nennenswerte (mit dem Auge sichtbare) Schimmelpilzanzucht (meist durch die im Kapitel 2 beschriebenen Bedingungen verursacht) nicht zu tolerieren ist. Daher ist hier die Prävention eines Pilzbefalls ebenso wichtig, wie die Bekämpfung einer aktuell vorhandenen Befallsmanifestation.

Unangenehm riechende, leichtflüchtige Stoffwechselprodukte des Pilzes werden als MVOCs bezeichnet (mycological volatile organic components). Es handelt sich um Stoffwechsel- und Zwischenprodukte von Schimmelpilzen. Kennzeichen ist eine ausreichende Flüchtigkeit (bedingt durch einen meist niedrigen Siedepunkt und einen hohen Dampfdruck). Diese Stoffe verursachen einen erdigen bis penetrant-unangenehmen Geruchseindruck des Innenraums. Einige der Substanzen sind inzwischen identifiziert (z.B. Geosmin, Methyl-isoborneol oder Octen-3-ol). In wie weit eine organische Gesundheitsbeeinträchtigung (als akute oder chronische Toxizität) zu erwarten ist, ist unklar. Tatsache ist jedoch eine ästhetische Gesundheitsbeeinträchtigung im Sinne einer Aversion. Nicht selten wird von empfindlichen Personen bei Vorhandensein dieser Geruchsstoffe über Unbehaglichkeit und Missempfindungen geklagt (im Sinne einer Form des sog. „Sick-building-Syndroms“).

Infektionen durch Schimmelpilze im Sinne einer Besiedelung von Körperhöhlen (z.B. Nasennebenhöhle) stellen hingegen absolute Raritäten dar. Sie betreffen meist immunsupprimierte Personen im Sinne von opportunistischen Infektionen. Für einen stoffwechselgesunden Menschen stellen Schimmelpilze als Infektionserreger daher praktisch keine Relevanz dar.

4. Bekämpfung des Befalls:

4.1. Vorbeugen statt Bekämpfen:

Besonders relevant ist die Vorbeugung eines Befalls. Diese ist vor allem durch Beeinflussung der Luftfeuchte im Sinne der Kondensationsfeuchte als eine der drei obligaten Determinanten nach Kapitel 2 möglich. Es können daher folgende Ziele für die Praxis formuliert werden:

- Kondenswasserbildungen an Oberflächen sollen und müssen, soweit irgend möglich – vermieden werden!
- Daher möglichst geringe Lufttemperatur – Oberflächentemperaturdifferenzen durch konstante Beheizung schaffen. Eine geringe Beheizung ist daher auch im Winter sinnvoll, um ein Auskühlen von Oberflächen zu vermeiden.
- Lufttemperaturänderungen immer gleitend und möglichst langsam mit ca. $0,25^{\circ}\text{C} / \text{h}$ vornehmen, damit die genannten Temperaturdifferenzen vermieden werden und Zeit zum Ausgleich

zwischen Luft- und Oberflächentemperatur eingeräumt wird, da Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, und die Konvektion (Wärmeübertragung) über die Luft auf die Oberfläche nur sehr protrahiert erfolgt.

- Nach Gottesdiensten / Konzerten oder Veranstaltungen im Kirchenraum soweit irgend möglich, immer Stoß- und Querlüftungen vorsehen, damit die Transpirationsfeuchtelast der Besucher aus dem geschlossenen Raum gefördert wird. Die Dauer der Lüftungsmaßnahmen sollte jedoch ca. 10 Minuten im Winter nicht überschreiten, damit eine Auskühlung von Oberflächen bei kälterer Außenluft nicht erfolgt.
- Bei unklaren Feuchteverhältnissen im Innenraum zusätzlich auch nach bauwerksseitiger Mauerdurchfeuchtung und deren Ursachen suchen (lassen).
- In geschlossenen Verhältnissen im Innenraum (z.B. in Inneren von Orgelgehäusen) ggf. hygroskopische Trockner (hygroskopische Salzpackungen auf einem Abscheidesieb) aufstellen.
- Die Raumbooberflächen sollten zudem, wenn sie im Bereich der Sacralbauten überhaupt gestrichen werden, mit einer wasserdampfdurchlässigen Farbe gestrichen werden. Diese erlaubt möglicherweise gebildetem Oberflächenkondenswasser die Diffusion in das Mauerwerk und die langsame Exhalation über die Zeit. Eine unmittelbare Kondenswasserauflage der Bausubstanzoberfläche wird auf diese Weise verhindert.
- Wird der Behaglichkeitsbereich (sog. Normklima, nach DIN 1946), der von der rel. Luftfeuchte, der absoluten Luftfeuchte und der durchschnittlichen Raumtemperatur (gefühlte Temperatur, bei Abwesenheit von Luftströmung der Mittelwert aus den Größen Oberflächen- und Raumlufttemperatur) determiniert wird, im Innenraum (annähernd) eingehalten, so ist gleichzeitig das Auskeimen und ubiquitären Schimmelpilzsporen unwahrscheinlich, da die innenraumklimatischen Kenngrößen des Behaglichkeitsbereichs sowohl kondensierende Feuchte, als auch gleichzeitig Bereiche der rel. Luftfeuchte ausschließen, die ein Schimmelpilzwachstum bedingen. Ferner wird umgekehrt eine zu niedrige Feuchte im Sommer bei Beachtung des Behaglichkeitsbereiches verhindert, die zu Versprödung von Holzteilen und Rissen führen könnte (in der Regel $< 30\%$ rel. Luftfeuchte).

Es kann daher der für die menschliche Empfindung der Behaglichkeit zutreffende innenraumklimatische Bereich unmittelbar auch für die Bausubstanz jeglicher Natur angewendet werden.

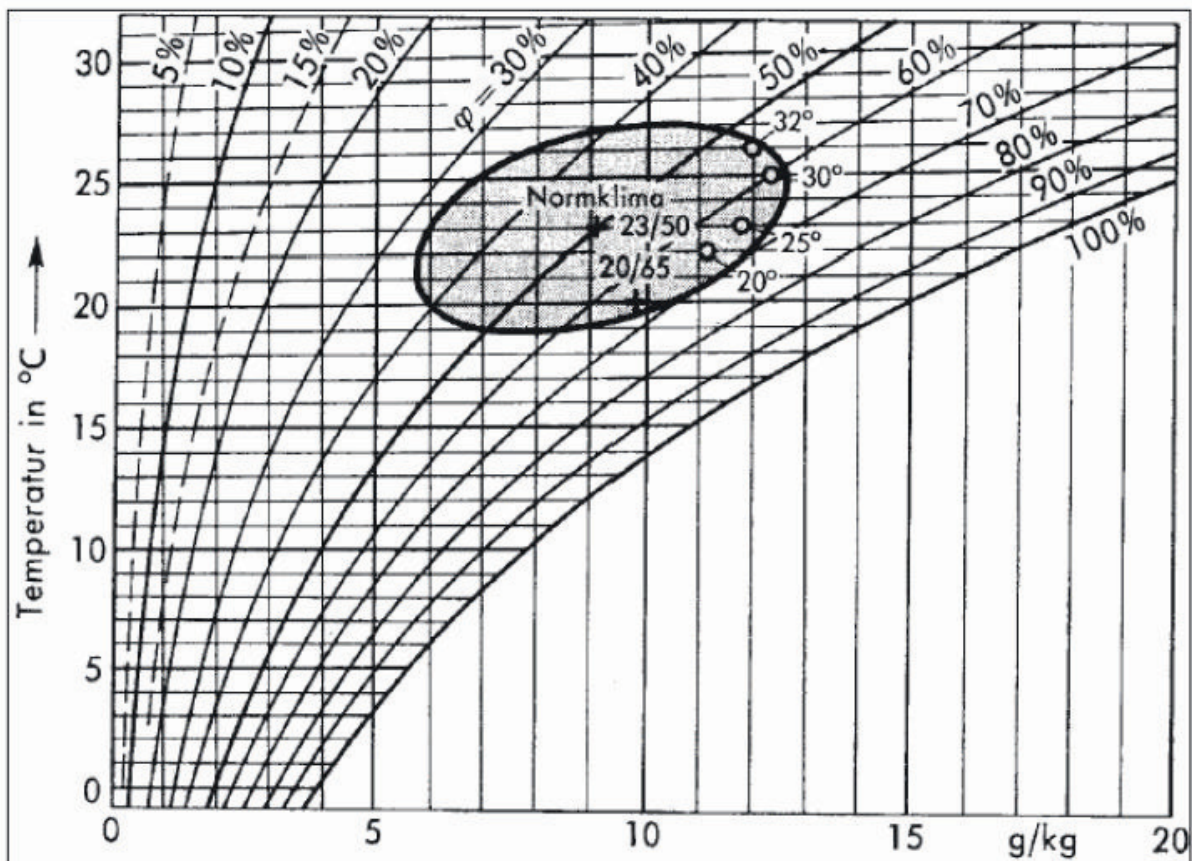


Abb. 7

4.2 Bekämpfen, wenn ein Schimmelpilzbefall schon manifestiert ist:

Ein manifestierter Schimmelpilzbefall im Innenraum ist wegen der in Kapitel 3 genannten Auswirkungen auf die Innenraumhygiene und die Bautechnik obligat sanierungsbedürftig!

Übliche Schimmelpilzmittel enthalten oft nur kurzwirksame Stoffe (Alkohole), bzw. Stoffe mit zu schwacher, nicht abschätzbarer Wirksamkeit (chlorabspaltende Verbindungen, wie Natriumhypochlorit, die sich während der Lagerung in unwirksame Produkte zersetzen, so daß zum Zeitpunkt der Anwendung nicht klar ist, wie viel Wirkstoff noch vorhanden ist) oder Stoffe mit generell zu schwachem mikrobiozidem Wirkpotential (z.B. quaternäre Ammoniumsalze = kationische Tenside in wässriger Verdünnung). Oft sind sogar Stoffe enthalten, die eine aus medizinischer Sicht eine innenraumhygienische Problematik an sich darstellen. In diesen Fällen wird eine mikrobiologische Problematik im Innenraum unter Erkaufen einer neuen Problematik vermeintlich beseitigt, bei genauem Betrachten jedoch dadurch nur verschoben. Solche für den Innenraumeinsatz bedenklichen Stoffe sind z.B. die akut toxischen Organozinnverbindungen oder das chronisch toxische Formaldehyd, bzw. die formaldehydabspaltenden Verbindungen (wegen vermuteter cancerogener Wirkungen) oder das fruchtschädigende Carbendazim.

Daher sollten nur Mittel verwendet werden, die eine sofortige mikrobiozide Wirkung im Sinne einer Desinfektion der behandelten Oberfläche in Verbindung mit einer nachhaltigen Wirkung gegen Neubefall (sog. Remanenzwirkung) vereinen. Ein solches durch den Autor entwickeltes, von der Landesgewerbeanstalt Bayern unabhängig auf die Wirksamkeit gegen Schimmelpilze getestetes und darüber hinaus gebrauchsmusterrechtlich geschütztes Präparat kann über die Firma des Autors dieses Artikels (UmAnLab Malsfeld) bezogen werden (Präparat: Fungo-EX-Forte). Das Präparat ist in umfangreicher Referenz im In- und Ausland mit sehr gutem Erfolg verwendet worden. Es kann im Orgelbau auf sämtlichen Oberflächen und darüber hinaus auch auf mineralischen Oberflächen (Putz, Stuck, Mauerwerk, Anstriche) verwendet werden.

Der Autor steht ferner im Hinblick auf die mikrobiologische Untersuchung und Begutachtung unklarer Fälle von Schimmelpilzen im Innenraum, insbesondere im Hinblick auf Orgeln, zur Verfügung.