

Schimmelpilze in Innenräumen kennen viele Menschen aus eigener Erfahrung. Die möglichen Gesundheitsgefahren, welche mit den von Schimmelpilzen gebildeten Sporen und Substanzen in Verbindung gebracht werden können, sind ein ständig wiederkehrendes Thema in den Medien. Die Beurteilung dieser Problematik schwankt hierbei zwischen Verharmlosung und Übertreibung. Diese Broschüre bietet umfassende Informationen über die Biologie der Schimmelpilze und die möglichen Gesundheitsgefahren, die von einem Schimmelpilzbefall im Innenraum ausgehen können. Zudem erfährt der Leser / die Leserin, wie Schimmelpilze nachgewiesen werden können und was man gegen Schimmelpilzwachstum unternehmen kann. Der Leitfaden richtet sich damit an Mieter und Vermieter ebenso wie an Architekten, Behörden und Experten der Gebäudewirtschaft.

Schimmelpilze im Innenraum– sind sie nun Mücke oder Elefant?

Die Veröffentlichungen in der „**Bremer Reihe Umwelt und Arbeit**“ bieten kritische Informationen zu den Auswirkungen von gefährlichen Stoffen, die im privaten Bereich und am Arbeitsplatz Verwendung finden. Herausgeber der Bremer Reihe Umwelt und Arbeit sind der Verein für Umwelt- und Arbeitsschutz e.V., das Bremer Umweltinstitut e.V. und die Messstelle für Arbeits- und Umweltschutz e.V.

Preis: 8,- €

Schimmelpilze - ein Ratgeber und Leitfaden

Schimmel an der Mücke oder **Elefant ?** Wand

Ein Ratgeber und Leitfaden

Bremer Umweltinstitut e.V.

Schimmelpilze **an der Wand** **- Mücke oder Elefant?**



Herausgeber:

Bremer Umweltinstitut e.V.

Autoren:

Thomas Fangmeyer
Michael Köhler
Dr. Norbert Weis
Dr. Christian Zorn

Umschlaggestaltung:

Ines Hillmann

Satz und Layout:

Grübeltäter KG, Melanie Klaus & Alex Besier

Druck:

Perspektiven Offsetdruck GmbH

2.Auflage

Januar 2006 501.-1000

Copyright 2003 by

Bremer Umweltinstitut e.V.
Fahrenheitstr. 1, 28359 Bremen50
Tel.: 04 21 / 7 60 78 Fax: 04 21 / 7 14 04
mail@bremer-umweltinstitut.de
www.bremer-umweltinstitut.de

Alle Rechte vorbehalten

Preis: € 8,- (zzgl. MwSt., zuzüglich Porto und Verpackung)

Mit finanzieller Unterstützung des Senators für Bau und Umwelt der Hansestadt Bremen

ISBN 3 – 9803930 – 5 – 4

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Herausgeber

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Teil A: Ein bisschen Mikrobiologie muss sein.....	9
1. Begriffliche Grundlagen allgemeiner Mikrobiologie.....	9
1.1. Mikrobielles Wachstum ist Zellvermehrung	9
1.2. Zellvermehrungsphasen von Mikroorganismen.....	10
2. Biologie der Schimmelpilze.....	11
2.1. Morphologie der Schimmelpilze	12
2.1.1. Das Mycel.....	13
2.1.2. Die Fortpflanzungsorgane	15
2.2. Systematik der Schimmelpilze	18
2.3. Stoffwechsel der Schimmelpilze.....	20
2.3.1. Sekundärmetabolite – Mykotoxine und mVOCs	21
2.4. Verbreitung der Schimmelpilze	23
2.4.1. Lebensbedingungen der Schimmelpilze	24
2.4.2. Vorkommen der Schimmelpilze „unter freiem Himmel“	28
2.4.3. Vorkommen von Schimmelpilzen in Innenräumen.....	30
Teil B: Schimmelpilze im Lebensumfeld des Menschen: „Jekyll and Hyde“	34
3. Schimmelpilze als „Nützlinge“	34
4. Schimmelpilze als Schädlinge	37
4.1. Gesundheitsgefahren durch Schimmelpilze	37
4.1.1. Allergische Erkrankungen.....	41
4.1.2. Toxische Wirkungen oder „Mykotoxikosen“	48
4.1.3. Infektionen oder Mykosen.....	52
4.1.4. Auswirkungen der „Microbial Volatile Organic Compounds“ (mVOC)	58
4.1.5. Psychosoziale Aspekte.....	58
4.2. Materialzerstörung durch Schimmelpilze.....	60
Teil C: Nachweisverfahren und Bewertungsgrundlagen	64
5. Nachweis von Schimmelpilzbelastungen in der Raumluft.....	66
5.1. Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft	67
5.2. Nachweis der Gesamtzahl toter und lebender Schimmelpilzzellen in der Raumluft („Total Count“)	73
5.3. Bestimmung der Konzentration von mVOCs in der Raumluft.....	77

6. Nachweis von Schimmelpilzbelastungen im Hausstaub	79
6.1. Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub	80
6.2. Nachweis von Mykotoxinen im Hausstaub	84
6.3. Nachweis von Schimmelpilz-Allergenen im Hausstaub	85
7. Nachweis von Schimmelpilzbelastungen in und auf sonstigen Materialien	87
7.1. Direkte Kultivierung einer Abklatschprobe	88
7.2. Indirekte Kultivierung einer suspendierten Materialprobe	88
7.3. Klebefilm-Abriß-Präparat (Oberflächenkontaktprobe)	89
7.4. Direkte mikroskopische Untersuchung einer Materialprobe	89
7.5. Zusammenfassung der Bewertungsmaßstäbe für die Untersuchung von Materialproben	90
8. Mess- und Bewertungsstrategien des Bremer Umweltinstitutes	91
8.1. Probenahmeverfahren des Bremer Umweltinstitutes	92
8.1.1. Luftproben	92
8.1.2. Staubproben	93
8.1.3. Materialproben	93
8.2. Bewertungsgrundlagen des Bremer Umweltinstitutes	94
8.3. Vom Bremer Umweltinstitut nicht angewandte Nachweisverfahren	98

Teil D: Vorbeugung vor und Sanierung von

Schimmelpilzbefall im Innenraum	100
9. Die Kontrolle der Feuchtigkeit ist der Schlüssel	100
10. Wo kommt die Feuchtigkeit her?	100
11. Wasserdampf und die relative Luftfeuchtigkeit	102
12. Wie gelangt das Wasser in die Baumaterialien?	105
12.1. Die Wasseraufnahme von Baumaterialien durch Kondensation	105
12.1.1. Wärmebrücken	106
12.1.2. Richtig isolieren – keine „Flickschusterei“	111
12.1.3. Problematiken bei „Niedrigenergiehäusern“	111
12.2. Weitere Mechanismen der Wasseraufnahme	112
13. Dem Schimmelpilzbefall vorbeugen	114
13.1. Vermeiden von bauseitigen Ursachen für Feuchtigkeitschäden bzw. Schimmelpilzbefall	115
13.2. Richtiges Lüften und Heizen	116
13.3. Andere vorbeugende Maßnahmen	120
14. Den Schimmelpilzbefall sanieren	121
14.1. Beratung und Bestandsaufnahme	121
14.2. Sanierung	124
14.2.1. Sanierung eines kleineren Schimmelpilzbefalls	125
14.2.2. Sanierung eines größeren Schimmelpilzbefalls	127

Teil E: Schimmelpilze in der Wohnung –

Wer hat „Schuld“?	128
15. Rechte und Pflichten des Mieters	129
16. Rechte und Pflichten des Vermieters	130
17. Wer trägt die Beweislast?	130
Anhang	131
I. Wichtige Gattungen typischer Innenraum – Schimmelpilze, deren morphologische Kennzeichen und Vorkommen	132
II. Einige wichtige Mykotoxine	133
Glossar	139
Literaturverzeichnis	148
Das Bremer Umweltinstitut	153
Danksagung	154
Erweiterungen und Überarbeitungen in der 2. Auflage (Jan. 06)	155
Erweiterung:	
Kurzinformationen zu Actinomyceten	155
Überarbeitet in der 2. Auflage:	
Kap. 5.1: Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft	157
Überarbeitet in der 2. Auflage:	
Kap. 5.2: Nachweis der Gesamtzahl toter und lebender Schimmelpilzzellen in der Raumluft („Total Count“)	159
Überarbeitet in der 2. Auflage:	
Kap. 6.1: Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub	160
Überarbeitet in der 2. Auflage:	
Kap. 8.1: Probenahmeverfahren des Bremer Umweltinstitutes	160

SCHIMMELPILZE

Einleitung

Das vor drei Tagen erst gekaufte Brot an der Anschnittstelle von blau-weißen Punkten übersät, die Orange im Obstkorb, matschig und zur Hälfte von einer blau-grünen, pelzigen Schicht überzogen und die Silikonfugen in der Duschkabine von einem hartnäckigen Belag schwarz verfärbt - Schimmelpilze sind unvermeidliche Begleiter unseres Alltags und begegnen uns an den unterschiedlichsten Orten. Doch wie kommt es dazu, dass das vormals Unversehrte augenscheinlich „über Nacht“ verdirbt, durch Veränderung seiner Struktur und der häufigen Ausbildung des typischen, „schimmlichen“ Geruchs uns den Gebrauchswert einer Sache schmälert, wenn nicht gar gänzlich nimmt?

Der Verderb von frischen Lebensmitteln wie von Obst, Gemüse und Brot durch „Schimmel“ ist Ihnen vermutlich nicht unbekannt. Ein Verzehr von derart verschimmelten Lebensmitteln kommt uns nicht in den Sinn – zum einen, weil das Wissen um die verschiedenen Giftstoffe, die Schimmelpilze bilden können, weit verbreitet ist und uns zur Vorsicht im Umgang mit Schimmelpilzen mahnt, zum anderen weil uns eine natürliche, angeborene und anerzogene Abscheu davon abhält, schimmeliges Essen zu verzehren.

Doch der Schimmelpilz begegnet uns nicht nur auf Lebensmitteln. Sehr häufig findet man ihn auch auf Tapeten, an Fensterrahmen und an den schon oben angeführten Silikonfugen z.B. in der Duschkabine (sowie an unzähligen weiteren Orten innerhalb von Innenräumen). Vor allem mit dieser Form von Schimmel soll sich diese in erster Linie an interessierte und betroffene Verbraucher gerichtete Broschüre hauptsächlich befassen. Wenn die meisten Menschen den Verzehr eines verschimmelten Apfels dankend ablehnen würden, aus Ekel sowie aus Vorsicht, wie verhält es sich dann mit der verschimmelten Tapete? Es ist absolut normal, wenn man sich beim Anblick von Schimmelflecken in einer Wohnung, zumal wenn es die eigene ist, unbehaglich fühlt oder sich sogar ekelt. Und es ist wichtig und richtig, dies als Makel auch ernst zu nehmen. Gibt es darüber hinaus aber auch eine konkrete gesundheitliche Gefährdung, die, vergleichbar mit dem Verzehr von verschimmeltem Essen durch die Giftstoffe der Schimmelpilze, von einem solchen Schimmelpilzbefall ausgeht? Ein damit verbundenes gesundheitliches Gefährdungspotential, welches dazu führt, dass ein Schimmelpilzbefall in der Wohnung nicht nur das psychische, sondern auch das körperliche Wohlbefinden direkt beeinflusst?

So wie eine Pflanze nicht ohne Licht leben kann, so braucht der Schimmelpilz für sein Gedeihen ausreichend viel Feuchtigkeit. Das Material, auf dem ein Schimmelpilz zu wachsen anfängt, muss in der Regel schon reichlich viel Wasser enthalten. Entzieht man dem Pilz dieses Wasser, so wird er absterben, und so lange das Material trocken bleibt, wird sich hier kein Schimmel mehr zeigen. Lernen Sie, den Feuchtigkeitshaushalt Ihrer Wohnung zu kontrollieren, und Sie werden auch mit dem Schimmel fertig. Dieses Wissen möchten wir Ihnen ebenfalls mit dieser Broschüre vermitteln.

„Schimmelpilze in der Wohnung“ – das ist fast schon ein „Modethema“, das einem in der gegenwärtigen Zeit häufig begegnet. Die Qualität der Beiträge hierzu ist gemischt, die einen sind fachlich kompetent, dafür manchmal „staubtrocken“, die anderen peppig

aufbereitet, jedoch mangelt es ihnen zuweilen an Hintergrundwissen. Vielleicht fragen Sie sich, warum Sie diesen dicken „Wälzer“ lesen sollen, wenn Sie doch nur etwas gegen den Schimmelfleck an der Tapete hinter Ihrem Schlafzimmerschrank unternehmen wollen. Nun, eines sei vorangestellt: es gibt meist keine „einfache“ Lösung für dieses Problem. Diese zusammengewürfelte Gruppe mikroskopisch kleiner, trickreicher Überlebenskünstler ist mit ihren vielen verblüffenden Eigenschaften schon lange Gegenstand mikrobiologischer Forschung. Sie langfristig von einem Wachstum in Ihrer Wohnung abzuhalten, erfordert zumindest die Grundbegriffe ihrer Biologie zu kennen.

Schimmelpilzprobleme sind zumeist komplex. Daher kann es für die meisten Probleme mit Schimmelpilze auch keine einfache Lösung geben.

Genau dieses „Handwerkszeug“ möchten wir Ihnen mit dieser Broschüre vermitteln. Der Anlass für die Arbeit an einer allgemein verständlichen, zugleich dennoch fachlich fundierten Informationsbroschüre lag nicht zuletzt darin begründet, dass die Häufigkeit der Anfragen über Schimmelpilzproblematiken, die Verbraucher, aber auch Gesundheitsämter, Behörden und Baufachleute an das Bremer Umweltinstitut richteten, in den letzten Jahren stetig zugenommen hat. Wir hoffen, dass wir Ihnen mit dieser Veröffentlichung tatsächlich eine Inspiration und Hilfe anbieten können.

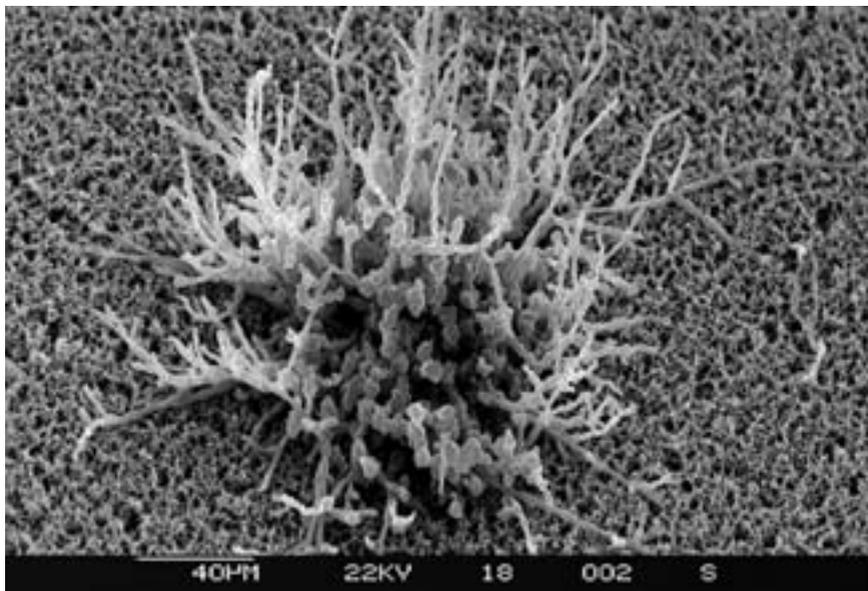


ABB. 1: Eine Schimmelpilzkolonie unter dem Rasterelektronenmikroskop (mit freundlicher Genehmigung des Labors Dr. Schäffner)

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

1 Begriffliche Grundlagen allgemeiner Mikrobiologie

Lange Zeit in der Geschichte der Menschheit galt gerade der durch das Wachstum von Mikroorganismen hervorgerufene Befall von Unterküften, Gebrauchsgegenständen und Nahrungsmitteln als ein Beweis für die in Gott begründet liegende „spontane Schöpfungskraft“ der Natur als dem Vermögen, aus dem Unbelebten neues Leben hervorbringen zu können. Vor allem die Entwicklung immer leistungsstärkerer Mikroskope und die grundlegenden Experimente des französischen Chemikers und Biologen Louis Pasteur in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts führten jedoch schließlich zu der Erkenntnis, dass alles in unserer natürlichen Umwelt, das Boden, Wasser, Luft und sämtliche Oberflächen übersät und durchsetzt sind mit „mikroskopisch“ kleinen Organismen. Diese **Mikroorganismen** sind als einzelne Zellen für das bloße Auge nicht sichtbar. Und auch wenn uns heute die Werbespots der Hygiene-Industrie versuchen vom Gegenteil zu überzeugen, so ist eine vollständig keimfreie Umwelt für den Menschen nicht denkbar – und zudem auch überhaupt nicht wünschenswert.

1.1 Mikrobielles Wachstum ist Zellvermehrung

Alle diese Keime haben dabei das Potential, sich durch Zellteilung zu vermehren, zu „wachsen“. Mikrobielles Wachstum ist unter optimalen äußeren Bedingungen **exponentiell**.

Das Wachstum von Mikroorganismen, also auch das von Schimmelpilzen, ist unter optimalen äußeren Bedingungen exponentiell.

Dies bedeutet folgendes: Nimmt man an, dass eine mikrobielle Zelle sich pro Stunde einmal teilt (dies ist die sogenannte Generationszeit), so verdoppelt sich die gesamte Anzahl der Zellen in jeder Stunde. Dies lässt sich durch die mathematische Funktion $y=2^x$ beschreiben, wobei y die Zellzahl und x die Generationszeit ist. Für unser Beispiel, also einer Generationszeit von einer Stunde, bedeutet dies, dass nach vierundzwanzig Stunden exponentiellen Wachstums aus einer Zelle 2^{24} Zellen entstanden sind - das ist die unhandliche Zahl 16.777.216. Fand nun das Wachstum auf einem mehr oder weniger festen Nährboden statt, so blieben die Zellen nach jeder Teilung dicht aneinander liegen, die Gesamtheit aller Zellen bildete eine **Kolonie**. War die einzelne Zelle für das bloße Auge noch unsichtbar, so gilt dies für die Gesamtheit der 16.777.216 Zellen, welche zusammengeballt auf einem Fleck liegen, schon lange nicht mehr, und mit skeptischem Blick betrachten wir nun das, was einmal z.B. vor 24 Stunden frisches Obst war.



ABB. 2: Graphische Darstellung einer exponentiellen Wachstumskurve

Grundlegende Voraussetzung für mikrobielles Wachstum ist das Vorhandensein eines geeigneten, flüssigen oder festen Nährbodens (**Substrat**). Doch es gibt zudem noch weitere Einflussgrößen (**Parameter**), welche Wachstum fördern oder verhindern können, so z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert (s. Abschnitt 2.4.1). Für diese **Umweltparameter** hat jede einzelne mikrobielle Art bestimmte Optima. Gelangt nur ein einzelner Keim auf eine feuchte Tapete, so ist die Wahrscheinlichkeit recht gering, dass dies ein Verschimmeln zur Folge hat. Ein Wachstum dieses einen Keimes wird lange unbemerkt bleiben. Ist diese Tapete jedoch Milliarden von Keimen gleichzeitig ausgesetzt, so ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass schon nach wenigen Tagen Schimmelflecken sichtbar werden.

1.2 Zellvermehrungsphasen von Mikroorganismen

Gelangen Mikroorganismen auf ein Substrat, auf dem ein Wachstum möglich ist, dann vermehren sie sich nicht sofort kontinuierlich mit maximaler Geschwindigkeit, und auch nicht unbegrenzt lang. Ihre Vermehrung kann vielmehr in folgende sechs Phasen unterteilt werden:

- Anlaufphase: die Zellen vergrößern sich, während ihr Stoffwechsel nach und nach aktiver wird. In dieser Phase finden keine oder nur wenig Zellteilungen statt. Die Dauer dieser Anlaufphase ist abhängig von den herrschenden **Umweltparametern** (Nährstoffangebot, Temperatur, Feuchtigkeit etc.) und von der Art der Zellen, welche auf den Nährboden gelangt sind.
- Beschleunigungsphase: die Zellteilungsrate nimmt stetig zu.
- Exponentielle Wachstumsphase: die Zellteilungsphase erreicht ihr Maximum (s. **Abb. 1**). Der Stoffwechsel der Zellen ist fast ausschließlich mit der Vervielfältigung des Erbmaterials und der Zellmasse beschäftigt; die Zellen betreiben also in erster Linie **primären Metabolismus** (s. **A.2.3**)

- Verzögerungsphase: die Zellteilungsrate beginnt wieder zu sinken. Dies ist bedingt durch sich verschlechternde äußere Bedingungen wie z.B. einsetzender Nährstoffmangel oder Anhäufung giftiger Stoffwechselprodukte („Abfälle“ des Zellstoffwechsels). Beginn des Umsteuerns des Zellstoffwechsels von **primären** auf **sekundären Metabolismus**.
- Stationäre Phase: Die Gesamtzellzahl bleibt nahezu konstant. Zwischen dem Absterben von Zellen und der Neubildung herrscht annähernd ein Gleichgewicht. Bei Mikroorganismen, welche Organe geschlechtlicher oder ungeschlechtlicher Fortpflanzung ausbilden, ist dies zumeist die Phase, in der die Fruchtkörper gebildet werden (und damit der Schimmelpilz mit bloßem Auge sichtbar wird, s. Abschnitt **A.2.1.2**). Der Zellstoffwechsel ist vom **sekundären Metabolismus** (s. **A.2.3.1**) dominiert.
- Absterbephase: Die äußeren Bedingungen verschlechtern sich weiter. Die Gesamtzellzahl nimmt ab, da nun mehr Zellen absterben als durch Zellteilung neu entstehen. Absterbende Zellen lösen sich auf und durch das Aufbrechen der Zellmembranen werden die teilweise giftigen Inhaltsstoffe des Zellsaftes in den Nährboden freigesetzt.

2 Biologie der Schimmelpilze

Schimmelpilze sind abstammungsgeschichtlich wesentlich älter als der Mensch. Gleichzeitig waren sie stets – und sind es noch – in der natürlichen Umwelt fast überall vorzufinden; die Konfrontation des Menschen mit Schimmelpilzen ist also keinesfalls eine Erscheinung „moderner Zeiten“. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens die Belastung durch Schimmelpilze durch die Etablierung der heutigen Hygienestandards eher nachgelassen hat. Ein gesunder Mensch sollte demnach an die heutzutage typischerweise gegebenen Vorkommen von Schimmelpilzen in seiner Umgebung angepasst sein und eine hohe natürliche Widerstandskraft gegenüber ihren möglichen schädigenden Einflüssen aufweisen.

Die Bezeichnung „Schimmelpilze“ kennt auch ein Biologe eher aus dem täglichen Leben als aus seinem Studium. Ein **Mykologe** („Pilzkundler“, von griechisch „Mykos“ = der Pilz) wird diesen Begriff in der Regel nur mit Widerwillen verwenden, da er nur begrenzt auf Kriterien der Verwandtschaft der einzelnen – nach heutigen Schätzungen ungefähr 100.000 verschiedenen – Schimmelpilzarten beruht. Ähnlich irritiert wird vermutlich auch ein Botaniker ob der Bezeichnung „Gemüse“ oder „Unkraut“ reagieren; auch hier wurde durch den alltäglichen Sprachgebrauch eine Vielzahl von zum Teil sehr unterschiedlichen Organismen nach Kriterien des bloß „augenscheinlichen“ Nutzens (oder Schadens) zu einer Gruppe zusammengefasst.

Die Zuordnung Schimmelpilz beruht weniger auf Kriterien der Verwandtschaft. Sie bezeichnet vielmehr eine Gruppe von Organismen, die ein ähnliches Erscheinungsbild aufweisen und einen ähnlichen Lebensraum haben. Sie ist also eher ein ökologisches Kriterium.

Ins Rampenlicht des wissenschaftlichen Interesses gelangten Vertreter der sogenannten Schimmelpilze in erster Linie durch zwei Ereignisse: zum einen war dies die Entdeckung des Penicillins, des ersten eingesetzten Antibiotikums, vor rund sechzig Jahren (s. **2.3.1**), zum anderen wurden vor knapp vierzig Jahren die **Aflatoxine** entdeckt, welche eine Gruppe potenter Gifte und **Kanzerogene** darstellen. Diese beiden „Meilensteine“ verdeutlichen, dass Schimmelpilze für den Menschen sowohl Segen als auch Fluch darstellen können. Beides liegt in erster Linie begründet in der enormen Vielfalt der durch Schimmelpilze produzierten Substanzen und in dem Erfindungsreichtum, den Schimmelpilze bei der Besiedlung der unterschiedlichsten Lebensräume an den Tag legen.

Was also sind Schimmelpilze? Wie sehen sie aus? Welche Fähigkeiten besitzen sie und welche Risiken sind mit ihrem Auftreten in unserem Lebensumfeld verbunden?

Wir wollen versuchen, Ihnen diese Fragen in den folgenden Kapiteln zu beantworten.

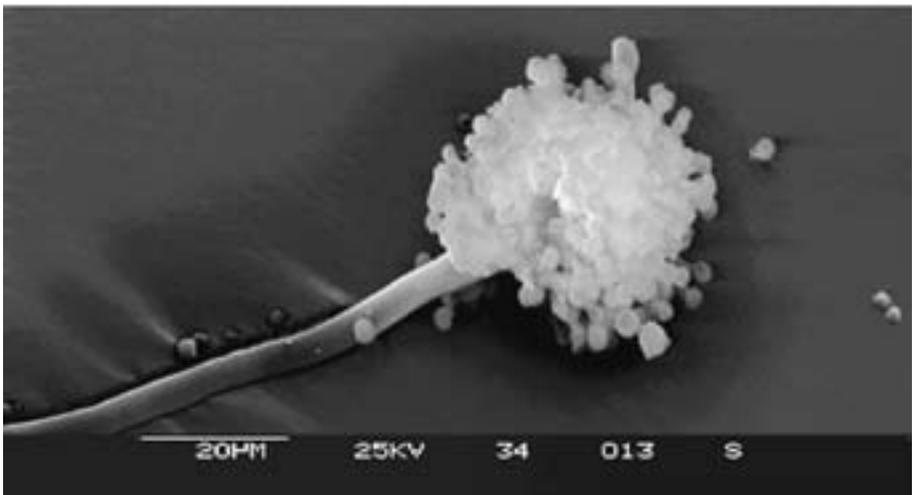


Abb. 3: Ungeschlechtlicher Fruchtkörper eines Schimmelpilzes unter dem Rasterelektronenmikroskop (mit freundlicher Genehmigung des Labors Dr. Schäffner)

2.1 Morphologie der Schimmelpilze

In dem folgenden Kapitel möchten wir Ihnen darstellen, wie ein Schimmelpilz überhaupt aussieht, wie er beschaffen ist, welche Formen seine Gestalt annehmen kann. Seien Sie sich

bewusst, dass die eigentliche Struktur der Schimmelpilzzellen mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen ist. Was wir als Schimmelpilz bezeichnen ist die bloße Masse einer Unzahl von Zellen mit dem unterschiedlichsten Aussehen, die dicht an dicht auf einem Nährboden auftreten.

2.1.1 Das Mycel

Schimmelpilze sind Organismen, die einen einfachen, nicht in Wurzel und Spross gegliederten Vegetationskörper aufweisen. Hierbei sind die Zellen – anders als bei Zellen in einigen tierischen Geweben – stets von einer Zellwand umgeben und auch nicht **amöboid** wie z.B. bei den Schleimpilzen. Ein wichtiger und typischer chemischer Bestandteil der Zellwand der Pilze ist das **Chitin**, welches auch in den Panzern von Insekten auftritt. Gleichzeitig ist die Zellwand der Schimmelpilze stets frei von Zellulose, welche in den Zellwänden von Pflanzen und niederen Pilzen vorzufinden ist.

Die nach dem Auskeimen aus einer Spore folgende Entwicklung eines Schimmelpilzes lässt sich untergliedern in zwei Phasen, eine **Wachstums-** („vegetative“) und eine sich daran anschließende **Vermehrungsphase** („generativ“). Während der Wachstumsphase bleibt der Pilz meist unscheinbar, er bildet hier fadenartige, meist farblose Zellschläuche aus, die sogenannten **„Hyphen“**. Das Hyphengeflecht in seiner Gesamtheit bezeichnet man als das **„Mycel“**. Die Abstände, welche zwischen den einzelnen Verzweigungen der Hyphen liegen, bestimmen maßgeblich das Erscheinungsbild eines Mycels: verzweigen sich die Hyphen häufig, so wirkt das Mycel fest und krustenartig, bei größeren Abständen zwischen den einzelnen Verästelungen erscheint das Mycel zunehmend „flauschig“. Man kann das Mycel von seinem Aussehen und seiner Funktion her ungefähr mit dem Wurzelwerk von Pflanzen vergleichen.

Das Mycel ähnelt in Aussehen und Funktion ungefähr dem Wurzelwerk von Pflanzen. Das Mycel besteht aus vielen voneinander abzweigenden Hyphen.

Obwohl innerhalb eines Mycels ein Wachstum nur an den Hyphenspitzen stattfindet bleiben doch alle Teile des Mycels stets potentiell wachstumsfähig. Wird ein Teil des Mycels vom Rest abgetrennt, so kann auch dieses wiederum eine neue, eigenständige Schimmelpilzkolonie ausbilden. Man bezeichnet dies auch als **„vegetative Vermehrung“**. Vermutlich ist Ihnen bekannt, dass es Pflanzen gibt, bei denen abgeschnittene Teile des überirdischen Sprosses (sogenannte „Ableger“) dazu in der Lage sind, eine neue, vollständige Pflanze auszubilden. Dieser Umstand ist – genetisch gesehen – durchaus eine Parallele zu dem Potential der Hyphen von Schimmelpilzen. Die in der mikrobiologischen Praxis mit dem Begriff „Überimpfung“ bezeichnete Technik verwendet genau diese Eigenschaft, um sogenannte Klone, also Kopien mit identischer genetischer Ausstattung, von einem Mycel (oder einer Bakterienkolonie) herzustellen. Auch in ihrer natürlichen Umgebung nutzen viele Schimmelpilzarten dieses Prinzip, um sich in ihrem Lebensraum weiter zu verbreiten. Dass theoretisch jede

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

Zelle eines Schimmelpilz-Geflechtes zu jedem Zeitpunkt ihrer Entwicklung dazu in der Lage ist, eine neue Schimmelpilzkolonie zu bilden (dies bezeichnet man als die sogenannte „Totipotenz“ einer Zelle) ist einer der Hauptunterschiede zwischen einzelligen Mikroorganismen und vielen höher entwickelten Mehrzellern, vor allem den Wirbeltieren. Bei diesen geht die entsprechende Fähigkeit meist zu einem bestimmten Zeitpunkt der frühen embryonalen Entwicklung verloren.

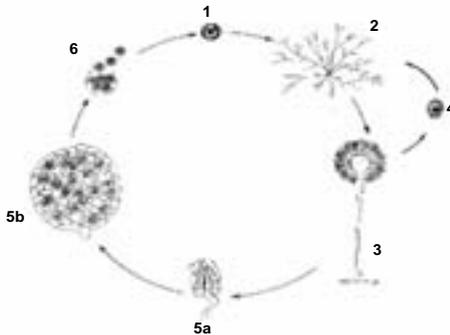
Das Mycel entwickelt sich häufig zunächst unter der Oberfläche des jeweiligen Nährbodens („**Substratmycel**“) und beginnt dann zu einem späteren Zeitpunkt, sich als sogenanntes „**Oberflächenmycel**“ in den Luftraum zu erheben. Frühestens zu diesem Zeitpunkt kann ein Schimmelpilzbefall optisch wahrgenommen werden. In beiden Fällen gleicht das Mycel einem sehr stark verzweigten Röhrensystem, welches an den wachstumsaktiven Spitzen mit Zellsaft ausgefüllt ist, in den älteren Bereichen jedoch mehr und mehr austrocknet. Diese älteren Bereiche verlieren dann nach und nach an Bedeutung für den Fortbestand des Schimmelpilzes.

Viele Schimmelpilze, in erster Linie die sogenannten **Schlauchpilze**, bilden innerhalb ihres Mycels dickwandige Strukturen aus dicht verflochtenen Hyphen aus, welche als „**Sklerotien**“ bezeichnet werden. Verschlechtern sich die äußeren Bedingungen, so stirbt häufig das gesamte Mycel bis auf die Sklerotien ab; aus letzteren keimt dann ein neues Mycel aus, wenn sich die Bedingungen für ein Wachstum wieder verbessern. Man spricht in dieser Hinsicht von den Sklerotien als „**Überdauerungsorganen**“, und diese sind häufig dafür verantwortlich, dass ein lange zurückliegender Schimmelpilzbefall plötzlich wieder ausbrechen kann, ohne dass hierfür das Auskeimen einer einzigen Schimmelpilzspore notwendig gewesen wäre.

Aus einer keimenden Spore entsteht also zunächst das Mycel. Dies wächst mehr und mehr in das Substrat hinein, um sich neue Nährstoffquellen zu erschließen. Diese erste, reine Wachstumsphase nennt man die **vegetative Phase** (s.o.). Zum Ende dieses Lebensabschnittes beginnt sich das Mycel in den Luftraum zu erheben. Schließlich bildet der Schimmelpilz Strukturen aus, die der Fortpflanzung dienen (s.u.), und in diesen Strukturen bildet er schließlich neue Sporen, die, wenn in die Umwelt freigesetzt, wiederum ein neues Mycel bilden können („**generative Phase**“).

Die Phase, in der das hauptsächliche Wachstum des Schimmelpilzes stattfindet, heißt vegetative Phase. Während der generativen Phase findet die sexuelle Fortpflanzung statt.

Die Abfolge dieser verschiedenen Entwicklungsstufen lässt sich als ein in sich geschlossener Kreis („Zyklus“) begreifen: Aus der **Spore** entsteht das **Mycel**, aus diesem wiederum die **Fortpflanzungsorgane**, welche schließlich neue **Sporen** bilden. Man spricht demzufolge auch von einem **Generations-** bzw. **Entwicklungszyklus**, den der Schimmelpilz durchläuft. Dabei ist die Dauer der einzelnen Phasen nur bedingt vorherbestimmt. Sie wird vielmehr beeinflusst durch die äußeren Umweltbedingungen, die auf den Pilz einwirken, wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert und Nährstoffangebot.



- 1) Spore aus geschlechtlicher Fortpflanzung
- 2) Mycel
- 3) ungeschlechtliche Fruchtkörper
- 4) Spore aus ungeschlechtlicher Fortpflanzung
- 5 a+b) Entwicklung des geschlechtlichen Fruchtkörpers
- 6) Freisetzung der Sporen aus geschlechtlicher Fortpflanzung

Abb. 3: Schematische Darstellung des Generationszyklus' am Beispiel einer Spezies der Gattung *Aspergillus*

2.1.2 Die Fortpflanzungsorgane

Die Fortpflanzung bei Schimmelpilzen kann **geschlechtlich** oder **ungeschlechtlich** erfolgen.

Es gibt zwei unterschiedliche Formen der Fortpflanzung bei Schimmelpilzen: die geschlechtliche und die ungeschlechtliche Vermehrung.

„Ungeschlechtliche Fortpflanzung“ klingt zunächst verwirrend, da doch die Fortpflanzung z.B. bei Wirbeltieren unabdingbar mit dem Auftreten männlicher und weiblicher „Fortpflanzungszellen“ verbunden ist, welche von unterschiedlichen, gegengeschlechtlichen Individuen der selben Art stammen – bei Wirbeltieren sind dies z.B. die Eizelle und das Spermium. Erst nach dem Verschmelzen der männlichen und der weiblichen Fortpflanzungszelle kann aus der hieraus hervorgegangenen Zelle ein neues Individuum der selben Art entstehen. Hingegen bezieht sich der Begriff der ungeschlechtlichen Fortpflanzung auf die Ausbildung spezialisierter Fortpflanzungszellen durch ein einziges Individuum einer Art, ohne dass dafür eine vorhergehende Zellkernverschmelzung z.B. von Eizelle und Spermium notwendig wäre.

Man geht davon aus, dass eigentlich alle Schimmelpilzarten über das genetische Potential zu beiden Formen der Fortpflanzung verfügen. Es existieren tatsächlich aber eine beträchtliche Anzahl an Arten, die von Fall zu Fall oder ausschließlich nur ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane und Sporen ausbilden. Auf Grund des Fehlens geschlechtlicher Fortpflanzung werden diese Pilze auch „**Fungi Imperfecti**“ genannt und von den übrigen, „perfekten“ Schimmelpilzen unterschieden. Zu den Fungi Imperfecti, auch **Deuteromyceten** genannt, gehören einige der populärsten Schimmelpilzgattungen wie z.B. *Penicillium* und *Aspergillus*. Die Tatsache, dass in einigen Fällen von ein und derselben

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

Art Stämme existieren, welche sich ausschließlich durch ungeschlechtliche, und andere, die sich durch ungeschlechtliche **und** geschlechtliche Fortpflanzung vermehren, kann zu erheblichen Problemen in der Artbestimmung von Schimmelpilzen aus natürlichen Lebensräumen führen, worauf in Abschnitt 2.2 noch näher eingegangen werden soll.

Ungeschlechtliche Vermehrung

Hat das Mycel ein gewisses Alter erreicht, bildet es bestimmte Zellstrukturen, **in** oder **an** denen die ungeschlechtlichen Sporen gebildet werden. Im ersten Fall nennt man diese Zellstrukturen **Sporangien**, im zweiten Fall **Konidien**. Zum Teil erheben sich diese Fruchtkörper über das Mycel hinaus und sitzen dann auf Trägerhyphen. Die Gestalt dieser Zellstrukturen hat zwei der prominentesten Schimmelpilzgattungen ihren Namen gegeben: *Penicillium* („Pinsel“-Schimmel) und *Aspergillus* („Gießkannen-Schimmel“)

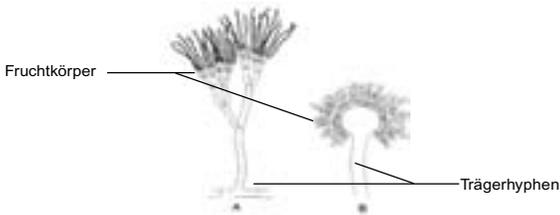


Abb. 4: Ungeschlechtliche Fruchtkörpertypen von *Penicillium* spp. (A) und *Aspergillus* spp. (B)

Die ungeschlechtlichen Sporen sind oftmals gefärbt, und daher wird mit beginnender Sporenbildung und -freisetzung („**Sporulation**“) der aus dem Nährboden herausragende Vegetationskörper eines Schimmelpilzes mit bloßem Auge sichtbar, wo das feine, häufig ungefärbte und im Nährboden wachsende Mycel noch nicht zu erkennen war. Dies erklärt, warum ein Schimmelpilzbefall fast „über Nacht“ auftreten kann. Die Farbe der Vegetationskörper ist von der Art des Schimmelpilzes abhängig. In Abhängigkeit von den äußeren Lebensbedingungen kann dieselbe Schimmelpilzart unterschiedliche Farben ausbilden.

Die Tatsache, dass die Fruchtkörper meist über das Mycel und den Nährboden hinausragen, erleichtert ihre Verbreitung über die Luft oder über abfließendes Wasser. Sowohl die aus der ungeschlechtlichen wie der geschlechtlichen Vermehrung hervorgegangenen Sporen der Schimmelpilze sind grundsätzlich nicht dazu in der Lage, sich eigenständig zu bewegen (anders als z.B. die Spermien der Wirbeltiere). Ihre Verbreitung erfolgt ausschließlich durch **Verdriftung**, und dies meist über den Luftweg. Da die Sporen sehr leicht sind, können sie selbst bei recht schwacher Luftbewegung lange in der Luft schweben bleiben und von trockenen Oberflächen schnell wieder aufgewirbelt werden. Trifft eine Schimmelpilzspore auf einen geeigneten Nährboden, so kann sie dort auskeimen und ein neues Mycel bilden. So beginnt der Lebenskreislauf des Schimmelpilzes von Neuem.

Die Sporulation an einem von mehreren Schimmelpilzen besiedelten Standort erfolgt nicht gleichmäßig und zufällig, sondern in Schüben, die durch die äußeren Bedingungen beeinflusst werden. Wann genau eine bestimmte Schimmelpilzart damit beginnt, ihre

Sporen freizusetzen, ist noch nicht vollständig verstanden. Es scheint gesichert, dass hierauf wiederum die Luftfeuchtigkeit und das Nährstoffangebot einen Einfluss haben, dass aber auch die Intensität der Luftbewegungen, die Zusammensetzung der Atmosphäre (u.a. der Kohlendioxidgehalt der Luft) und die sich in Folge des Tag/Nacht-Rhythmus' verändernden Licht- und Temperaturverhältnisse eine Rolle spielen können.

Geschlechtliche Vermehrung

Die Gestalt der **sexuellen Fortpflanzungsorgane** („**Hauptfruchtform**“) der Schimmelpilze ist komplex, und eine ausführliche Beschreibung würde den Umfang dieser Broschüre sprengen. Die Struktur der Hauptfruchtformen ist jedoch eines der wichtigsten Kriterien für die Artidentifizierung von Schimmelpilzen.

Die geschlechtlichen Fortpflanzungsorgane sowie die geschlechtlichen Sporen sind in der Regel durch Pigmente gefärbt, vergleichbar zu den ungeschlechtlichen Fortpflanzungsorganen.h

Es ist im Übrigen unter dem Gesichtspunkt der Verbreitung der Schimmelpilze nahezu ohne Belang, ob die Sporen durch geschlechtliche oder ungeschlechtliche Fortpflanzung entstanden sind, denn in beiden Fällen bilden auskeimende Sporen zunächst ein Mycel und daraufhin Organe ungeschlechtlicher und geschlechtlicher Fortpflanzung. Auch bei der geschlechtlichen Vermehrung erfolgt die Freisetzung der Sporen in Schüben, die vermutlich über die selben äußeren Bedingungen wie im Falle der ungeschlechtlichen Sporen koordiniert wird.

Es bleibt anzumerken, dass aus molekularbiologischer Sicht zwischen ungeschlechtlicher und geschlechtlicher Vermehrung ein erheblicher Unterschied besteht: nur bei der geschlechtlichen Vermehrung kommt es zu der Verschmelzung der genetischen Information von Keimzellen, die aus unterschiedlichen Geschlechtspartnern stammen. Diese sogenannte „**Rekombination**“ genetischer Informationen ist die eigentliche Triebfeder sämtlicher evolutionärer Prozesse. Eigentlich werden auch nur die der geschlechtlichen Fortpflanzung dienenden Zellstrukturen als „Fruchtkörper“ bezeichnet. Aus Gründen der Vereinfachung werden im Rahmen dieser Broschüre aber auch die der ungeschlechtlichen Fortpflanzung dienenden Zellstrukturen als Fruchtkörper bezeichnet. Der oben angesprochene **Generationszyklus** (s. **2.1.1**) ist nach der biologischen Definition erst nach der Bildung geschlechtlicher Sporen abgeschlossen. Die Bildung ungeschlechtlicher Sporen wird vereinbarungsgemäß zum vegetativen Zyklus gerechnet.

Zelltyp oder „Organ“ ¹⁾		Räumliche Dimensionen
Hyphe	Durchmesser	Wenige Mikrometer ²⁾
	Länge	Im Prinzip unbegrenzt, in einem ausgereifen Mycel bis in den Bereich mehrerer Millimeter ²⁾ bis Meter ²⁾
Spore	Durchmesser	Artenabhängig, von < 2 Mikrometer bis > 10 Mikrometer ²⁾
Trägerhyphe eines Fruchtkörpers	Länge	Arten- und Umgebungsabhängig, bis zu mehrere 100 Mikrometer ²⁾
Fruchtkörper	Durchmesser	Artenabhängig, unterschiedlich bei geschlechtlichen und ungeschlechtlichen Fruchtkörpern, ca. 20 – 200 Mikrometer ²⁾

TAB. 1: Räumliche Dimensionen im Mikrokosmos der Schimmelpilze.

¹⁾ Pilze gehören zu den wenigen Mikroorganismen, welche eine morphologische Differenzierung unterschiedlicher Organe aufweisen. Diese ist jedoch, verglichen mit der bei höheren Organismen, stark eingeschränkt und beinhaltet nur einen sehr geringen Grad an Arbeitsteilung zwischen den einzelnen Zelltypen.

²⁾ Einheiten der räumlichen Dimension: Mikrometer (µm) = ein Millionstel Meter
 Millimeter (mm) = ein Tausendstel Meter
 Zentimeter (cm) = ein Hundertstel Meter

2.2 Systematik der Schimmelpilze

Sämtliche Lebewesen werden heute in zwei Reiche aufgeteilt: das der „**Prokaryoten**“ und das der „**Eukaryoten**“. Zu den ersteren zählen die Organismen, welche üblicherweise als „Bakterien“ bezeichnet werden und keinen echten Zellkern besitzen. Zu den Eukaryoten rechnet man sämtliche andere Lebewesen: die Schleimpilze, die Pilze, die Flechten, die eukaryotischen Algen, die Moos- und Gefäßpflanzen sowie die Gruppe der Tiere. Alle diese Organismengruppen besitzen einen Zellkern. Der Organisationstyp der Pilze wird wiederum untergliedert in zwei Abteilungen, nämlich die der „Oomycota“ und der „Eumy-

cota“. Letztere zerfallen in vier Klassen, nämlich die Chytridiomyceten, die Zygomyceten (Jochpilze), die Ascomyceten (Schlauchpilze) und die Basidiomyceten (Ständerpilze, zu diesen gehören auch die Speisepilze). Auf Grund der Struktur der sexuellen Fortpflanzungsorgane werden die sogenannten „**Hefen**“ gelegentlich den Schlauchpilzen zugeordnet, obwohl sie kein Mycel in der Art der übrigen Ascomyceten ausbilden.

Der Begriff „**Schimmelpilz**“ lässt sich innerhalb der Systematik der Eumycota nicht klar definieren. Er umfasst keine eigentliche systematisch abgegrenzte Gruppe von Organismen, sondern stammt aus der mikrobiologischen Praxis. Die Gruppe der Schimmelpilze ist somit eher eine ökologische als eine systematische Kategorie, die verschiedene Organismen aus den Klassen der Schlauch- und Jochpilze vereint, welche die selben Lebensräume besiedeln.

Das grundlegende oder von Fall zu Fall auftretende Fehlen von Hauptfruchtformen kann zu einiger Verwirrung in der Gattungszuordnung einer gefundenen Art führen. So existieren einige Arten, die nach ihrer Nebenfruchtform der Gattung *Aspergillus* zugeordnet werden, nach ihrer Hauptfruchtform jedoch zu der Gattung *Eurotium* gezählt werden. *Aspergillus* gehört zu den Deuteromyceten, *Eurotium* aber zu den Ascomyceten.

Im Folgenden seien einige Kriterien für die Zuordnung zu den Schimmelpilzen aufgeführt (nach DELITSCH, 1943 und KREISEL, 1988):

- Anpassung an nährstoffreiche, aber nur kurzfristig existente Nährböden. Als typische **Erstbesiedler** von Substraten haben sie nur wenige Konkurrenten.
- Bildung eines **Hyphenmycels**
- **Hohe Wachstumsgeschwindigkeit** bis zur Sporenbildung. Die Entwicklung von der keimenden Spore bis zur ersten Sporenbildung verläuft innerhalb weniger Tage.
- Bildung einer **hohen Anzahl an Sporen**, um infolge der Kurzlebigkeit des typischen Nährbodens rasch neue Substrate besiedeln zu können.
- Überwiegend oder ausschließlich **ungeschlechtliche** („vegetative“) **Vermehrung**. Dadurch werden die zeitlich und energetisch aufwendigen Phasen der geschlechtlichen Vermehrung vermieden.
- **Weites Vorkommen**: Schimmelpilze können in einem weiten Spektrum an Substraten gedeihen und in Folge ihres nur gering spezialisierten Stoffwechsels weltweit in allen Klimazonen wachsen.
- Bildung einer **großen Zahl an unterschiedlichsten Stoffwechselprodukten** (s. 2.3), die häufig ausgeschieden werden und die Schimmelpilze zu biotechnologisch interessanten Organismen machen (s. 3).

Nach dieser Definition gehören zu den Schimmelpilzen fast alle „imperfekten“ Pilze und viele Schlauch und Jochpilze. Zudem werden gelegentlich noch einige Vertreter von Ständerpilzen zu der Gruppe der Schimmelpilze gezählt, wie z.B. der echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*). Hefen und ausschließlich („obligat“) parasitäre Pilze werden nach dieser Definition nicht zu den Schimmelpilzen gerechnet. Es ist in vielen Fällen jedoch nicht leicht, zwischen **saprophytischer** (= abgestorbenes organisches Material verwertend und

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

abbauend) und **parasitärer** (= schmarotzend) Lebensweise zu unterscheiden, da einige Schimmelpilze zwischen diesen beiden hin- und herwechseln können.

In der medizinischen Praxis werden Pilze häufig (nach MÜCKE & LEMMEN, 1999) auch eingeteilt in:

- Hyphenpilze (Schimmelpilze und **Dermatophyten**)
- Sprosspilze (= Hefen)
- **Dimorphe** Pilze (meist parasitische Pilze, welche zwischen einer Sprosspilzphase und einer Schimmelpilzphase wechseln)

2.3 Stoffwechsel der Schimmelpilze

Schimmelpilze enthalten – wie z.B. auch die Tiere – grundsätzlich kein Chlorophyll („Blattgrün“), und sind so nicht dazu in der Lage, die Energie für ihren Stoffwechsel aus der Photosynthese mit Licht zu beziehen. Diese Energiegewinnung („**Katabolismus**“) wird stattdessen durch Oxidationsreaktionen („Verbrennungsreaktionen“) an den als Nährstoffen dienenden Substraten bewerkstelligt. Den Kohlenstoff, welchen sie zum Aufbau von Biomasse („**Anabolismus**“) benötigen, beziehen sie ebenfalls aus diesen organischen Verbindungen, die sie aus ihrem Nährboden aufnehmen. Der gesamte Stoffwechsel, den eine Zelle oder ein Organismus betreibt, wird **Metabolismus** genannt.

Der Stoffwechsel eines jeden Organismus‘ kann unterteilt werden in **Energiegewinnung** und in **Aufbau von Biomasse**. Ersteres wird als **Katabolismus**, letzteres als **Anabolismus** bezeichnet.

Für die meisten Schimmelpilze ist das Vorhandensein zumindest von Spuren an Luftsauerstoff unabdingbare Voraussetzung für ihren Stoffwechsel, jedoch gibt es einige Arten (z.B. der Gattung *Mucor*), welche, ähnlich den **Hefen**, auch unter Ausschluss von Sauerstoff existieren können und ihre Nährstoffe dann vergären. Verringert sich der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre, in der ein Schimmelpilz wächst, und steigt gleichzeitig die Konzentration an Kohlendioxid (CO₂), so wird bei den meisten Schimmelpilzen das Wachstum und der gesamte Stoffwechsel unterdrückt. Dies macht sich die Lebensmittelindustrie bei der sogenannten **CA-Lagerung** (CA für engl. „Controlled Atmosphere“) zunutze, bei der ein Verschimmeln von Lebensmitteln durch die Begasung mit kontrollierten Gasgemischen bei geringen Sauerstoff-, jedoch hohen Stickstoff und Kohlendioxidgehalten verhindert wird. Entscheidend für die weite Verbreitung der Schimmelpilze und deren teilweise massives Auftreten ist u.a. die Fähigkeit, die unterschiedlichsten Nährstoffe nutzen zu können. Neben niedermolekularen löslichen Verbindungen können sie auch langkettig polymerisierte Kohlenhydrate zersetzen und ihrem Stoffwechsel zuführen. So ist eine Reihe von Schimmelpilzen dazu in der Lage, **Cellulose** abzubauen, welche das Grundgerüst der pflanzlichen Zellwände bildet. Zudem existieren einige Schimmelpilzarten (u.a. *Aspergillus*

fumigatus, *Chaetomium globosum*), welche auch das sehr komplex strukturierte **Lignin**, welches den Hauptbestandteil von Holz bildet, verwerten können.

Schimmelpilze können eine Reihe an kompliziert aufgebauten organischen Substanzen als Nahrung nutzen, die z.B. für uns Menschen vollkommen unverdaulich sind. Zu diesen Substanzen gehören u.a. Cellulose und Lignin.

So finden Schimmelpilze vor allem im und auf dem Erdreich auf verwesenden pflanzlichen (und tierischen) Substraten gute Lebensbedingungen. Dies wird auch als „**saprophytische**“ Lebensweise bezeichnet. Neben den Bakterien spielen die Schimmelpilze eine entscheidende Rolle als **Verrottungsorganismen**, ohne die der ökologische Kreislauf der organischen Materie im Boden zum Erliegen käme.

2.3.1 Sekundärmetabolite - Mykotoxine und MVOCS

Eine wichtige Eigenschaft aller Mikroorganismen ist die Bildung sogenannter „Sekundärmetabolite“. Was bedeutet das Wort „Sekundärmetabolit“? Dies sind in der Regel Moleküle von vergleichsweise geringer Größe. Wie oben bereits angeführt, so ist der „Metabolismus“ der gesamte Stoffwechsel eines Organismus, als „Metaboliten“ werden die Produkte aus diesem Stoffwechsel bezeichnet. Alle Stoffwechselprodukte, welche für die unmittelbare Aufrechterhaltung des Lebens der Zelle sowie ihrer Fortpflanzung unerlässlich sind, werden dem „**primären**“ Zellstoffwechsel zugerechnet. Als „**sekundär**“ werden solche Stoffwechselprodukte bezeichnet, die nicht zwangsläufig von allen Individuen einer Art gebildet werden *müssen*, sondern nur dann, wenn die äußeren Umstände, unter denen die Zelle lebt, dieser in der Konkurrenzsituation mit anderen Arten einen Vorteil verschafft. Sie haben also eine **ökologische** Funktion. Zudem werden sie meist nur in bestimmten Entwicklungsphasen der Zelle oder der Kolonie gebildet.

Zu welchem Zeitpunkt oder welcher Entwicklungsphase bestimmte Sekundärmetabolite gebildet werden und in welcher Menge dies dann geschieht, lässt sich nicht allgemeingültig darstellen. Von vielen Mykotoxinen (s.u.) ist z.B. bekannt, dass manche Schimmelpilze sie vor allem dann bilden, wenn die äußeren Lebensbedingungen (Nährstoffangebot, Temperatur, Feuchtigkeit etc., s. 2.4) sich für die Schimmelpilzkolonie verschlechtern.

Sekundärmetabolite sind - im Gegensatz zu den Primärmetaboliten - Stoffwechselprodukte, die nicht von allen Zellen der selben Art eines Mikroorganismus gebildet werden müssen. Sie dienen nicht der unmittelbaren Aufrechterhaltung des Lebens der Zelle, sondern werden von der Zelle nur in bestimmten Lebenssituationen benötigt. Nur wenn bestimmte äußere Bedingungen herrschen, unter denen der Sekundärmetabolit für die Zelle sinnvoll ist, wird dieser auch gebildet.

Mykotoxine

Schimmelpilze bilden im Vergleich zu anderen Organismen sehr viele, von ihrer chemischen Struktur höchst unterschiedliche Sekundärmetabolite aus. Besitzen diese (für Wir-

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

beltiere) eine giftige Wirkung, so werden sie als **Mykotoxine** bezeichnet. Toxine (= Giftstoffe), welche z.B. von Hefen oder den „Giftpilzen“ aus der Klasse der Ständerpilze (z.B. Fliegenpilz, Knollenblätterpilz) gebildet werden, werden vereinbarungsgemäß nicht zu den Mykotoxinen gezählt. Einige Verwirrung stiftet in diesem Zusammenhang der Begriff der Giftigkeit, denn viele der Mykotoxine, die für Wirbeltiere giftig sind, sind dies nicht in gleicher Weise für andere Organismen, und viele der Toxine, die für uns ungiftig sind, erwiesen sich als potente Giftstoffe z. B. für Bakterien. Für letzteren Fall steht u.a. die Gruppe an Wirkstoffen, die aus der medizinischen Praxis heraus den Begriff **Antibiotika** erhalten haben - sie sind toxisch z.B. gegenüber Schimmelpilzen oder Bakterien, aber nicht oder nur wenig giftig für den Menschen.

Antibiotika sind Mykotoxine, die nur für andere Mikroorganismen, nicht aber für den Menschen giftig sind.

Von den etwa 5.000 bekannten Antibiotika werden ca. zwanzig Prozent von Schimmelpilzen gebildet. Die übrigen Antibiotika stammen zum überwiegenden Teil aus **Actinomyceten** und Bakterien (FRITSCH, 1990). Der vielleicht prominenteste Vertreter der durch Schimmelpilze gebildeten Antibiotika ist das 1928 von A. Fleming erstmals beschriebene **Penicillin**, welches seinen Namen von dem Schimmelpilz erhielt, welcher es produziert, nämlich *Penicillium notatum*. Andere Sekundärmetabolite wie z.B. das ebenfalls von Schimmelpilzen der Gattung *Penicillium* gebildete **Citrinin** wurden zunächst ebenfalls als Antibiotika angesehen. Später erwies sich jedoch, dass diese Substanz für den Menschen zu giftig ist, als dass ihr Einsatz am Menschen nutzbringend und vertretbar wäre. Der Begriff der durch Schimmelpilze gebildeten Antibiotika ist demnach von dem der Mykotoxine nicht klar abzugrenzen.

Schlauchpilze und Deuteromyceten bilden die meisten der bekannten Mykotoxine, während die meisten Jochpilze solche Sekundärmetaboliten nicht produzieren. Unter den beiden ersteren sind auf Grund der Vielzahl und des Grades der Giftwirkung der von ihnen produzierten Mykotoxine besonders die Gattungen *Aspergillus*, *Penicillium*, *Stachybotris* und *Fusarium* hervorzuheben.

Die Mykotoxine werden von den Schimmelpilzen in das Substrat abgegeben und können sich dort, je nach Beschaffenheit des Substrates, in diesem verteilen. So besteht die größte Gefahr, sich durch solche Substanzen zu vergiften, sich also eine sogenannte **Mykotoxikose** (s. 2.1.2) zuzuziehen, auch darin, die entsprechenden Substrate zu *verzehren*. Die meisten Menschen besitzen eine natürliche Abscheu gegenüber verschimmelten Lebensmitteln, wenn der Schimmelpilzbefall jedoch z.B. durch Weiterverarbeitung des Lebensmittels (u.a. Fruchtsäfte aus verschimmeltem Obst) weder für den Seh- noch den Geruchssinn erkennbar ist, schützt uns die natürliche Hemmschwelle nicht mehr.

Vergiftungen durch Mykotoxine erfolgen in den allermeisten Fällen durch den Verzehr verschimmelter Lebensmittel. Über die Atemorgane können Mykotoxine aufgenommen werden, wenn feine Partikel von Schimmelpilzen sich in der Luft befinden.

Mykotoxine können jedoch auch in die Luft und dann über Lunge und Bronchien in den Körper gelangen. Meist geschieht dies durch mit Mykotoxinen belastete Sporen oder andere in der Luft befindlichen Bruchstücke des Mycels. Aber auch belastete Nährböden können, wenn sie austrocknen und zu kleinsten Partikeln zerrieben werden, als Bestandteil des luftgetragenen Staubes zu einer Belastung durch Mykotoxine über die Atemwege beitragen. Dies stellt z.B. auch bei unsachgemäß durchgeführten Schimmelpilzsanierungen eine große Gefahr dar.

Eine Auflistung der wichtigsten Mykotoxine erfolgt im **Anhang**.

Microbial Volatile Organic Compounds (MVOCs)

Nicht bei allen der von Schimmelpilzen gebildeten Sekundärmetaboliten ist die Frage nach ihrer biologischen Aktivität und ökologischen Funktion zu beantworten. Dies gilt auch für jene leicht flüchtigen Substanzen, die von vielen Schimmelpilzen gebildet werden und den typischen, „schimmlichen“ Geruch hervorrufen, der von uns meist instinktiv als unangenehm und störend wahrgenommen wird. Als „flüchtig“ wird eine Substanz bezeichnet, wenn sie unter normalen Druckverhältnissen und Raumtemperatur schnell „verdunstet“. In diesem gasförmigen Zustand verteilt sie sich schnell und gleichmäßig in der Raumluft und gelangt auch durch feinste Öffnungen in angrenzende Räume. Diese Substanzen können während vieler Prozesse des Schimmelpilzstoffwechsels entstehen und dann gasförmig aus der Zelle entweichen. Sie werden mit der Abkürzung **mVOCs** („**Microbial Volatile Organic Compounds**“ = Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen) bezeichnet. Bei diesen handelt es sich um eine von ihrer chemischen Struktur her extrem uneinheitliche Gruppe von Substanzen. Was sie gemeinsam haben ist ihre hohe Flüchtigkeit. Es handelt sich bei den mVOCs u.a. um gesättigte und ungesättigte Alkohole, Ketone, Terpene, Ether und schwefelhaltige Thiolverbindungen. Für einige dieser Substanzen ist die Geruchsschwelle des Menschen extrem niedrig, hierzu zählen unter anderem 1-octen-3-ol, 2-octen-1-ol (STRÖM et al., 1994), 2-Methylisoborneol und Geosmin (trans 1-10-Dimethyl-trans-9-decanol). Diese Substanzen sind vermutlich auch mitverantwortlich für den schon oben angesprochenen typischen Geruch, der von Schimmelpilzen ausgeht.

2.4 Verbreitung der Schimmelpilze

Wo begegnen uns Schimmelpilze in unserem täglichen Leben? Da wir die vereinzelt auftretenden Zellen dieses Mikroorganismus' nicht wahrnehmen können, ist uns häufig nicht bewusst, dass Schimmelpilze fast überall gegenwärtig sind – aus den obersten Atmosphäreschichten werden die sehr leichten Schimmelpilzsporen durch den „Sonnenwind“ selbst in das Weltall hinaus getragen. Warum sie dort nicht überleben können und welche äußeren Bedingungen für sie passender sind, das möchten wir Ihnen zunächst vermitteln.

2.4.1 Lebensbedingungen der Schimmelpilze

Vergleichbar zu den bei Ihnen eventuell auf der Fensterbank anzutreffenden Zimmerpflanzen haben auch Schimmelpilze als Lebewesen genau definierte Ansprüche an die äußeren Bedingungen, unter denen sie wachsen und gedeihen können. Werden diese nicht eingehalten, bleibt ihr Wachstum kümmerlich, von der Ausbildung von Blütenpracht (als Parallele zur Sporulation bei den Schimmelpilzen) ganz zu schweigen. Verschlechtern sich die Bedingungen mehr und mehr, kann es gar zu einem vollständigen Absterben des gesamten Organismus' kommen.

Bleiben wir im folgenden einmal bei Ihren Zimmerpflanzen. Alle ihre Pflanzen benötigen Licht, um zu wachsen, aber jede Art unterschiedlich viel, um sich voll entfalten zu können. Ebenso besitzt jede eigene Ansprüche an die Feuchtigkeit, bei der sie am besten gedeiht. Die Beleuchtung, bei der eine Pflanze am besten wächst, wird als **optimale** Beleuchtung für das Wachstum der jeweiligen Pflanze bezeichnet, ebenso wie für die Feuchtigkeit ein weiteres Optimum besteht. Diese beiden Größen besitzen einen wechselseitigen Einfluss auf das Wachstum der Pflanze: herrschen für eine Pflanze auf einer bestimmten Fensterbank für beide Größen, Beleuchtung und Feuchtigkeit, optimale Verhältnisse, so wird sie ihr größtmögliches Wachstum zeigen. Wird sie jedoch zu wenig gegossen, so fällt ihr Wachstum geringer aus, selbst wenn die Beleuchtung optimal bleibt, und umgekehrt. Die minimale wie die maximale Feuchtigkeit sind die Eckwerte, bei denen ein Wachstum gerade noch möglich ist. Sie liegen am weitesten vom Optimum entfernt, wenn alle anderen Verhältnisse mit Einfluss auf das Pflanzenwachstum, in unserem Beispiel also die Beleuchtung, optimal sind. Um es anders zu formulieren: wenn die Lichtverhältnisse für eine Pflanze optimal sind, duldet sie ein höheres Maß an Trockenheit (oder an „Übergießen“), als wenn sie zudem einer ungeeigneten Beleuchtung ausgesetzt ist.

Die Feuchtigkeit eines Standortes oder eines Nährbodens ist eine Größe, welche für alle Lebensformen auf dieser Erde von entscheidender Bedeutung ist, wohingegen Licht grob gesagt nur für Organismen wichtig ist, welche Photosynthese zur Energiegewinnung nutzen. Weitere Umweltbedingungen, welche für alle Organismen von Belang sind, sind das Nährstoffangebot, die Temperatur, der **pH-Wert** und die Zusammensetzung der Gasphase, also der Luft (oder auch Atmosphäre), die einen Organismus umgibt. Es existieren jedoch noch eine große Anzahl an weiteren Umweltparametern, welche Einfluss auf das Wachstum von Organismen haben können, abhängig auch davon, wo der einzelne Organismus jeweils lebt.

Es gibt sehr viele Umweltfaktoren, welche einen Einfluss auf das Wachstum von Schimmelpilzen haben. Die wichtigsten sind neben der Feuchtigkeit das Nährstoffangebot, der pH-Wert, die Temperatur und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre.

Bislang war nur davon die Rede, inwieweit einzelne Umweltparameter in ihren Optima, Minima und Maxima das Wachstum eines Organismus beeinflussen. Beispielsweise für die Vermehrung eines Organismus kann das Optimum z.B. der Feuchtigkeit aber auch an einem anderen Punkt liegen als für das bloße Wachstum. Im Falle der Schimmelpilze kann so verallgemeinernd festgestellt werden, dass das Mycelwachstum die extremsten, also ungünstigsten Umweltbedingungen toleriert, wohingegen die Ausbildung geschlecht-

licher oder ungeschlechtlicher Fruchtkörper nur unter gemäßigteren Bedingungen erfolgen kann.

Ansprüche von Schimmelpilzen an die Feuchtigkeit des Nährbodens

Ein Wachstum von Schimmelpilzen findet in der Regel nicht in flüssigen Nährmedien statt, und das unterscheidet sie grundlegend von Hefen und Bakterien. Dennoch bevorzugen sie stark durchfeuchtete Nährböden. Das Wasser, welches im Nährboden vorhanden ist, muss jedoch auch frei zugänglich sein; hohe Konzentrationen an im Wasser gelösten Salzen, Zuckern oder Eiweißen verhindern, dass die entsprechende Zelle das umgebende Wasser auch aufnehmen kann. Dies ist z.B. auch der Grund dafür, warum das starke Salzen von Lebensmitteln („Pökeln“) einen konservierenden (= keimtötenden) Effekt hat. Während in früheren Zeiten als Maß für die Substratfeuchtigkeit bloß der prozentuale Wassergehalt (bezogen auf die Masse) des Nährbodens herangezogen wurde, beschreibt man heute die Feuchtigkeit eines Substrates mit dem Wert der **Wasseraktivität** (a_w - Wert). Diese ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und dem pH - Wert (= Säuregehalt) des Substrates. Dieser a_w - Wert liegt zwischen 0 (= absolut trocken) und 1 (= vollständig mit Wasser gesättigt).

Die Wasseraktivität (a_w -Wert) beschreibt die Feuchtigkeit eines Nährbodens. Ein a_w -Wert von 1 bedeutet „vollständig mit Wasser gesättigt“, ein a_w -Wert von 0 bedeutet „absolut trocken“.

Die Feuchtigkeit eines Substrates steht in Wechselwirkung mit der **relativen Luftfeuchtigkeit** (= **RH**, für engl. „Relative Humidity“, s. 11), welche über dem Substrat herrscht und bildet nach einer Anpassungsphase mit dieser ein Gleichgewicht aus. Im Gleichgewichtszustand kann folgende Formel das Verhältnis zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Wasseraktivität eines Substrates annähernd wiedergeben (SCOTT, 1957):

$$\mathbf{RH \text{ [\%]} = } a_w \cdot \mathbf{100 \text{ [\%]}}$$

In ihren Ansprüchen an die Wasseraktivität liegen die Schimmelpilze zwischen den Bakterien und einigen spezialisierten Hefen. Während die meisten Bakterien einen a_w - Wert von 0,95 oder darüber benötigen und **xerophile** (= trockenheitsliebende) Hefen noch bei einer Wasseraktivität von unter 0,6 gedeihen, haben die meisten Schimmelpilze ihr a_w - Wert - Minimum um 0,85. Der optimale a_w - Wert liegt für die meisten Schimmelpilze zwischen 0,9 und 0,99.

Die meisten Schimmelpilze benötigen für ihr Wachstum mindestens einen a_w -Wert von ca. 0,85 oder darüber. Sporen können jedoch auch bei geringerer Feuchtigkeit überleben. Die Sporenkeimung stellt die geringsten Ansprüche an die Feuchtigkeit, während die Bildung von Sporen sehr viel mehr Feuchtigkeit benötigt.

Zu den ausgesprochen xerophilen Schimmelpilzen, die noch bei einer Wasseraktivität von unter 0,85 wachsen können, gehören Vertreter der *Aspergillus glaucus* – Gruppe (s. 2.2.1) und *Wallemia sebi*.

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

Geschlechtliche und ungeschlechtliche Sporen sowie spezielle Überdauerungsorgane wie die schon angesprochenen **Sklerotien** (s. 2.1.1) können bei einigen Schimmelpilzen (z.B. Arten der Gattungen *Aspergillus* und *Penicillium*) über Jahre hinweg bei extrem widrigen äußeren Bedingungen, wie beispielsweise hoher Trockenheit, lebensfähig bleiben. Dies ist möglich, weil der Stoffwechsel in diesen spezialisierten Zellen auf ein Minimum eingeschränkt wird.

Von den physiologisch aktiven Zuständen hingegen ist die Sporenceimung der Prozess, welcher noch bei den ungünstigsten Bedingungen abläuft. Auch hier zeigen Vertreter der *Aspergillus glaucus* – Gruppe die höchste Toleranz gegenüber Trockenheit; sie können noch bei Wasseraktivitäten von 0,7 auskeimen.

Damit nach dem Auskeimen der Sporen auch tatsächlich ein Wachstum des Mycels stattfindet, muss die Wasseraktivität in der Regel höher liegen, als es für die bloße Sporenceimung notwendig ist. Ist dies nicht der Fall, so keimen die Sporen zwar aus, bilden dann jedoch nur extrem verkürzte und zudem teilweise deformierte Hyphen, deren Wachstum schließlich ganz aufhört.

Für die Ausbildung von Fortpflanzungsorganen wiederum ist zumeist eine höhere Substratfeuchtigkeit notwendig, als dies für das Mycelwachstum der Fall ist. Auch gilt bei der Fortpflanzung der Schimmelpilze die Regel, dass ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane bei niedrigeren a_w – Werten als geschlechtliche Fortpflanzungsorgane gebildet werden.

Ansprüche an die Luftfeuchtigkeit

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erläutert, steht die Luftfeuchtigkeit über einem Nährboden in engem Zusammenhang mit der inneren Feuchtigkeit in diesem Nährboden. Die relative Luftfeuchtigkeit ist also für das Wachstum und die Sporenbildung von Schimmelpilzen deshalb von Belang, weil eine lang anhaltende hohe Feuchtigkeit der Luft zu einer hohen Wasseraktivität des Nährbodens führt und damit das Wachstum von Schimmelpilzen fördert. Überdies beeinflusst die relative Luftfeuchtigkeit offensichtlich auch die Freisetzung von Sporen, wobei jedoch der Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit der Luft und der sogenannten **Sporulation** gegenläufig ist.

Ansprüche an die Temperatur

Schimmelpilze sind während ihres Wachstums vor allem in freier Natur oft stark schwankenden Temperaturen ausgesetzt. Einer der Gründe für ihre weite Verbreitung ist darin zu finden, dass sie zumeist in einem weiten Temperaturbereich wachsen und sich vermehren können. Für die meisten Schimmelpilze liegt die Minimaltemperatur für das Wachstum des Mycels um 0 °C, also am Gefrierpunkt des Wassers, die Optimaltemperatur je nach Gattung und Art 25 bis 35 °C und die Maximaltemperatur zwischen 30 und 40 °C (PANASENKO, 1967). Vertreter der Gattung *Penicillium* bevorzugen in der Regel niedrigere Temperaturen (etwa 20 bis 25 °C) als *Aspergillus* - Arten (etwa 25 bis 30 °C).

Die optimale Temperatur für das Wachstum von Schimmelpilzen liegt ungefähr zwischen 20 und 30 °C.

Diese Minimal- und Maximaltemperaturen gelten jedoch nur für die physiologisch aktiven Stadien von Schimmelpilzkulturen. Sporen und Überdauerungsformen können noch weit über diese Temperaturen hinaus ihre Keimfähigkeit beibehalten und auskeimen, sobald die Temperaturen wieder auf die für ein Wachstum erforderlichen Werte gesunken oder gestiegen sind. Meist ist die Hitzetoleranz jedoch erheblich schwächer ausgeprägt als die Kältetoleranz.

Ansprüche an den pH-Wert des Nährbodens

Der optimale pH-Wert des Mediums für Wachstum und Fortpflanzung der Schimmelpilze liegt meist zwischen 4,5 und 6,5, also im sauren bis leicht sauren Milieu. Maximalwerte liegen meist um pH 8 (leicht alkalisch), Minimalwerte reichen hinab bis pH 2 (stark sauer). Durch das Ausscheiden von Stoffwechselprodukten in das sie unmittelbar umgebende Medium können viele Schimmelpilze jedoch den pH-Wert ihrer nächsten Umgebung beeinflussen. Liegt ein massiver Befall eines Nährbodens vor, so kann sich nach und nach der pH-Wert in weiten Teilen des Mediums verändern. Dies ist häufig die Ursache für die augenscheinlichen Veränderungen der Zusammensetzung und der Struktur des Substrates, welches von Schimmelpilzen befallen ist.

Die meisten Schimmelpilze bevorzugen einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert. Die Toleranz gegenüber saurem pH ist stärker als gegenüber alkalischem pH.

Gerade in Bezug auf den pH-Wert ist allerdings zu beachten, dass unterschiedliche Stoffwechselfunktionen oft an unterschiedliche pH-Optima gebunden sind. So findet die Bildung sekundärer Stoffwechselprodukte – wie z.B. der Mykotoxine – häufig in einem anderen oder engeren pH-Bereich statt als Wachstum und Fortpflanzung.

Abhängigkeit von Licht

Wie schon in Abschnitt 2.3 dargestellt, so besitzen Schimmelpilze grundsätzlich kein Chlorophyll und können daher auch keine Photosynthese durchführen. Ihr Wachstum wird, anders als z.B. das der Algen und Pflanzen, nicht durch die Art und die Intensität der Beleuchtung beeinflusst. Allerdings ist bei einigen Vertretern zu beobachten, dass die Bildung ungeschlechtlicher Fortpflanzungsorgane und ihrer Sporen durch Licht angeregt wird. Andererseits kann Dunkelheit die Produktion geschlechtlicher Sporen samt der sie tragenden Strukturen fördern. Durch die Bestrahlung mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen lassen sich bei einigen Schimmelpilzen die Konzentration gebildeter Pigmente, die Länge und Dichte sporenbildender Strukturen sowie die Sporendichte beeinflussen. All dies kann dazu führen, dass wechselnde Hell- und Dunkelphasen bei manchen Schimmelpilzen die Ausbildung charakteristischer Zonierungen hervorrufen, welche in konzentrischen Kreisen angeordnet sind. Dieses spezifische Muster wird auch als „Hexenring“ bezeichnet, hat jedoch nichts mit den „Hexenringen“ zu tun, welche von vielen Ständerpilzen ausgebildet werden.

Ansprüche an die Zusammensetzung der Atmosphäre

Schimmelpilze stellen, obgleich häufig zwingend auf Luftsauerstoff angewiesen (= „obligat aerob“), im allgemeinen nur geringe Ansprüche an den Sauerstoffgehalt der sie umgebenden Atmosphäre. Die Sporen von *Rhizopus stolonifer* und einigen *Mucor*-Arten können selbst in einer reinen Stickstoff-Atmosphäre, also bei völliger Abwesenheit von Sauerstoff, auskeimen. Andere benötigen für die Sporenkeimung zumindest Spuren von Sauerstoff (TABAK & COOKE, 1968).

Einige Schimmelpilze, vor allem Vertreter der Gattung *Mucor*, sind dazu in der Lage, in **anaeroben Milieu** ihren Stoffwechsel von Atmung auf Gärung umzustellen. In diesen Fällen nehmen sie häufig auch von ihrer Gestalt her das Aussehen von Hefen an, welche ihrerseits ihre Substrate zumeist stets durch Gärung verwerten.

Ein steigender Kohlendioxidgehalt hemmt zumeist die Wachstumsgeschwindigkeit von Schimmelpilzen und kann bis zu einem völligen Unterdrücken des Schimmelpilzwachstums führen (vgl. 2.3).

2.4.2 Vorkommen der Schimmelpilze „unter freiem Himmel“

Fast jedes organische Material, ob tierischer oder pflanzlicher Herkunft, ist von seinem Nährstoffangebot her dazu geeignet, Schimmelpilzen als Nährboden für Wachstum und Vermehrung zu dienen. Was Schimmelpilze für ihr Wachstum benötigen, haben wir Ihnen auf den vorangegangenen Seiten vorgestellt.

Schimmelpilze sind weltweit verbreitet und in erster Linie in Böden zu finden.

Schimmelpilze leben in der Natur meistens im oder auf dem Erdreich.

Jedoch ist hier die Verteilung der Arten und die Gesamtkonzentration an Schimmelpilzzellen stark abhängig von konkurrierenden (Mikro-)Organismen, vom Nährstoffangebot und von den herrschenden klimatischen Bedingungen wie Feuchtigkeit und Temperatur. So sind z.B. Arten der Gattung *Aspergillus* in den Tropen und Subtropen meist häufiger vorzufinden als in unseren gemäßigten Breiten, während die Gattungen *Penicillium* und *Fusarium*, welche geringere Ansprüche an die Umgebungstemperatur haben, eine umgekehrte geographische Verteilung aufweisen.

Welche Mikroflora an Schimmelpilzen in einem bestimmten Boden vorzufinden ist, wird zum einen bestimmt durch die physikalischen Eigenschaften des Bodens wie z.B. durch seinen pH-Wert, seine Feuchtigkeit und seine Temperatur, zum anderen durch die Art der Vegetation. Im Allgemeinen nimmt der Pilzgehalt der Böden von der Oberfläche in die Tiefe ab, wobei Waldböden generell höhere Pilzkeimzahlen aufweisen als Wiesenböden. Der Einsatz anorganischer Volldünger kann den Pilzgehalt in einem Boden erhöhen.

Vorkommen in der Luft

Schimmelpilzsporen, ob geschlechtlich oder ungeschlechtlich, werden von den Fortpflanzungsorganen der Schimmelpilze in die Luft abgegeben. So ist jede atmosphärische Luft, ob Innen- oder Außenluft, ob in geringer oder größerer Höhe über dem Meeresspiegel, von Schimmelpilzsporen der unterschiedlichsten Arten durchsetzt. Bei besonders günstigen Wind- und Wetterbedingungen können Schimmelpilzsporen mehrere Kilometer hoch in die Atmosphäre empor getragen und über mehrere hundert Kilometer verfrachtet werden. Dieser Umstand ist einer der Faktoren, welcher die weltweite Verbreitung der Schimmelpilze ermöglicht und hat eine enorme Bedeutung für die Ökologie der Schimmelpilze. Die Schimmelpilzarten unterscheiden sich allerdings in der Flugfähigkeit ihrer Sporen z.T. erheblich. So sind die Sporen von *Aspergillus* spp. und *Penicillium* spp. in der Regel feuchtigkeitsabweisend und dadurch wesentlich besser flugfähig als z.B. die von *Stachybotris chartarum*, welche während ihrer Entstehung in einer schleimigen Matrix gesammelt werden und sich von dort aus sehr viel schlechter in den freien Luftraum erheben können.

In der freien Luft ist die Überlebensfähigkeit der Schimmelpilze u.a. abhängig von der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und der Intensität der **UV-Strahlung**. Gegen letztere sind **pigmentierte** Sporen besonders widerstandsfähig. Zu diesen zählen auch jene Sporen, welche von den Gattungen *Alternaria* und *Cladosporium* gebildet werden.

Wenn die Lufttemperatur hoch, die Feuchtigkeit der Luft hingegen vergleichsweise gering ist, steigern die auf und im Erdboden lebenden Schimmelpilze ihre **Sporulation**, und es steigt die Anzahl der in der Luft befindlichen Pilzsporen. Dies ist die Ursache für den **jahreszeitlichen Rhythmus**, dem das Sporenvorkommen in der Außenluft unterliegt: während in den Wintermonaten in der Regel relativ wenige Sporen in der Luft vorzufinden sind, erreicht deren Zahl, abhängig von der jeweiligen Schimmelpilzart, vor allem in den Sommermonaten und im frühen Herbst ein Maximum.

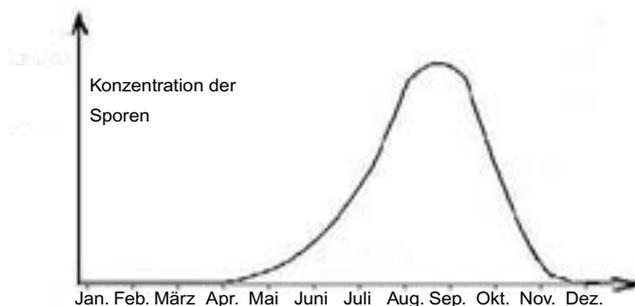


Abb. 6: Graphische Darstellung des Verlaufs der Konzentration luftgetragener Sporen innerhalb eines Jahres in der Außenluft.

Dieser von den Jahreszeiten abhängige Rhythmus ist jedoch nicht der einzige, welcher bei den in der Luft anzutreffenden Sporenkonzentrationen zu beobachten ist. So gibt es

SCHIMMELPILZE

Teil A: Ein bisschen (Mikro-) Biologie muss sein

z.B. auch im Tagesverlauf bestimmte Maximal- und Minimalwerte im Sporengehalt der Außenluft (Maximum in den Mittagsstunden). Zudem ist bekannt, dass die Freisetzung der Sporen z.B. von Schimmelpilzen der Gattungen *Alternaria* und *Cladosporium* auch an das Auftreten von Luftturbulenzen über dem Mycel gekoppelt ist.

Die Freisetzung von Sporen wird **Sporulation** genannt. Sie ist nicht gleichmäßig, sondern verändert sich z.B. im Ablauf eines Tages oder eines Jahres.

Um auskeimen zu können und damit den Vegetationszyklus zu schließen, sind alle Vertreter der Schimmelpilze darauf angewiesen, „wieder festen Boden unter die Füße zu bekommen“. Obwohl Schimmelpilzsporen sehr leicht sind, ist ihre Dichte doch immer noch höher als die der Luft, so dass sie bei ruhiger Luft beginnen abzusinken, zu „sedimentieren“. Hierbei ist die Sedimentationsgeschwindigkeit vergleichsweise gering; sie liegt für die meisten Schimmelpilzsporen bei vollkommen ruhiger Luft ungefähr im Bereich zwischen 0,5 und 5 Millimeter pro Sekunde. Doch nicht nur durch Sedimentation gelangen Schimmelpilzsporen wieder auf potentielle feste Nährböden, häufig werden sie auch durch Niederschläge aus der Luft „ausgewaschen“. In jedem Fall ist Feuchtigkeit auch dafür unabdingbar, dass die Sporen, wenn einmal auf dem Boden angelangt, auch auf diesem verbleiben. Ist dieser nämlich feucht, so reichen die Adhäsionskräfte zwischen der Spore und dem auf dem Nährboden befindlichen Flüssigkeitsfilm meist aus, um ein erneutes Aufwirbeln der Sporen zu verhindern, bis sich die auskeimenden **Hyphen** im Substrat verankern.

2.4.3 Vorkommen von Schimmelpilzen in Innenräumen

Die meisten Materialien und Oberflächen in den von Menschen geschaffenen Wohnungen sind aus biologischer Sicht mehr oder weniger „tot“. Von jeher war es eine der Hauptaufgaben der menschlichen Unterkünfte, Räume innerhalb der belebten Natur zu schaffen, die vergleichsweise wenigen anderen Arten einen Lebensraum bieten. Zusammen mit Gliedertieren (z.B. Milben, Fliegen und Spinnen) und wenigen Wirbeltieren (Mäuse) stellen Mikroorganismen diejenigen Lebensformen dar, welche dennoch zu den – unerwünschten – Gästen in unseren Wohnungen zählen. Gerade den Schimmelpilzen kommt hier die Rolle von sogenannten „Pionierorganismen“ zu: sie besiedeln Materialien und Oberflächen, die nur ein stark eingeschränktes Nährstoffangebot bieten und zuvor mehr oder weniger frei von biologischem Leben waren.

Sie haben erfahren, dass Schimmelpilze unter freiem Himmel beinahe überall im und auf dem Erdreich gedeihen, dass ihre Sporen, die für das bloße Auge unsichtbar sind, schon durch leichteste Luftbewegungen in unserer Atemluft gelangen und sich dort sehr lange im Schwebezustand halten können. Es ist Ihnen vermutlich schon klar, dass Schimmelpilze dadurch natürlich auch in Ihre Wohnung gelangen können; gleichzeitig tragen Sie jedes Mal, wenn Sie von einem Spaziergang nach Hause kommen, an Ihren Schuhen und an

Ihrer Kleidung eine Vielzahl von Sporen, und tragen so auch selbst aktiv zu einer „Animpfung“ ihres Wohnraumes bei. Zudem sind viele der Lebensmittel, in erster Linie frisches Gemüse, Obst und Nüsse, welche Sie einkaufen oder selbst ernten, schon von Sporen unterschiedlichster Schimmelpilze übersät.

Es ist also praktisch unmöglich (und, wie wir Ihnen noch vermitteln wollen, meist auch gar nicht notwendig), die Räumlichkeiten Ihrer Wohnung von Sporen frei zu halten. Wenn dies aber so ist, warum schimmelt es dann nicht in jeder Wohnung, warum zeigen sich Schimmelpilze innerhalb einer befallenen Wohnung häufig nur an bestimmten Stellen? Der Schimmel, den wir wahrnehmen, ist die Konsequenz aus mikrobiellem Wachstum. Wie Sie nun wissen, ist mikrobielles Wachstum die – unter für den Keim optimalen Umständen – exponentielle Vermehrung eines einzigen Keims. Während der einzelne Keim, die einzelne Schimmelpilzspore für Sie noch unsichtbar war, ist der Zellhaufen, die Kolonie, welche nach Milliarden von Teilungen entstanden ist, deutlich sichtbar.

Um zu einer Kolonie auszuwachsen zu können, braucht eine Schimmelpilzspore:

- einen für die jeweilige Art passenden organischen Nährboden, welcher
- eine ausreichende Materialfeuchte
- sowie einen geeigneten pH-Wert aufweisen muss;
- überdies sollte eine für den jeweiligen Schimmelpilz geeignete Temperatur herrschen

Hierbei ist Feuchtigkeit die dominierende Schlüsselgröße. Die übrigen Größen haben bei ausreichender Feuchtigkeit eher einen modulierenden Effekt auf Artzusammensetzung, Wachstumsgeschwindigkeit und Stoffwechselaktivität des Schimmelpilzbefalls.

Materialien als Nährböden für Schimmelpilze

Welche in Innenräumen häufig vorkommenden Materialien stellen nun für Schimmelpilze einen geeigneten Nährboden dar? Grundsätzlich gilt: jeder Organismus (mit Ausnahme einiger spezialisierter Bakterien), der keine Photosynthese durchführen kann, benötigt für sein Wachstum organische Materie. Für die allermeisten Schimmelpilze ist z.B. Cellulose, der Hauptbestandteil der Zellwand einer jeden pflanzlichen Zellen, ein gutes Substrat. In Wohnungen gibt es eine Reihe von Baumaterialien, welche zumindest Komponenten enthalten, die pflanzlichen Ursprungs sind, so z.B.:

- sämtliche Holzwerkstoffe
- Materialien, welche Jute enthalten
- Tapeten (v.a. auch Rauhfaser tapeten)
- Baumaterialien, welche Komponenten aus Pappe enthalten (z.B. Gipskartonplatten)
- Organische Dämmmaterialien (z.B. Dämmstoffe auf Cellulosebasis und Harnstoff-Formaldehyd-Schaum, der in älteren Häusern zur Isolierung eingesetzt wurde (REIß, 1998))

Diese Materialien, wenn sie Feuchtigkeit ausgesetzt und vielleicht auch schon etwas älteren Datums sind, werden sehr häufig von Schimmelpilzen befallen (GRAVESEN et al., 1998). Es existieren jedoch noch eine Reihe weiterer Materialien, welche, sofern die Bedingungen günstig sind (Feuchtigkeit!), Schimmelpilzen als Nährboden dienen können, wie

SCHIMMELPILZE

Teil B: Schimmelpilze im Lebensumfeld des Menschen „Jekyll and Hyde“

z.B. Farbanstriche und sogar (feuchter) Hausstaub.

In den allermeisten Innenräumen existieren eine ganze Reihe von Materialien, welche Schimmelpilzen als Nährboden dienen können. Zu diesen zählen vor allem alle Materialien, welche zumindest Komponenten pflanzlichen Ursprungs enthalten.

Zwei weitere für Schimmelpilze in Innenräumen klassische Biotope, denen häufig gegenüber Baumaterialien zu wenig Beachtung beigemessen wird, ist zum einen die Blumenerde von Topfpflanzen und zum anderen die sogenannten „Komposteimer“.

Blumenerde ist zwar, wenn sie noch relativ „frisch“ ist, ein für Schimmelpilze eher mageres organisches Substrat, dafür ist zumeist für ausreichend Feuchtigkeit gesorgt: die schönen Blumen sollen ja schließlich nicht vertrocknen. Je älter die Blumenerde wird, desto besser kann sie von Schimmelpilzen als Nährboden genutzt werden, denn herabfallendes pflanzliches Material und der sich anreichernde Staub aus der Innenraumluft verbessern das Nahrungsangebot für Schimmelpilze im Laufe der Jahre mehr und mehr.

Dass der sogenannte Komposteimer ein praktisch ideales Biotop für alle möglichen Schimmelpilze bietet, wird Sie nach der Lektüre der vorangegangenen Kapitel nicht mehr weiter überraschen: ein weites Spektrum gehaltvoller organischer Abfälle, die häufig schon von massivem Schimmelpilzbefall gezeichnet sind, wenn sie in den Kompost kommen und eine hohe Feuchtigkeit der meisten Abfälle sorgen für praktisch optimale Voraussetzung für einen schweren Befall mit Schimmelpilzen.

Materialoberflächen als Lebensräume für Schimmelpilze

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass Schimmelpilzbefall entsteht, wenn eigentlich nicht besiedelbare Materialien (z.B. Fliesen) durch Verunreinigungen ihrer Oberflächen zu geeigneten Nährböden werden. Beispielhaft seien hier Oberflächen in Küche und Bad genannt (hier vor allem die berüchtigten Silikonfugen), welche bei fortreichender Verschmutzung (in der Küche z.B. durch Fettspritzer und Staub) von Schimmelpilzen befallen werden können. An beiden Orten ist die Grundvoraussetzung „Feuchtigkeit“ häufig gegeben (Kondens- und Spritzwasser). Aber auch Teppichböden aus synthetischen Fasern können, wenn sie längere Zeit feucht sind, als Nährboden dienen, tragen sie doch, vor allem wenn sie als Auslegeware schon längere Zeit benutzt werden, oft erhebliche Lasten an organischen Feinstpartikeln, welche von den Schimmelpilzen aufgeschlossen und als „Nahrung“ verwendet werden können. Gleiches gilt auch für anorganische Dämmstoffe; auf Grund ihrer Faserstruktur besitzen sie eine große „innere“ Oberfläche an der sich über die Jahre viele organische Partikel aus der Luft niederschlagen können. Wird ein so vorbelastetes Dämmmaterial nun feucht, können selbst auf dieser ursprünglich anorganischen Matrix Schimmelpilze wachsen.

Auch Materialien, welche von Schimmelpilzen eigentlich als Nährboden genutzt werden können, sind von Schimmelpilzbefall bedroht, wenn ihre Oberflächen mit Schmutz oder Staub überzogen sind.

Wie schon zu Beginn dieses Kapitels angesprochen, können Schimmelpilze sowohl in der freien Natur als auch in Innenräumen als sogenannte „Pionierorganismen“ bezeichnet

net werden. Das Vermögen der unterschiedlichen Schimmelpilzgattungen und -arten, Oberflächen und Materialien in Innenräumen zu besiedeln, hängt dabei vor allem von ihren Ansprüchen an die dort herrschende Feuchtigkeit ab, wobei in der Regel die jeweilige Toleranz gegenüber Trockenheit die kritische Größe darstellt. GRANT et al. (1989) unterteilten nach diesem Kriterium häufig in Innenräumen nachweisbare Schimmelpilze in drei unterschiedliche Gruppen:

- Gruppe der Erstbesiedler: Toleriertes a_w -Wert Minimum: $< 0,8$
Vertreter: *Penicillium* sp. (z.B. *P. chrysogenum*, *P. brevicompactum*, *P. corylophilum* und *P. palitans*), *Aspergillus* sp. (z.B. *A. versicolor*, *A. sydowii*, *A. ustus*) und *Wallemia sebi* (bis a_w 0,65).
- Gruppe der Zweitbesiedler: Toleriertes a_w -Wert Minimum: $0,8 - 0,9$
Vertreter: *Cladosporium* sp., *Ulocladium* sp., *Alternaria* sp. und *Phoma* sp.
- Gruppe der Drittbesiedler: Toleriertes a_w -Wert Minimum: $> 0,9$
Vertreter: *Stachybotrys* sp., *Aureobasidium pullulans*, *Trichoderma* sp. und *Chaetomium* sp.

Teil B: Schimmelpilze im Lebensumfeld des Menschen „Jekyll and Hyde“

Menschen haben von alters her ihre natürliche Umgebung unterteilt in „nützlich“ und „schädlich“, je nachdem, ob sie ihm als Mittel zum Zwecke dienlich sein könne oder ob sie für ihn im Gegensatz hierzu eine Gefahr oder eine Erschwernis darstelle. Diese Sonderstellung des Menschen innerhalb der uns umgebenden natürlichen Umwelt, die uns in unseren Augen zukommt, ist aus biologischer bzw. ökologischer Sicht jedoch zunächst nicht gerechtfertigt.

Schimmelpilze sind seit den stammesgeschichtlichen Ursprüngen der menschlichen Art ihr ständiger Begleiter. Der Mensch ist deshalb an ein Vorkommen von Schimmelpilzen in seiner Umgebung angepasst und weist gegenüber dem vielgestaltigen Gefährdungspotential, welches Schimmelpilze für ihn darstellen können, im Regelfall eine hohe natürliche Resistenz auf. Zudem lernte der Mensch, das biotechnologische Potential, welches Schimmelpilze in sich bergen, zu seinem Vorteile zu nutzen, und dies schon lange bevor er die dem zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Grundlagen auch nur annäherungsweise verstanden hätte.

Schimmelpilze und Menschen leben seit Jahrtausenden zusammen. Die meisten Menschen sind gegenüber „normalen“ Mengen der krankmachenden Bestandteile von Schimmelpilzen resistent.

Schimmelpilze können uns also von Nutzen sein und doch geht von ihnen auch eine nicht zu unterschätzende Gefahr für unsere Gesundheit aus. Sie sind also beides, sie sind „Dr. Jekyll“, und sie sind auch „Mr. Hyde“.

Lassen sie uns mit „Dr. Jekyll“ beginnen.

3 Schimmelpilze als „Nützlinge“

Schimmelpilze zur Herstellung von Lebensmitteln

Schon seit jeher werden verschiedene Mikroorganismen bei der Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt. Dies sind neben Bakterien in erster Linie Schimmelpilze und Hefen. In der Regel wird hierbei das Lebensmittel durch die Zugabe einer Reinkultur eines bestimmten Mikroorganismus' angeimpft. Das angeimpfte Substrat wird dann meist unter genau definierten Bedingungen gelagert, die ein (in Hinsicht auf den zu erzielenden Nutzen, s.u.) optimales Wachstum dieses Mikroorganismus ermöglichen. Diesen Vorgang nennt man die **Fermentation** eines Lebensmittels. Das vermutlich populärste Beispiel für die Fermentation von Lebensmitteln ist die Vergärung von zuckerhaltigen Flüssigkeiten (Wein, Bier, Most usw.). Diese Fermentation kann sich nur auf die Oberfläche des Lebensmittels beschränken, aber auch das gesamte Volumen erfassen; dies ist in erster Linie von den Ver-

arbeitsprozessen wie auch von der Beschaffenheit der jeweiligen Lebensmittel abhängig (z.B. flüssig – fest). Man könnte diesen Prozess auch als „kontrollierten Verderb“ von Lebensmitteln bezeichnen. Statt der zufälligen Besiedlung eines Lebensmittels durch unbekannte, eventuell **pathogene** (krankmachende) Mikroorganismen erfolgt diese Besiedlung gezielt. Die mikrobielle Fermentation von Lebensmitteln kann verschiedene Zwecke verfolgen:

- Konservierung: Eine Lebensmitteloberfläche, die bereits dicht von einer stabilen Population an kontrolliert angeimpften Mikroorganismen bedeckt ist, kann nur sehr viel schwerer von anderen, eventuell krankmachenden Mikroorganismen besiedelt werden. Es herrscht für diese bildlich gesehen „kein Platz“ mehr. Zudem können die angeimpften Mikroorganismen auch zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Oberfläche des Lebensmittels führen und dieses so zusätzlich vor einer Besiedelung durch unerwünschte Mikroorganismen, aber z.B. auch vor einem übermäßigen Austrocknen schützen. Gleichzeitig bilden viele konservierende Mikroorganismen Stoffe, die einen Befall durch andere Mikroorganismen unterbinden (z.B. organische Säuren, welche den pH – Wert absenken sowie Mykotoxine, die andere Mikroorganismen in ihrem Wachstum hemmen).
- Verbesserung der Verdaubarkeit: Schimmelpilze können diverse Enzyme ausscheiden, welche die in dem Lebensmittel vorhandenen Nährstoffe aufspalten und so auch für den Menschen leichter verdaulich machen.
- Verbesserung des Nährwertes: Schimmelpilze können für den Menschen nicht oder nur schwer zu verdauende Nährstoffe aus dem Lebensmittel verwerten und bauen daraus eigene Biomasse (Kohlehydrate, Eiweiße, Fette u.a.) auf. Dies führt z.B. in Erdregionen, in denen Eiweiß in Form von Fleisch und Milchprodukten traditionell nicht verfügbar ist, zu einer erheblichen Verbesserung der Eiweißversorgung. Aber auch die Versorgung mit Vitaminen (z.B. das Vitamin B₁₂) kann so verbessert werden.
- Verbesserung des Geschmacks: Die Abbauprodukte haben oft einen angenehmen Geschmack oder Geruch. Gleichzeitig können auch weitere sensorische Eigenschaften des Lebensmittels durch die Fermentation dergestalt verändert werden, dass eine Aufwertung des Lebensmittels damit verbunden ist.

Für die Fermentation von Lebensmitteln durch Schimmelpilze gibt es folgende Beispiele:

- Weichkäse: Während Hartkäse mit einem Wassergehalt von 40% und darunter zu „trocken“ sind für ein Wachstum von Schimmelpilzen (s. 2.4.1) und so nur von Bakterien besiedelt werden („Milchsäurebakterien“), bieten Weichkäse mit Wassergehalten von 50 bis 80% eine ausreichend hohe Feuchtigkeit, um ein Wachstum von Schimmelpilzen zu unterstützen. Zwei prominente Beispiele für solche Weichkäse sind der Blauschimmel- oder Roquefortkäse (Fermenta-

tion durch *Penicillium roqueforti* auch im Inneren des Käselaibes) und der Camembert (Fermentation durch *Penicillium camemberti* nur auf der Oberfläche des Käselaibes)

- Fleischwaren: Seit alters her werden in verschiedenen Ländern Ost- und Südosteuropas Rohwürste mit einem Belag von Schimmelpilzen hergestellt, so z.B. die sogenannte Salami. Die charakteristische Schimmelpilzflora dieser Produkte besteht vornehmlich aus *Penicillium* - Arten.
- Fermentierte Lebensmittel außereuropäischer Herkunft: Vor allem in Asien existieren eine Reihe von Lebensmitteln, die durch Fermentation in erster Linie mit Arten der Schimmelpilzgattungen *Rhizopus*, *Mucor* (diese hauptsächlich in tropischen Regionen), *Aspergillus* und *Neurospora* (diese vorwiegend in China und Japan) hergestellt werden. Als Ausgangsprodukte dienen häufig Produkte, die aus Sojabohnen, Reis und Mais hergestellt werden.

Da die klassischen „Starterkulturen“ für die Fermentation von Lebensmitteln häufig schon seit Jahrhunderten eingesetzt werden, handelt es sich bei ihnen meist um Schimmelpilze, die keine Mykotoxine produzieren können oder diese Fähigkeit in der langen Zeitspanne ihrer Kultivierung bzw. Züchtung im Laufe der Zeit verloren haben. So konnte z.B. für Roquefort-Käse festgestellt werden, dass hier keine Mykotoxine gebildet werden, obwohl Wildstämme von *Penicillium roquefortii* auf anderen Nährböden durchaus Mykotoxine produzieren können.

In der modernen Lebensmittelindustrie werden zunehmend nicht mehr ganze Mikroorganismen, sondern nur noch einzelne von diesen gebildete Enzyme eingesetzt. Zur Gewinnung dieser Enzyme werden große Mengen z.B. von Schimmelpilzen unter kontrollierten Bedingungen gezüchtet und aus diesen dann das gewünschte Enzym gewonnen.

Schimmelpilze in der (medizinischen) Biotechnologie

Das erste im klinischen Einsatz verwendete Antibiotikum war das von *Penicillium chrysogenum* hergestellte und von Alexander Fleming 1928 erstmals isolierte Penicillin. Von den heutzutage ungefähr 5.000 bekannten Antibiotika sind etwa 100 im klinischen Einsatz. Unter diesen überwiegen noch immer die von Schimmelpilzen hergestellten Substanzgruppen der **Penicilline** und der **Cephalosporine**. Der Gewinnung geht eine Kultivierung der entsprechend geeigneten Schimmelpilzstämmen in großen Tanks voran. Aus diesen Kulturen werden die Antibiotika durch aufwändige biotechnologische Reinigungsschritte gewonnen.

Neben Antibiotika werden neuerdings auch sogenannte „Immunsuppressiva“ durch den biotechnologischen Einsatz von Schimmelpilzen gewonnen. Diese Stoffe sollen die Abwehrreaktion des körpereigenen Immunsystems gezielt unterdrücken, was z.B. in Folge einer Organtransplantation beim Menschen notwendig werden kann.

Durch den Einsatz eines gentechnischen Verfahrens, welches als Biotransformation bezeichnet wird, können Schimmelpilze erzeugt werden, die Stoffwechselprodukte bilden, welche ursprünglich nur von anderen (Mikro-)Organismen produziert wurden. Hierdurch wurde in jüngerer Zeit z.B. die Produktion von Steroiden (Behandlung rheumatischer

Erkrankungen und Ovulationshemmer) und Elicitoren (Anregung der Arzneimittelproduktion von Arzneimittelpflanzen) ermöglicht.

Neben diesen medizinisch relevanten Stoffen werden durch den Einsatz von Schimmelpilzen in biotechnologischen Verfahren noch eine ganze Reihe an Stoffen gewonnen, die in unterschiedlichsten Bereichen zum Einsatz kommen können. Dazu zählen z.B. Duft- und Aromastoffe für die Lebensmittelindustrie, Lebensmittelfarbstoffe und Ethanol („Alkohol“).

Schimmelpilze als Zersetzer organischer Materie

Für die Bodenkunde und die Ökologie sind Schimmelpilze als Zersetzer toter organischer Materie in erster Linie eine Gruppe von Organismen, die vielleicht die wichtigste Rolle spielt in der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit.

In der heutigen Abfallwirtschaft – aber auch auf Ihrem Komposthaufen im Garten – mit der häufig getrennten Sammlung organischer (Garten-, Küchen-)Abfälle mit anschließender „Wiederverwertung“ (Herstellung von Kompost) spielt das Vermögen der Schimmelpilze, unterschiedlichste organische Nährstoffe zu verwerten, eine entscheidende Rolle. Demzufolge treten Schimmelpilze in Kompostierungswerken in teilweise massiven Konzentrationen sowohl im Rottematerial als auch in der Umgebungsluft auf. Dies kann Probleme im Bereich des Arbeitsschutzes mit sich führen. Warum dies der Fall ist, soll im folgenden Kapitel erläutert werden.

4 Schimmelpilze als „Schädlinge“

Schimmelpilze können uns in mehrerer Hinsicht schaden: zum einen stellen sie ein mögliches Gesundheitsrisiko dar, vor allem für Personen, deren Gesundheit schon „angeschlagen“ ist. Zum anderen kann ein Befall durch Schimmelpilze zu Materialzerstörung führen. Diese beiden Aspekte sollen in den folgenden Kapiteln eingehender behandelt werden.

Dass Schimmelpilze auch eine große Rolle beim Verderben von Lebensmitteln spielen, dürfte Ihnen aus Ihrer eigenen Erfahrungswelt bekannt sein. Weltweit gehen jedes Jahr große Mengen an Nahrungsmitteln verloren, da sie durch unkontrollierten Befall von Schimmelpilzen ungenießbar wurden. Auf diese Rolle der Schimmelpilze als Schädlinge wird an dieser Stelle nicht gesondert eingegangen werden.

4.1 Gesundheitsgefahren durch Schimmelpilze

Für einen gesunden Menschen sollten durchschnittliche Belastungen mit den meisten der häufigen Schimmelpilze keine gesundheitlichen Gefährdungen darstellen; es wäre also falsch, bei einem Nachweis von Schimmelpilzen oder ihren Produkten sofort in Panik zu geraten. Der „Teufel liegt jedoch im Detail“, genauer gesagt in den drei relativierenden

Zuschreibungen des vorangegangenen Satzes, nämlich: „gesunder Mensch“, „durchschnittliche Belastungen“ und die „meisten der gängigen Schimmelpilze“. Die Schwierigkeiten, die in einer Definition der ersten drei dieser Begriffe liegen, sollen hier kurz erläutert werden:

- Risikogruppen: Es existieren durch Schimmelpilze besonders gefährdete Gruppen. Hierzu zählen z.B. Säuglinge, z.T. auch (Klein-)Kinder und alte Menschen sowie Personen, deren Immunsystem durch eine vorangegangene oder begleitende Krankheit (z.B. eine genetisch bedingte Immunschwäche, aber auch Krankheiten wie AIDS) oder durch die medizinische Behandlung einer solchen (z.B. die Chemotherapie von Krebspatienten) bereits stark geschwächt ist. Es existieren auch Risikogruppen, deren gesundheitliche Auffälligkeit gegenüber dem Gefahrenpotential von Schimmelpilzen schwer zu diagnostizieren ist und / oder häufig von unspezifischen Symptomen (vermeintlicher) anderer Krankheiten überlagert wird. Gerade auf dem Felde der Allergien (s. 4.1.1) oder unspezifischer Mykotoxikosen (s. 4.1.2) ist im Einzelfall oft gar nicht bekannt (weil schwer und ungenau zu diagnostizieren), ob die sogenannte **gesundheitliche Prädisposition** (bei Allergien auch **Valenz**) besteht.
- Durchschnittliche Belastungen: Die in der Literatur vorzufindenden Angaben zu durchschnittlichen Belastungen der Außenluft bewegen sich im Bereich von unter hundert bzw. wenigen hundert **Koloniebildender Einheiten** (KBE) pro Kubikmeter Luft (BEAUMONT et al., 1985, SENKPIEL & OHGKE, 1992, s. C.1.1). Hierbei muss allerdings die Frage nach dem „Wann?“ und dem „Wo?“ unbedingt beachtet werden. So sind in einer Stadt andere Keimzahlen in der Atemluft zu erwarten als in einem Wald, im Umfeld landwirtschaftlicher Betriebe oder in der Nähe einer Kompostierungsanlage. Gleiches gilt für den Zeitpunkt der Probenahme: fand sie im Sommer oder im Winter statt? Am Tag oder in der Nacht? War es trocken oder feucht, war es windig, wie hoch war die Luftfeuchtigkeit? All dies sind Größen, die einen erheblichen Einfluss auf die Anzahl von Koloniebildenden Einheiten in der Luft haben können. Sie sehen also, dass der Begriff „durchschnittlich“ nicht ganz leicht zu klären ist.
- Unterschiedliche Gefährdungspotentiale: Schimmelpilze unterscheiden sich je nach Art oder Gattung bezüglich ihrer Infektiosität, ihrer Toxizität und ihrem allergenen Potential z.T. gravierend. Andererseits kann ein an sich harmloser Schimmelpilz bei sehr hohen Keimkonzentrationen auf einmal zu einem Problem führen. Zudem machen die Unterschiede vor der Artgrenze nicht zwangsläufig halt, denn innerhalb jeder Art gibt es unterschiedliche Stämme, die in ihren morphologischen und physiologischen Eigenschaften z.T. erheblich voneinander abweichen (SCHROEDER & BOLLER, 1971). Zu guter Letzt zeigt ein und der selbe Stamm unter unterschiedlichen Lebensbedingungen auch unterschiedliche Stoffwechselleistungen (FIEDLER & SCHUETZ, 2001, NIELSEN, 2001, SUNESSON et al., 1995, KELLER 2001).

Art der Erkrankung	Prädisponierende Faktoren
<p>Infektionen</p>	<p>·Anämie, Leukämie, Leukopenie u.a. Knochenmarkserkrankungen ·Autoimmunerkrankungen, besonders bei immunsuppressiver Therapie ·Diabetes mellitus, dekompensiert oder mit Spätkomplikation ·HIV-Infektion im Stadium der manifesten Aids-Erkrankung ·Immunsuppressive Therapie z.B. nach Organtransplantationen ·Leberdysfunktion z.B. bei chronischem Alkoholismus oder Hepatitis B u. C ·Lungenerkrankungen wie Tuberkulose, Asthma, chron. obstruktive Bronchitis ·Malignome bei oder nach Strahlentherapie und Chemotherapie ·Terminale Niereninsuffizienz (dialysepflichtig) ·Mukoviszidose</p>
<p>Allergische Erkrankungen</p>	<p>·Atopiker, d.h. Personen mit entsprechender genetischer Veranlagung (dies trifft vor allem auf allergische Erkrankungen vom Typ I zu (s. B.2.1.1). Patienten, welche z.B. unter Heuschnupfen leiden, weisen eine hohe Wahrscheinlichkeit auf, dass sie eine genetische Veranlagung für allergische Erkrankungen im Allgemeinen besitzen. ·Asthmatiker</p>
<p>Mykotoxikosen</p>	<p>Bei Vergiftungen durch Schimmelpilztoxine gilt der allgemeine Grundsatz, dass die Giftwirkung abhängig von der Dosis ist. Menschen, die extrem hohen Sporenkonzentrationen ausgesetzt sind, müssen im besonderen Maße mit Vergiftungsercheinungen durch Schimmelpilztoxine rechnen. Stoffwechsel- bzw. Nieren- und Lebererkrankungen können die normalen Entgiftungsprozesse beeinträchtigen. Auch Kleinkinder bzw. Säuglinge sind auf Grund ihrer schwächeren Konstitution als besonders gefährdet zu werten.</p>

TAB. 2: Prädisponierende Faktoren für Erkrankungen durch Schimmelpilze, geordnet nach Infektionen, Allergischen Erkrankungen und Mykotoxikosen, z.T. nach STALDER & BÜNGER, 1996).

Kopfschmerzen, Augenbrennen sowie die Symptome einer Erkältung sind die unspezifischen Beschwerden, die am häufigsten mit einer überdurchschnittlich hohen Belastung der Atemluft durch Schimmelpilze in Verbindung gebracht werden. Doch wie werden diese Symptome ausgelöst? In vielen Fällen ist es nicht möglich, zu bestimmen, was genau am Schimmelpilz für eine solche unspezifische Symptomatik verantwortlich zu machen ist.

In diesem Kapitel möchten wir Sie mit den möglichen gesundheitlichen Risiken vertraut machen, welche nach heutigem Wissenstande mit Schimmelpilzen in Verbindung gebracht werden können. Diese sollen in folgende drei Teilbereiche untergliedert werden:

- **Allergische Erkrankungen**, welche ursächlich auf Belastungen durch Schimmelpilze zurückgeführt werden können. Im Zusammenhang mit Schimmelpilzen betreffen allergische Erkrankungen in der Regel die Atmungsorgane.
- Vergiftungen („Toxikosen“), welche durch Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen verursacht werden. Diese werden als „**Mykotoxikosen**“ (= „(Schimmel-) Pilzvergiftungen“) bezeichnet. Die giftigen Stoffwechselprodukte der Schimmelpilze werden **Mykotoxine** genannt. Sie gelangen meist durch den Verzehr belasteter Lebensmittel in den Körper.
- Infektionen von Körpergewebe durch pathogene (= „krankheitserregende“) Schimmelpilze. Diese werden als „**Mykosen**“ bezeichnet und betreffen in erster Linie die Haut sowie die Atmungsorgane.

Die Konfrontation mit den krankmachenden Komponenten erfolgt zumeist über den Verzehr befallener Nahrungsmittel, aber auch über das Einatmen kontaminierter Luft.

Aufnahme durch den Verzehr belasteter Lebensmittel:

Werden in der Kette Produktion – Transport – Verkauf bestimmte Hygienevorschriften nicht eingehalten, so kann es zu einem Wachstum von Schimmelpilzen auf und in diesen Lebensmitteln kommen. Hiervon können feste wie flüssige Lebensmittel betroffen sein. Den Lebensmitteln im Verkauf ist der vorangegangene Befall oftmals nicht mehr anzusehen, wenn z.B. die verwendeten Ausgangsprodukte verschimmelt waren. Durch die nachfolgenden Produktionsschritte können nämlich jene Merkmale verloren gehen, die uns natürlicherweise vor dem Verzehr befallener Lebensmittel warnen. Leider gilt dies nicht für einige krankmachende Bestandteile von Schimmelpilzen. Vor allem die gegenüber Hitze und pH-Wert-Veränderungen häufig sehr stabilen Mykotoxine sowie deren Allergene verbleiben in den Lebensmitteln, wohingegen Infektionen unwahrscheinlich sind, da die Schimmelpilzzellen an sich meist zuverlässig abgetötet werden. Klassische Beispiele von möglicherweise mit Schimmelpilzgiftstoffen belastete Lebensmittel sind Getreideprodukte, Obst und Obstsaft, Nüsse und Samen sowie aus diesen hergestellte Öle. Aber auch Molkereiprodukte können (z.B. mit den „berüchtigten“ Aflatoxinen) belastet sein.

Aufnahme über die Atemluft:

Findet z.B. in einem Innenraum ein starkes Wachstum von Schimmelpilzen statt, so können Nutzer dieses Innenraumes mit hohen Konzentrationen von in der Luft schwebenden Sporen bzw. von Feinstäuben, welche mit Sporen und Stoffwechselprodukten von Schimmelpilzen kontaminiert sind, belastet werden. Während bei belasteten Lebensmitteln der Wirkungsort der aufgenommenen Belastung der Verdauungstrakt ist, sind es bei der Aufnahme über die Atemluft die Atemorgane, welche betroffen sind. Dies kann die Gefährlichkeit der Belastung beeinflussen; im Falle von allergischen Erkrankungen, ist dieser Unterschied von großer Bedeutung.

4.1.1 Allergische Erkrankungen

Was sind Allergien?

Unter Allergie versteht man eine übermäßig starke Reaktion des menschlichen Immunsystems gegenüber sogenannten **Antigenen**, welche an sich für den menschlichen Organismus nicht schädlich sein müssen. Das Immunsystem eines Allergikers „übertreibt“ bei der Reaktion auf ein Antigen, welches von einem „gesunden“ Menschen als harmlos erkannt wird. Es sind in erster Linie drei Orte, an denen das Immunsystem in Kontakt mit einem Allergen treten kann, und zwar sind dies Haut („Kontaktallergien“), Mund- und Rachenraum einschließlich der Verdauungsorgane („Nahrungsmittelallergie“) sowie die Atmungsorgane („Atemwegsallergie“). Schimmelpilze scheinen als Allergene in erster Linie eine Rolle in Bezug auf die Atmungsorgane zu spielen.

Was sind Antigene?

Der Begriff Antigen bezeichnet eigentlich nur das Potential einer bestimmten molekularen Oberflächenstruktur, von den Zellen des menschlichen Immunsystems erkannt zu werden und so eine Reaktion des Immunsystems zu provozieren. Meist handelt es sich bei den Allergenen um Eiweiße (= Proteine), bzw. um sogenannte „Glycoproteine“. Neben den weitläufig bekannten biologischen Partikeln, welche Träger von Antigenen sind, wie z.B. Tierhaare, Gräserpollen und die Exkremente der Hausstaubmilbe, weisen allgemein auch die Sporen von Schimmelpilzen (geschlechtliche wie ungeschlechtliche) solche Oberflächenstrukturen (auch **Epitope** genannt) auf. Grundsätzlich sind also alle Schimmelpilze in der Lage, Allergien hervorzurufen; gleichzeitig kann eine Schimmelpilzart mehrere Allergene aufweisen. Ein Allergiker reagiert in der Regel jeweils auf ein oder auf mehrere bestimmte Allergene einer oder mehrerer Schimmelpilzarten.

Allergie als Folge einer „Sensibilisierung“

Entscheidend für die Charakterisierung einer Allergie ist, dass die Zellen des Immunsystems die allergische Reaktion „erlernen“ können. Die allergische Reaktion tritt in der Regel nicht beim ersten Kontakt mit einem bestimmten Antigen auf, sondern erst bei einer wiederholten Konfrontation mit diesem.

Dieser Prozess wird als „Sensibilisierung“ bezeichnet. Die Zeitspanne zwischen dem ersten *Kontakt* mit einem Allergen und der ersten allergischen *Reaktion* auf dieses kann unterschiedlich lang sein. Bei diesem Prozess sind unterschiedliche Zellen und Moleküle des Immunsystems beteiligt, die jeweils ihre eigene spezifische Funktion im Zusammenspiel mit den anderen haben. Hierzu zählen z.B. die sogenannten **Antikörper**. Hierbei handelt es sich um typische Eiweißmoleküle, die in direkten, spezifischen Kontakt mit jeweils einem bestimmten Antigen treten können. Für jedes der unzähligen möglichen Antigene, denen ein Mensch ausgesetzt sein kann, könnte das Immunsystem auch einen bestimmten Antikörper bilden und bereit halten. In der Biochemie spricht man hier von einem „Schlüssel-Schloss-Prinzip“. Passt nun der bildliche Schlüssel (der Antikörper) in das bildliche Schloss (das Antigen), so löst er innerhalb des Immunsystems eine Kettenreaktion aus, er setzt eine „Informationskaskade“ in Gang, welche die Abwehrreaktion steuert.

Menge und „Potenz“ eines Allergens

Die Stärke der allergischen Abwehrreaktion ist zum einen abhängig von der Anzahl an Antigenen, mit denen das betroffene Organ konfrontiert ist. Damit eine allergische Reaktion erfolgt, muss eine bestimmte Antigen-Schwellenkonzentration überschritten worden sein; sie erfolgt also noch nicht bei einzelnen oder sehr wenigen Antigenen, mit denen das Immunsystem konfrontiert wird.

Zum anderen ist das Ausmaß einer allergischen Reaktion abhängig von der Qualität, der **Potenz** des jeweiligen Antigens. Ein Allergen mit schwacher Potenz löst erst bei einer höheren Schwellenkonzentration eine allergische Reaktion aus als eines mit hoher Potenz. Gleichzeitig ist die Reaktion auf ein schwaches Allergen milder als die auf eines mit hoher Potenz.

Schimmelpilz-Allergene sind mehr oder weniger **potent**. Je höher die allergische Potenz, desto schneller und desto heftiger ist die allergische Reaktion. Ein niedriges allergisches Potential eines Allergens kann durch eine hohe Anzahl ausgeglichen werden.

Die Mindestmenge an Sporen pro Kubikmeter, die eine allergische Reaktion auslösen kann, liegt nach REIß (1998) zwischen 100 für *Alternaria alternata* und etwa 3.000 für *Cladosporium herbarum*. Gleichzeitig ist jedoch die Konzentration der Sporen von *Cladosporium* spp. in Europa in der Außenluft sehr viel höher als die von *Alternaria*-Arten, was die niedrigere Potenz als Allergen wieder ausgleichen kann. Insgesamt gelten die Allergene der Schimmelpilze jedoch als vergleichsweise wenig potent, dafür treten sie auf Grund ihrer Beschaffenheit häufig in hohen Atemluftkonzentrationen auf. Nach einer Arbeit von TOBIN et al. aus dem Jahre 1987 (auch HELBLING et al. 1994) resultiert das vergleichsweise schwache allergische Potential der meisten Schimmelpilz-Allergene vielleicht auch daraus, dass in den gängigen Testverfahren („**Prick-Test**“) zur Feststellung einer bestehenden Allergieveranlagung eine solche **Valenz** (s.u.) gegenüber den Antigenen von Schimmelpilzen nur unzureichend verlässlich festgestellt werden kann.

Auch bei dem Prozess der Sensibilisierung ist die Potenz eines Antigens von Belang. So erfolgt eine Sensibilisierung bei einem Antigen mit hoher allergischer Potenz sehr viel rascher als bei einem mit einer vergleichsweise niedrigen Potenz. Welche Rolle die Konzentration bzw. die absolute Menge an Allergenen bei der Sensibilisierung spielt, ist noch nicht abschließend geklärt. Es existiert ein Wert von 10^{7-8} fortpflanzungsfähiger Sporen pro Kubikmeter Raumluft als Schwelle für die Erstsensibilisierung (TINTELNOT, zitiert nach DIEHL & HOFMANN, 1996).

Anfälligkeit für Allergien: vererbt oder erworben?

Die fachliche Meinung darüber, ob die sogenannte **Prädisposition** gegenüber Allergien in erster Linie genetisch bedingt ist (= „**Atopie**“), oder ob verschiedene Umweltfaktoren (Umfang und Zeitpunkt der Konfrontation mit Allergenen sowie verschiedene „sensibilisierende“ Faktoren) in der persönlichen Entwicklung des Individuums hierfür verantwortlich zu machen sind, gehen weit auseinander. Eine Häufung von Allergien in einzelnen Familien scheint auf eine genetische Veranlagung hinzuweisen. Die Tatsache, dass viele All-

ergiker gegen mehrere Allergene gleichzeitig sensibilisiert sind, also eine sogenannte **polyvalente Sensibilisierung** aufweisen, ließe sich durch beide Modelle erklären. Die Zunahme der allergischen Erkrankungen in den letzten Jahrzehnten vor allem im Bereich von Kindern und Jugendlichen scheint auf die Verantwortlichkeit verschiedener Umwelteinflüsse hinzuweisen. Als Ursache werden die unterschiedlichsten Faktoren diskutiert, von chemischen Umweltgiften über „übertriebenen“ Hygienestatus bis hin zu elektromagnetischer Strahlung. Es existiert jedoch auch die Auffassung, dass für diese Zunahme der diagnostizierten Allergien allein die gesteigerte öffentliche Aufmerksamkeit bzw. eben die verbesserte Allergie-Diagnostik verantwortlich zu machen sei.

„Allergie“ – einige Definitionen:

Allergie	fehlgesteuerte immunologische Reaktion als Krankheit
Atopie	Genetisch kodierte (ererbte) Neigung zu allergischer Überempfindlichkeit
Allergen	Körperfremder Stoff, der die allergische Reaktion auslöst
Antigen	Spezifische Oberflächenstruktur des Allergens, die die Bildung von Antikörpern auslöst
Antikörper	Körpereigener Eiweißkörper, der an ein bestimmtes Antigen bindet (Auch Immunglobulin genannt, Abkürzung z.B. IgE , IgG u.a.)
Valenz	Das bereits bestehende (genetisch veranlagte) allergische Reaktionspotential gegenüber einem bestimmten Antigen

Die Sporengröße bestimmt das von der allergischen Reaktion betroffene Atemorgan

Unser Immunsystem wird über die Atemorgane mit Schimmelpilzantigenen konfrontiert, da diese als Bestandteile von Sporen und sonstigen Bruchstücken von Schimmelpilzen stets und z.T. in erheblichen Konzentrationen in der Luft schweben, welche wir einatmen. Kleinere Sporen gelangen in sehr viel tiefere Regionen unserer Atemwege als größere, da sich die Kanäle unserer Atemorgane in der Tiefe mehr und mehr verzweigen.

Kleinere Sporen sind als problematischer anzusehen als größere Sporen, da sie tiefer in die Atemorgane vordringen können

Sporen mit einem Durchmesser von über 10 µm verbleiben, wie z.B. auch die Pflanzenpollen, in den oberen Atemwegen, kleiner Sporen gelangen in die tieferen Atemwege bis in den Alveolarraum der Lunge. Sporengrößen unter 5 µm werden als *lungengängig* und unter 2-3 µm als *alveolengängig* betrachtet. Die Sporen von *Alternaria*-Arten, welche vergleichsweise

SCHIMMELPILZE

Teil B: Schimmelpilze im Lebensumfeld des Menschen „Jekyll and Hyde“

potente Schimmelpilz-Allergene darstellen, sind z.B. über 10 µm im Durchmesser und werden bereits in den Schleimhäuten von Nase und Rachen zurückgehalten.

Sporen - Typ	Schnupfen (Rhinitis)	Asthma	Alveolitis	Infektion
<u>Sporen > 10 µm</u> ¹⁾				
Alternaria sp.	+	+		
Fusarium sp.	+	+		
<u>Sporen 4 – 10 µm</u>				
Cladosporium sp.	+	+		
Ustilago sp.	+	+		
<u>Sporen 2- 4 µm</u>				
Aspergillus flavus	+	+		+
Aspergillus fumigatus	+	+	+	+
Aspergillus niger	+	+	+	+
Penicillium sp.	+	+	+	
<u>Sporen < 2 µm</u>				
Micropolyspora faeni ²⁾		+	+	
Thermoactinomyces vulgaris ²⁾		+	+	
Thermoaactinomyces sacchari ²⁾			+	
Nocardia asteroides ²⁾				+

TAB. 3: Zusammenhang zwischen Sporengröße (Durchmesser) und dem Potential, bestimmte Krankheitserscheinungen auszulösen (nach KÄMPFER & WEIßENFELS, 1997)

- 1) Zu den Bioaerosolen mit einer solchen Partikelgröße zählen auch viele Pflanzenpollen
- 2) Bei den angegebenen Arten handelt es sich nicht um Schimmelpilze, sondern um Actinomyceten. Diese ähneln in Lebensweise und Vorkommen zwar den Schimmelpilzen in einigen Punkten, sind aber den Bakterien zuzuordnen (s. 2.2).

Allgemeine Beschreibung der Allergieformen

Allergische Erkrankungen können u.a. darin unterschieden werden, welcher Typus Antikörper hauptsächlich an der überbordenden Immunreaktion beteiligt ist. COOMBS & GELL (1975) teilten die Allergien nach Art der ablaufenden Immunreaktion und in Abhängigkeit der hauptsächlich beteiligten Antikörpertypen in vier Hauptgruppen ein. Schimmelpilze führen nach dieser Einteilung zu allergischen Reaktionen vom Typ I oder zu kombinierten Typ III / Typ IV – Reaktionen. Die Mechanismen dieser drei Allergieformen sollen im folgenden kurz dargestellt werden.

- Zum Typ 1 gehören spezifische Reaktionen zwischen zellständigen **IgE**-Antikörpern und Allergenen. Hierbei werden Mediatoren (=Botenstoffe) wie z.B. Histamin aus Mastzellen oder basophilen Granulocysten (= Unterart der weißen Blutkörperchen) freigesetzt. Dieses Stadium kennzeichnet die sogenannte Frühphase einer Immunreaktion. Im weiteren Verlauf der allergischen Reaktion können auch weitere Zelle mit einbezogen werden, welche wiederum eine **Histaminausschüttung** aus Mastzellen hervorrufen. Die Typ I-Reaktion ist eine **Sofortreaktion**, die sich auch als sogenannter „Anaphylaktischer Schock“ mit lebensbedrohlichen Auswirkungen äußern kann (im Zusammenhang mit Schimmelpilzen jedoch so gut wie unbekannt). Klassische Beispiele für diesen Allergietyp sind der allergische Schnupfen („Rhinitis“), das allergische Asthma Bronchiale, die allergische Konjunktivitis, exogen allergische Urticaria und Neurodermitis. Allergien vom Typ I stellen mit einer Häufigkeit von 90% die größte Gruppe allergisch bedingter Krankheiten dar.
- Reaktionen vom Typ III (auch „Arthustyp“ genannt) entstehen durch Immunkomplexbildungen zwischen Antigenen und verbindenden Antikörpern besonders der **IgG**-Gruppe. Diese Zusammenballungen können sich in den verschiedenen Organen ablagern und zu Entzündungen führen. Die Typ III-Reaktion ist eine **Spätreaktion** in der allergischen Antwort, da die Symptome erst vier bis sechs Stunden nach der Konfrontation des Immunsystems mit dem Antigen auftreten. Zur Ausbildung einer allergischen Reaktion vom Typ III ist zumeist eine weit höhere Sporenkonzentration ($10^6 - 10^9$ Sporen pro Kubikmeter Luft) notwendig als bei Typ I (INDOOR AIR, 1993).
- Die Allergie vom Typ IV ist geprägt von zellvermittelten Immunreaktionen, primär der Wechselwirkung von bereits sensibilisierten T-Lymphocysten (= Unterart der weißen Blutkörperchen) mit einem Allergen. Die Symptome treten erst 24 bis 48 Stunden nach dem Kontakt mit dem Antigen auf. Somit ist die Typ IV-Reaktion eine **verzögerte Immunreaktion**.

Spezifische Allergieformen:

- **Allergische Rhinitis und Konjunktivitis:** Diese beiden Allergieformen werden zu den Typ I-Reaktionen gerechnet. Die Prozesse laufen hier in erster Linie auf den Schleimhäuten von Auge und Nasen-Rachenraum ab. Die Bindehautentzündung (Konjunktivitis) äußert sich als akute Entzündung mit Rötung der Augen, Juckreiz und Augentränen. Die Symptome der Rhinitis sind Niesen, verstopfte Nase, etc. Sie werden häufig begleitet von einer Konjunktivitis. Gelegentlich kann es in Folge einer Rhinitis auch zu einer Entzündung der Nasennebenhöhlen (Sinusitis) kommen. Die allergische Rhinitis kann über das Jahr verteilt episodisch („saisonal“) oder dauerhaft („perennial“) auftreten. Der durch Pflanzenpollen verursachte sogenannte Heuschnupfen ist das populärste Beispiel für eine saisonal auftretende allergische Rhinitis. Auch Allergene von Schimmelpilzen können eine allergische Rhinitis auslösen (MYGIND, 1989).
- **Allergische Asthma bronchiale:** Hierbei handelt es sich um eine variable, typischerweise anfallartig auftretende, ganz oder teilweise reversible Obstruktion (Verengung, Verkrampfung) der oberen Atemwege. Ursache hierfür ist eine Schleimhautentzündung der Bronchien und ein übertriebene Reagibilität derselben. Auch das allergische Asthma ist eine Typ I-Reaktion und die Folge einer Sensibilisierung durch Umweltallergene wie Gräserpollen, Tierhaare, Exkremente der Hausstaubmilbe oder eben durch solche von Schimmelpilzen. Neben dem allergischen Asthma existiert auch ein nicht allergisch bedingtes Asthma sowie diverse Mischformen. Etwa ein Drittel der Asthma-bronchiale-Erkrankungen sind durch Allergien bedingt. Bei Kindern ist dieser Anteil in der Regel höher, und so ist Asthma die mit Abstand häufigste chronische Erkrankung im Kindesalter (MÜCKE & LEMMEN, 2000). Jedoch ist davon auszugehen, dass die meisten Erkrankungen an allergisch bedingtem Asthma besonders durch Allergene wie Pollen, Milben oder Tierhaare ausgelöst werden. Nach REINHART (1987) haben Schimmelpilze einen Anteil von ungefähr 3 % an dieser Form von Asthma. Patienten, die lange Zeit unter allergischem Asthma bronchiale leiden, neigen mit der Zeit mehr und mehr auch zu unspezifischem, nicht allergisch bedingtem Asthma, bei dem die Asthma-Anfälle auch durch andere Bioaerosole als den eigentlichen allergenhaltigen oder durch kalte Luft, Medikamente oder körperliche Anstrengung ausgelöst werden können. Zudem ist bei längerer Dauer einer allergisch bedingten asthmatischen Erkrankung auch eine Ausweitung des Spektrums der Allergene zu beobachten, die einen Asthmaanfall auslösen können. In diesem Fall spricht man von dem Übergang von einer Mono- zu einer Polysensibilisierung.
- **Exogen-allergische Alveolitis (EAA):** bei dieser sogenannten „Hypersensibilitäts-pneumonie“ handelt es sich im Prinzip um eine akut oder chronisch verlaufende Lungenentzündung. Sie kann verursacht werden durch die wiederholte Inhalation organischer Stäube, welche unterschiedliche biologische Antigene enthalten können. Voraussetzung für die Entwicklung einer EAA scheinen

dreierlei Faktoren zu sein: zunächst die vorausgegangene Sensibilisierung des Kranken, dann eine häufige, längerfristige und massive Exposition mit dem Antigen und schließlich eine ausreichend geringe Größe der Partikel des **Bioaerosols** (um in die Alveolen vordringen zu können, s.o.). Nach LACEY & CROOK (1988) existiert für eine EAA eine Schwellenkonzentration von 10^6 fortpflanzungsfähiger Sporen pro Kubikmeter Raumluft. Die Symptome sind Schüttelfrost, Fieber, Atemnot, Husten und Verschlechterung der Lungenfunktionsparameter. Sie treten meist erst vier bis sechs Stunden nach dem Allergenkontakt auf, was auf eine Typ III-Reaktion verweist. Und in der Tat treten bei dieser allergischen Reaktion in erster Linie Antikörper der IgG-Gruppe auf. Gleichzeitig trägt die EAA aber auch Züge einer zellvermittelten Typ IV-Reaktion. Kommt es immer wieder zu einer massiven Konfrontation mit dem Allergen, so kann der anfangs meist schubweise Verlauf in ein chronisches Stadium übergehen, wo es dann zu einem irreversiblen Lungenschaden kommen kann. Die EAA ähnelt in der Symptomatik der häufiger vorkommenden toxischen Alveolitis, welche auch mit dem Begriff „Organic Dust Toxic Syndrom“ (s. 3.2.1.2) bezeichnet wird. Insgesamt ist die EAA als selten einzustufen. Nach LIEBETRAU & BERGMANN (1994) kann nur bei drei von hunderttausend Fällen mit einer entsprechenden Symptomatik in Deutschland mit Sicherheit von einer EAA ausgegangen werden. Von diesen werden ungefähr zehn Prozent durch Schimmelpilz-Allergene hervorgerufen. Allerdings spielen bei den unterschiedlichen Ausprägungen der EAA eine Vielzahl verschiedener Schimmelpilzarten eine Rolle.

- **Allergische bronchopulmonale Aspergillose:** bei diesem Allergietyp handelt es sich genau genommen um einen Mischtyp aus Allergie und Infektion. Zu dieser Allergieform kann es kommen, wenn bei einigen Fällen von Asthma bronchiale inhalierte Sporen von *Aspergillus fumigatus* (→ „Aspergillose“) nicht mehr aus den Atemwegen ausgeschieden werden können. Die Schleimpfropfen in den asthmatischen Lungenwegen können dann diesen Sporen einen Nährboden bieten, so dass diese auskeimen und Mycelien bilden. Diese dringen allerdings nicht in das Gewebe ein, sondern verbleiben (als sogenannte „**Saprophyten**“) an der Oberfläche des Lungen- und Bronchialgewebes. Durch die mit dem Wachstum verbundene ständige Aussaat von *A. fumigatus* – Antigenen in das Gewebe wird die Bildung von **IgG**-Antikörpern stimuliert (Typ III). Es kommt zu Entzündungsreaktionen, in deren Folge die Bronchialwand mehr und mehr geschädigt wird. An einer allergischen bronchopulmonalen Aspergillose Erkrankte sind Asthmatiker, fast immer **Atopiker** und sind meist jüngeren Alters. Gleichzeitig sind Personen, welche unter der Erbkrankheit Mukoviszidose leiden, besonders gefährdet.

4.1.2 Toxische Wirkungen oder „Mykotoxikosen“

Allgemeiner Teil und Definitionen

Die Bezeichnung „Mykotoxin“ wird verwendet für Stoffwechselprodukte von imperfekten Schimmelpilzen (Deuteromyceten) und Actinomyceten, welche für Wirbeltiere incl. des Menschen giftig sind. Mykotoxine sind abzugrenzen von jenen Giftstoffen, welche von Hefen oder den klassischen „Giftpilzen“ gebildet werden. Sie sind Produkte des sekundären Metabolismus oben angeführter Schimmelpilze und chemisch betrachtet eine extrem uneinheitliche Gruppe. Mittlerweile sind weit über 200 unterschiedliche Schimmelpilztoxine entdeckt und beschrieben worden.

Die meisten Mykotoxine weisen eine hohe Stabilität gegenüber vielen physikalischen und chemischen Parametern auf. So können durch keimtötende Maßnahmen zwar die Schimmelpilzzellen abgetötet werden (Hitzesterilisation, Desinfektionsmittel), die zuvor durch diese gebildeten Giftstoffe bleiben hierbei jedoch häufig intakt.

Nicht alle Schimmelpilze bilden Mykotoxine. Diese Feststellung besagt zweierlei: Zum einen sind es nur bestimmte Arten, welche das genetische Vermögen (Potential) zur Mykotoxinbildung aufweisen. Zum anderen stellen Schimmelpilze, um überhaupt Mykotoxine bilden zu können, bestimmte Ansprüche an die äußeren Lebensbedingungen. Dies bedeutet, dass z.B. bei einer bestimmten Feuchtigkeit zwar Wachstum und Vermehrung eines Schimmelpilzes stattfinden können, aber keine Bildung von Mykotoxinen. Diese wird erst dann möglich, wenn die Materialfeuchtigkeit noch höher liegt. Vergleichbares gilt auch für die Ansprüche an den Nährboden. So kann sich die Mykotoxinbildung zwischen Schimmelpilzkolonien ein und der selben Art, die einmal auf der Tapete wachsen und das andere Mal im Komposteimer, vollkommen voneinander unterscheiden. Zu guter Letzt machen genetische Unterschiede im Bereich der Mikroorganismen vor der Artgrenze nicht halt. Schimmelpilzarten können untergliedert werden in verschiedene Stämme, von denen einige das genetische Potential zur Mykotoxinbildung haben und andere nicht. Aus diesen Gründen gilt, dass es in der Praxis sehr schwierig ist, von einem festgestellten Pilzbefall auf die tatsächliche Produktion von Mykotoxinen zu schließen.

Die Toxine von Schimmelpilzen (= Mykotoxine) werden von ein und derselben Art nicht zu jedem Zeitpunkt und nicht an jedem Standort gebildet.

Wie gelangen die Mykotoxine in den Körper?

Der Mensch kann Schimmelpilztoxine als Bestandteil seiner Nahrung über den Verdauungstrakt aufnehmen, aber auch in Form von **Bioaerosolen** (= in der Luft schwebende, sehr kleine biologische Partikel) über die Atemwege.

Mykotoxine sind nach wie vor häufig in Nüssen nachzuweisen, und so auch in Produkten, welche Nüsse enthalten. So sind z.B. Pistazien und Kokosnussraspel häufig mit Mykotoxinen belastet.

Die Aufnahme von Mykotoxinen über die Atemorgane wird erst seit jüngerer Zeit in stärkerem Umfang diskutiert, doch auch wenn die Anzahl und Aussagekraft entsprechender Untersuchungen noch wenig befriedigend ist, sollten die diesbezüglich bereits existierenden Erkenntnisse (GAREIS, M., JOHANNING, E., DIETRICH, R., 1999) ernstgenommen

werden. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass fast alle Untersuchungen hierzu sich auf die enormen Bioaerosolbelastungen an hoch belasteten Arbeitsplätzen z.B. in Kompostwerken beziehen.

Die Giftigkeit zumindest einiger Mykotoxine kann sich um bis das Zehnfache verstärken, wenn sie über den Atemweg statt über die Verdauungsorgane aufgenommen werden (CREASIA 1986, MILLER 1990). Auch der Umstand, dass die Atemorgane vergleichsweise leicht durch mikrobielle Erreger infiziert werden können, welchen sie in überdurchschnittlich hohem Maße ausgesetzt sind, kann zu einer besonderen Bedeutung der Rolle der inhalativen Aufnahme von Mykotoxinen beitragen. Es existieren nämlich eine Reihe von Mykotoxinen, wie z.B. die **Trichothecene**, welche die körpereigene, zellvermittelte Immunabwehr schwächen. Bei inhalativer Aufnahme könnten sie den Weg bereiten für Infektionen des Atemtraktes durch Schimmelpilze und / oder andere Mikroorganismen.

Inwieweit die Giftigkeit der Giftstoffe von Schimmelpilzen dadurch beeinflusst wird, ob sie über die Nahrung oder über die Atemluft in den Körper gelangen, ist noch weitestgehend unklar.

Für beide Wege der Inkorporation (Aufnahme über den Atemweg und über den Verdauungstrakt) ist wichtig, dass nicht nur die Zellen des Schimmelpilzes (Teile des Mycels und Sporen) allein Toxine enthalten können, sondern auch der (ehemalige) Nährboden von Schimmelpilzen (s.o.). Ist der ehemalige Nährboden z.B. in Folge von Austrocknung selbst in feinste Partikel zerfallen, können auch diese eingeatmet werden. War der Nährboden mit Mykotoxinen kontaminiert, so können auch über diese Partikel des Nährbodens Mykotoxine über die Atemwege in unseren Körper gelangen.

Nur sehr wenige Erkenntnisse liegen darüber vor, in wie weit Mykotoxikosen auch durch die Aufnahme von Schimmelpilzgiften über die Haut ausgelöst werden können.

Wirkungsspektrum der Mykotoxine

Bei der Betrachtung der Wirkmechanismen der Mykotoxine muss grundlegend unterschieden werden zwischen **akut toxischen** und **chronischen** Gesundheitsschädigungen. Bis zur Entdeckung der sogenannten „Aflatoxine“ (s.u.) galt das Augenmerk hauptsächlich den akut toxischen Wirkungen. Nachdem bekannt geworden war, dass Mykotoxine auch krebserregend („kanzerogen“) wirken können, wendete sich das wissenschaftliche Interesse den durch Mykotoxine verursachten chronischen Erkrankungen zu, von denen mittlerweile einige gut dokumentiert sind. Eine chronische Vergiftung zeichnet sich in erster Linie dadurch aus, dass die Schädigungen der Gesundheit z.T. erst mit erheblichen zeitlichen Verzögerungen im Bereich mehrerer Jahre hervortreten. Zudem kann durch wiederholte Aufnahme von Mykotoxinen über längere Zeiträume auch eine **Akkumulation** des Giftstoffes in körpereigenen Geweben erfolgen.

Des weiteren sollte bei der Giftwirkung der Mykotoxine unterschieden werden zwischen **unspezifischen, toxisch-irritativen Wirkungen** (s.u.) und den **spezifischen toxischen Effekten einzelner Mykotoxine** (z.B. Aflatoxin, s.u.)

Toxisch-irritative Wirkungen von Mykotoxinen

Toxisch-irritative Wirkungen von Mykotoxinen sind in erster Linie von Arbeitsplätzen bekannt, an denen sehr hohe Schimmelpilzsporenkonzentrationen in der Raumluft vorliegen. Es existieren vergleichsweise wenige Berichte über derartige Symptomatiken aus dem Bereich Wohnungen.

Unter der Einwirkung von schimmelpilzhaltigen Luftstäuben (Bioaerosole) werden kurzfristig auftretende Entzündungen von Haut, Bindehaut und Schleimhäuten beschrieben (Douwes et al., 1997). Diese Symptomatik wird mit der Abkürzung MMI (für „Mucous Membrane Irritation Syndrome“) bezeichnet. Wenn die Symptome im Bereich der Schleimhäute der unteren Atemwege verbunden mit grippeähnlichen Allgemeinsymptomen wie Fieber, Schüttelfrost, Kopf- und Gliederschmerzen bestehen, wird dies häufig als ein sogenanntes „Organic Dust Toxic Syndrome“ (=ODTS) bezeichnet (Malmberg, 1988, Herr et al. 1999). In feuchten Gebäuden, welche zudem häufig auch von Schimmelpilzen befallen sind, wurden Symptomatiken wie Ausschläge, Juckreiz, Nasenbluten, Husten und Kopfschmerzen bis hin zu Magen-Darm-Problemen und Effekten auf das zentrale Nervensystem beschrieben und als sogenanntes „Sick Building Syndrome“ bezeichnet (DAVIS, 2001). In wie weit hierbei Schimmelpilze mit zu den ursächlichen Auslösern dieser Symptomatiken gehören, ist noch offen.

Entscheidend bei der Beschreibung der irritativen toxischen Wirkungen von Mykotoxinen ist der Umstand, dass die beschriebenen Symptomatiken augenscheinlich von allen Schimmelpilzen ausgelöst werden können. Allein eine ausreichend hohe Konzentration der Schimmelpilzpartikel in der Luft (evtl. in Kombination mit entsprechenden gesundheitlichen Vorbelastungen der Erkrankten) ist ausschlaggebend für die Ausprägung solcher Symptomatiken (MALMBERG et al., 1985, 1986, 1988, 1993, GRÜNER et al., 1998, BITTIGHOFER et al., 1999). Dieser Umstand spricht eigentlich gegen eine Beteiligung von Mykotoxinen an diesen Krankheitsbildern, bilden doch nicht alle Schimmelpilzarten die selben oder überhaupt Mykotoxine.

Kurzfristig auftretende Entzündungen von Haut, Bindehaut und Schleimhäuten (MMI) können bereits bei Konzentrationen von 10^3 KBE/m³ verursacht werden (CLARK et al., 1984, EDUARD et al., 1993, GLADDING et al., 1997, JOHANNIG et al. 1995, MALMBERG et al., 1986, MOREY 1984, SIGSGAARD et al., 1994). Um die Symptomatiken eines ODTS auszulösen sind hingegen offensichtlich höhere Lebendkeimzahlen notwendig, nach EDUARD (1993) (zitiert nach DIEHL & HOFMANN (1996)) liegt die Schwellenkonzentration fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzsporen pro Kubikmeter Raumluft hier bei 10^9 . Im Falle des ODTS bleibt zudem anzumerken, dass dieses nicht klar vom Felde der allergischen Erkrankungen (s.o.) abzugrenzen ist, ähneln doch die Symptome (Fieber, Schüttelfrost, Husten und Kurzatmigkeit) in einigen Fällen, welche dann als **Toxische Alveolitis** bezeichnet werden, denen der akuten Form der **Allergischen Alveolitis**.

Für ein primär toxisch bedingtes Geschehen in Gegenüberstellung zu allergischen Erkrankungen sprechen folgende Punkte:

- Die Krankheit bricht oft schon beim ersten Kontakt aus, d.h. es muss keine Sensibilisierung erfolgen.

- Häufig erkranken mehrere exponierte Personen gleichzeitig (Gruppenerkrankung).
- Mit wachsender Staubkonzentration steigt die Anzahl der Erkrankten.

Als Sonderfall in der Symptomatik der reizenden und toxischen Wirkungen muss die Wirkung einer der Zellwandbestandteile der Schimmelpilze auf die menschlichen Schleimhäute angesehen werden. Dieser Bestandteil heißt **1,3-β-D-Glucan** und kann sowohl in den Sporen als auch in den Hyphen von allen Schimmelpilzen nachgewiesen werden.

1,3-β-D-Glucan ist ein Bestandteil der Zellwand der Schimmelpilze, zählt aber nach der allgemeinen Definition nicht zu den Mykotoxinen. Er weist auf menschliche Gewebe, vor allem auf die Schleimhäute, eine entzündungsfördernde Wirkung auf.

Dieser Baustein weist entzündungsfördernde Wirkungen auf menschliche Gewebe auf und ist darin, wie auch in seiner eigentlichen Funktion als Bestandteil der Zellwand, mit dem sogenannten „Endotoxin“ der Bakterien zu vergleichen. Unter Umständen ist das 1,3-β-D-Glucan in sehr viel stärkerem Maße für die oben dargestellten unspezifischen Symptomatiken wie MMI, ODTS und Sick Building Syndrome verantwortlich als die eigentlichen Mykotoxine, welche nicht von allen Schimmelpilzen gebildet werden können.

Spezifische toxische Effekte einzelner Mykotoxine

Die älteste, seit dem frühen Mittelalter bekannte Form einer Vergiftung durch Mykotoxine, einer sogenannten Mykotoxikose, ist der „**Ergotismus**“. Hierbei handelt es sich um eine Vergiftung, die durch den Verzehr verpilzten Getreides ausgelöst wird. Der toxinbildende Pilz heißt *Claviceps purpurea* und bildet sogenannte Ergotalkaloide, die nach Verzehr zu unkontrollierbaren Zuckungen und Halluzinationen führen. Während der beiden Weltkriege fielen in Russland Tausende einer weiteren Mykotoxikose zum Opfer, welche „**Alimentäre Toxische Aleukie**“ genannt wurde. Diese Blutkrankheit wird ebenfalls ausgelöst durch den Verzehr von verschimmeltem Getreide. Das verantwortliche Toxin wird als T2-Toxin bezeichnet und wird durch Schimmelpilze der Gattung *Fusarium* spp. gebildet.

Durch das Wissen um die Toxin-bildenden Schimmelpilze können heutzutage zumindest in den Staaten der sogenannten „Ersten Welt“ solche Ausbrüche an endemischen Vergiftungen verhindert werden, doch schätzt z.B. die FAO, dass weltweit ca. 25% aller Lebensmittel mit messbaren Mengen an Mykotoxinen belastet sind.

Auch in der Nutztierhaltung spielen Mykotoxikosen eine erhebliche Rolle, sind doch eine Reihe von endemischen Erkrankungen bei Nutztieren auf verschimmelteres Futter zurückzuführen. Im Rahmen der Erforschung einer mysteriösen Erkrankung von Truthähnen im England der sechziger Jahre, welche als „Turkey-X-Disease“ bezeichnet wurde, kam es erstmals zum wissenschaftlichen Nachweis der Kausalität zwischen Schimmelpilztoxinen und Vergiftungserscheinungen bei Nutztieren. Die entsprechenden Giftstoffe wurden nach ihrem Haupterzeugerorganismus *Aspergillus flavus* als **Aflatoxine** bezeichnet. Heutzutage geht man von 200 bis 400 unterschiedlichen chemisch definierten Myko-

toxinen aus (POHLAND, 1993). Die Schwierigkeit in der praktischen Gesundheitsfürsorge liegt jedoch nur zu einem Teil allein in der Identifikation und Beschreibung der Mykotoxine begründet. Von größter Wichtigkeit ist auch das genaue Wissen um die möglichen akuten und chronischen Schädigungen, die diese Giftstoffe für Mensch und Tier nach sich ziehen können.

Viele Mykotoxine sind in ihrer *ursprünglichen* Form gar nicht oder nur wenig giftig. Sie erlangen ihre volle Toxizität erst, wenn sie durch den Fremdstoffwechsel in eine veränderte Form umgewandelt wurden. Möglicherweise prominentestes Beispiel hierfür sind die schon oben angeführten Aflatoxine, welche erst durch Umwandlungen in der Leber des fremden Organismus ihr volles Schädigungspotential erlangen. Der ursprüngliche Sinn dieser Umwandlungen besteht eigentlich darin, Fremdstoffe so zu verändern, dass sie über den Urin oder den Stuhl ausgeschieden werden können. Die Potenzierung der Giftigkeit, welche durch solche Stoffwechselaktivitäten ausgelöst wird, könnte man also als „Unfall“ im Fremdstoffwechsel bezeichnen. Die Leber ist, gefolgt von den Nieren, dem Darm, aber auch der Lunge, das wichtigste Organ, welches solche Umwandlungen durchführt. So ist die Leber als blutreinigendes Organ auch häufig am stärksten von den Vergiftungserscheinungen betroffen.

Häufig erhöht sich die Giftigkeit der Mykotoxine, wenn sie durch unseren Stoffwechsel, vor allem in Leber und Niere, um- und abgebaut werden.

Als Schwellenwerte für eine mögliche Toxinwirkung von Sporen, welche über die Raumluft in die Atmungsorgane gelangen, werden nach TILKES et al. (1999) für allgemeine Mykotoxinwirkung eine Konzentration von 10^9 KBE/ m^3 , für die Toxinwirkung von Sporen der Art *Stachybotrys chartarum* eine Konzentration von (nur) 10^3 angegeben.

Eine Beschreibung der wichtigsten Mykotoxine befindet sich im Anhang.

4.1.3 Infektionen oder „Mykosen“

Als „Mykosen“ werden Infektionen durch Sprosspilze, Schimmelpilze oder Dermatothyten bezeichnet. Infektionen durch Schimmelpilze sind in der Regel sehr selten und erfolgen meist über die Atemwege. Nach den Beobachtungen einiger Experten ist es seit den 80er Jahren jedoch zu einer zunehmenden Häufung von Pilzinfektionen gekommen, vergleichbar mit der Zunahme der allergischen Erkrankungen (MEUNIER 1987, 1990). Die Ursache hierfür scheint weniger in einer erhöhten „Aggressivität“ (= **Virulenz**) der beteiligten Schimmelpilze als in einer Zunahme der einer Risikogruppe (s. 2.1) zuzuordnenden Patienten begründet zu liegen. Zu dieser Gruppe zählen insbesondere Personen mit einer schweren Immunabwehrschwäche, wie z.B. Leukämiepatienten, Patienten mit Malignomkrankungen oder nach Transplantationen, ebenso wie Personen unter Therapie mit Zytostatika (= „Chemotherapie“) oder hoch dosierten Corticoiden. Die Ursache für diese Zunahme liegt letzten Endes darin begründet, dass sich die Lebenserwartung der betrof-

fenen Risikogruppen durch die Fortschritte der modernen Medizin vor allem auch im Bereich der Lebenserhaltung kontinuierlich erhöht hat. Der Preis dieses Fortschrittes besteht darin, dass man sich nun mit Folgeerkrankungen konfrontiert sieht, die noch vor wenigen Jahrzehnten – zahlenmäßig – kaum eine Rolle spielten.

Doch was bedeutet „Pilzinfektion“ und welche Wirkmechanismen liegen einer solchen Erkrankung zu Grunde? Einer der Schlüsselbegriffe für das Verständnis von Infektionen durch Mikroorganismen ist die „**Pathogenität**“ eines mikrobiellen Erregers. Ein solcher ist dann besonders pathogen, wenn er mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit dazu in der Lage ist, einen „Wirt“ zu infizieren. Alle höheren Organismen haben Mechanismen ausgebildet, die sie vor einem Befall durch Mikroorganismen schützen sollen. Dazu zählt bei den Wirbeltieren das Immunsystem, aber auch die morphologische Ausbildung einiger Organe wie z.B. der Haut, der Verdauungsorgane, der Atemwege usw.. Verschiedene Eigenschaften eines Keimes können seine Pathogenität erhöhen. Eine hohe Pathogenität wird zum Beispiel durch folgende Faktoren erreicht:

- Der Erreger kann sich gut an die entsprechenden Gewebe anlagern
- Er ist außerdem dazu in der Lage, diese Gewebsbarrieren zu überwinden (zu durchdringen)
- Er weist eine hohe Vermehrungsgeschwindigkeit auch im Inneren des befallenen Organismus' auf.
- Er kann der Reaktion des Immunsystems ausweichen
- Er besitzt das Potential zur Bildung von Enzymen und Giftstoffen, welche Gewebe und Zellen des „Wirtes“ schädigen und ihn so schwächen.

Unser Immunsystem schützt uns in der Regel vor einer Infektion durch Schimmelpilze. Nur besonders pathogene Schimmelpilze können einen Menschen infizieren, und dies meist auch nur dann, wenn sein Immunsystem zuvor geschwächt wurde.

Die gemeinsame Evolution von Menschen und Mikroben hat ein Gleichgewicht ausgebildet zwischen der Qualität der Abwehrmechanismen und der Pathogenität der Erreger. Es gibt nur wenige Erreger, welche einen vollkommen gesunden Menschen befallen können, und unter diesen finden sich keine Pilze sieht man einmal von Erkrankungen wie Fußpilz ab, welche sich in der Regel nur auf der Oberfläche der Haut abspielen. Doch gleicht die Körperabwehr in gewisser Weise einem Damm: entsteht in diesem eine kleine Bresche, beginnt das Wasser hindurchzuströmen und dabei gleichzeitig diese Lücke mehr und mehr zu erweitern. Gelingt es nicht rechtzeitig, die Lücke wieder zu stopfen, so kann es schnell zu einer Situation kommen, in der der gesamte Damm in Gefahr gerät. In einer solche Situation können dann auch Erreger in unserem Körper Fuß fassen, die zuvor nicht die geringste Chance gehabt hätten. Dieses Geschehen bezeichnet man als „**opportunistische Infektion**“. Es ist bei diesen zwingend notwendig, dass zunächst eine Schwächung der Körperabwehr erfolgt ist, bevor die **Opportunisten** zu einer Infektion führen können.

Viele Schimmelpilze wurden mittlerweile durch die „Biologische Gefahrstoffverord-

nung“ (BioStoffV) nach den Kriterien ihrer Virulenz und ihrer Pathogenität in verschiedene Risikogruppen eingeordnet. Hierbei steht die Zuordnung zu der Risikogruppe 2 für fakultativ pathogene Mikroorganismen, zu der Risikogruppe 3 für pathogene Mikroorganismen.

Neben der Pathogenität und der gesundheitlichen Prädisposition des Einzelnen wird noch die Bedeutung eines weiteren Faktors mit Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Infektion diskutiert. Hierbei handelt es sich um die Konzentration der Keime, mit der der Organismus konfrontiert wird, die sogenannte „**Expositionshöhe**“. Es existieren Berichte über Infektionen von nicht-abwehrschwachen Personen durch *Aspergillus fumigatus* (s.u.), welche in Kompostierungsanlagen arbeiteten und dort extrem hohen Keimzahlen dieser Erreger ausgesetzt waren (DIEHL et al. 1996).

Grundtypen der Mykosen

Infektionen durch Schimmelpilze lassen sich grundlegend unterteilen in **lokale** und **systemische Infektionen**.

Lokale Mykosen sind auf den Ort des Eindringens beschränkt und verbleiben meist auf der Oberfläche von Haut und Schleimhäuten. Bei systemischen Mykosen hingegen kommt es zu einer Ausbreitung der Erreger über das Blut oder die Lymphe in andere Organsysteme.

Auch die recht hohe Temperatur im Körperinneren des Menschen zählt mit zu den Abwehrmechanismen gegenüber Infektionen. Systemische Infektionen, also Infektionen im Körperinneren, können nur durch Schimmelpilze hervorgerufen werden, die in der Lage sind, die im Vergleich zur natürlichen Umgebung recht hohen Temperaturen zu tolerieren. Dazu gehören Vertreter der Gattungen *Aspergillus* und *Mucorales*. Vertreter anderer häufig im Lebensumfeld des Menschen anzutreffender Gattungen wie *Penicillium* oder *Paecilomyces* führen hingegen nur äußerst selten zu systemischen Infektionen.

- Aspergillosen: Aspergillosen können lokaler oder systemischer Natur sein. Der mit Abstand häufigste Erreger ist hierbei *Aspergillus fumigatus*, gefolgt von *Aspergillus flavus* und *Aspergillus niger*. *A. fumigatus* weist eine Reihe von Eigenschaften auf, welche seine Pathogenität erhöhen. So bildet er sehr kleine Sporen, die tief in die Atemwege gelangen können. Zudem besitzt er die Fähigkeit, auch noch bei 37 °C zu wachsen. Überdies produziert er Faktoren, welche direkt die Widerstandsfähigkeit des Immunsystems und der befallenen Organe beeinträchtigen, wie z.B. Gliotoxin (wirkt hemmend auf das Immunsystem, s. Anhang) und das Restriktotoxin (hemmt die Proteinsynthese der Wirtszelle). *A. fumigatus* scheidet auch proteinabbauende Enzyme (Proteasen) aus und weist eine gut ausgebildete Adhärenz (Anhaftung), vor allem zu Strukturproteinen (dem sogenannten Fibrinogen), auf. Letzteres besitzt eine hohe Bedeutung bei der Besiedelung von Wunden (PITT 1994, MORSCHHAUSER et al. 1995). Bei lokalen Infektionen im Inneren der Atemorgane bildet *A. fumigatus* große, kugelförmige Pilzkolonien, sogenannte **Aspergillome**. Ausgehend von diesen Infektionsherden kann es, vermittelt durch die proteinabbauende Aktivität der von dem Pilz

ausgeschiedenen Enzyme, zu systemischen Infektionen z.B. von Herz und Gehirn kommen. Der Großteil der systemischen Schimmelpilzinfektionen ist vermutlich auf Aspergillose zurückzuführen. Eine solche Infektion verläuft mit hoher Wahrscheinlichkeit letal.

- **Mucormycosen:** Mit diesem Begriff werden Erkrankungen durch Schimmelpilzgattungen zusammengefasst, welche zu den Zygomyceten gezählt werden (s. 2.2), also die Köpfchenschimmel *Mucor*, *Rhizopus*, *Rhizomucor* und *Absidia*. Sie sind jedoch nicht durch die von ihnen hervorgerufenen Krankheitsbilder voneinander zu unterscheiden. Diese Schimmelpilze besitzen eine hohe Affinität zu Blutgefäßen. Dort besiedeln sie die Wände von Arterien und Venen, können dort Pfropfen (= Thromben) bilden und schließlich durch die Gefäßwände hindurch in Gewebe einwachsen, wo sie **Nekrosen** hervorrufen können. Typisch für die Mucorales ist auch die Besiedelung von Haut- und Subkutangewebe. Mucormycosen sind vergleichsweise selten, nehmen in ihrer Häufigkeit jedoch zu. Voraussetzung für die Entstehung von Mucormycosen ist auch hier ein bestehendes Grundleiden, eine Prädisposition. Pilzthromben und die Zerstörung der Gefäßwände zählen zu den wichtigsten Symptomen einer ausgebildeten Mucormycose, die Prognose ist auch hier sehr schlecht.
- **Lokale Infektionen:** Hauptsächlich betroffen von lokalen Infektionen ist die Lunge, in geringerem Maße aber auch Haut, Schleimhäute und das Subkutangewebe. In jedem Fall ist die voraussetzende Bedingung für die Entstehung einer **opportunistischen** Infektion, dass eine vorangegangene Schädigung (Verletzung) des betroffenen Gewebes besteht. Im Falle der Haut könnten als Beispiele für eine Schädigung Verbrennungen oder Ekzeme genannt werden. Eine vergleichsweise häufige lokale opportunistische Infektion durch Schimmelpilze ist der Befall des Gehörganges durch *Aspergillus niger* und verschiedene *Mucor*-Arten in Folge einer chronischen Mittelohrentzündung. Dies wird als **Otomykose** bezeichnet. Bei der **Endophthalmitis** handelt es sich um eine Aspergillose im Bereich der Augenschleimhäute, welche 2-3 Wochen nach einer Operation oder einer Verletzung entstehen kann und meist zum Verlust des gesamten Auges führt. Vorgeschädigte Finger- oder Zehennägel können durch *Scopulariopsis brevicaulis* befallen werden. Man spricht dann von einer **Onychomykose**, welche zumeist besonders hartnäckig ist. Die häufigsten Infektionen der Haut werden jedoch nicht durch Schimmelpilze, sondern durch die zu der Abteilung der Ascomycota gerechneten **Dermatophyten** (s. 2.2) verursacht. Diese sind in der Lage, Keratin als Nährstoffquelle zu nutzen, welches eines der Hauptbestandteile der menschlichen Haut, der Nägel und der Haare ist. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle sind mit dem Begriff der **Hautmykosen** Infektionen durch Dermatophyten gemeint. Zu guter Letzt sollte betont werden, dass auch auf der vollkommen gesunden Haut zu jeder Zeit bestimmte Pilze vorzufinden sind. Sprosspilze wie *Candida albicans*, eine Hefe, gehören zur natürlichen mikrobiellen Flora der Haut. Jedoch kann es bei einem übermäßigen Wachstum solcher natürlicher „Bewohner“ zu einer sogenannten **endogenen Hautmykose** kommen. Der Begriff

SCHIMMELPILZE

Teil B: Schimmelpilze im Lebensumfeld des Menschen „Jekyll and Hyde“

„endogen“ bezeichnet hierbei den Umstand, dass der Erreger im Normalfall in einem natürlichen Gleichgewicht bereits auf der Haut vorlag und eine Mykose erst dann ausgebildet wurde, als dieses Gleichgewicht gestört wurde. Ursache hierfür könnten z.B. andere Infektionen und Krankheiten, die Einnahme von Medikamenten oder auch übertriebene Körperhygiene mit ungeeigneten Körperpflegemitteln sein.

4 Schimmelpilze als Schädlinge
4.1 Gesundheitsgefahren durch Schimmelpilze

Spezies	RG	Erkrankung	Gefährdete Personen
<i>Absidia</i> spp.	1	Mucorinfektion in Lunge, Nasen-nebenhöhle, ZNS, Auge, Haut	abwehrschwache
<i>Aspergillus fumigatus</i>	2	Invasive pulmonale Aspergillose, Invasive Aspergillose der Nasennebenhöhle, Aspergillom, Sinusitis, allergische bronchopulmonale Aspergillose, Otitis externa	Abwehrschwache, Patienten mit Bronchiektasen, Kavernen, Cysten durch vorbestehende Lungenerkrankungen, Atopiker
<i>Aspergillus nidulans</i>	1	Invasive Aspergillose	abwehrschwache
<i>Aspergillus niger</i>	1	Invasive Aspergillose (sehr selten), Otitis externa, Aspergillose der Lunge und Nasennebenhöhle	abwehrschwache
<i>Aspergillus flavus</i>	2	Invasive Aspergillose (sehr selten), allergische bronchopulmonale Aspergillose, Nasennebenhöhlenaspergillom	abwehrschwache, Atopiker
<i>Aspergillus terreus</i>	1	Invasive Aspergillose (sehr selten), Otitis externa	abwehrschwache
<i>Cladophialophora bantiana</i>	3	Hirnabszesse	abwehrschwache
<i>Conidiobolus</i> spp.	2	Chronische Nasenschleimhautentzündung	
<i>Cunninghamella</i> spp	1	Disseminierte und pulmonale Allgemeininfektionen	abwehrschwache
<i>Exophiala dermatidis</i>	2	Sinusitis, Pneumonie, Hirnabszesse	Mukoviszidose
<i>Fusarium</i> spp.	1-2	Fusariose	abwehrschwache
<i>Mucor</i> spp.	1	Mucorinfektion in Lunge, Nasennebenhöhle, ZNS, Auge, Haut	abwehrschwache
<i>Paecilomyces variotii</i>	1	Phaehyphomykose	abwehrschwache
<i>Penicillium</i> spp.	1-2	Besiedelung des Bronchialtraktes (Penicilliose)	Patienten mit Bronchiektasen, Kavernen, Cysten durch vorbestehende Lungenerkrankungen
<i>Phoma</i> spp.	1	Phaehyphomykose	abwehrschwache
<i>Pseudoallescheria boydii</i>	2	Sinusitis, Pneumonie, Arthritis, Osteomyelitis, Endophthalmitis, Hirnabszesse, Pilzball in Lunge oder Nasennebenhöhle	abwehrschwache
<i>Rhizomucor</i> spp.	1	Infektion in Lunge, Nasennebenhöhle, ZNS, Auge, Haut	abwehrschwache
<i>Rhizopus</i> spp.	1	Infektion in Lunge, Nasennebenhöhle, ZNS, Auge, Haut	abwehrschwache
<i>Ramichloridium machenzie</i>	1	Hirnabszesse	abwehrschwache
<i>Phialophora richardsiae</i>	1	Zystische Phaehyphomykose	abwehrschwache
<i>Syncephalastrum</i> spp	1	Pilzball im Respirationstrakt	

TAB. 4: Schimmelpilze, welche eine Infektion über den Luftweg hervorrufen können, ihre Einstufung in die Risikogruppen (RG) nach der TRBA 460, ausgelöste Krankheitsbilder sowie besonders gefährdete Personenkreise (nach LGA, 2001)

4.1.4 Auswirkungen der „Microbial Volatile Organic Compounds“ (mVOC)

Die von Schimmelpilzen abgegebenen flüchtigen Stoffwechselprodukte (mVOC, s. 2.3.1) führen zu den charakteristischen Schimmelgerüchen in Innenräumen. Einige dieser Verbindungen kommen auch als Pflanzeninhaltsstoffe vor, andere gehören zu der allgemeinen Gruppe der „Volatile Organic Compounds“ (= flüchtige organische Verbindungen, VOC). Einige für Schimmelpilze spezifische mVOCs sind jedoch ein Merkmal für einen wahrscheinlich vorliegenden Schimmelpilzbefall.

In höheren Konzentrationen können mVOCs zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Im Normalfall werden jedoch auch in stark befallenen Innenräumen solche Konzentrationen nicht erreicht (SCHUCHARDT et al. 2001, SAGUNSKI, 1997). Generell bleibt anzumerken, dass die gesundheitliche Bedeutung der mVOCs noch nicht ausreichend erforscht ist. Es gibt jedoch Berichte, in denen die vor Ort anzutreffenden, auf einen Schimmelpilzbefall ursächlich zurückzuführenden Belastungen der Raumluft mit spezifischen mVOCs zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Kopfschmerzen, Erschöpfung sowie Reizungen der Augen, der Nasen- und Rachenschleimhäute führten (TOBIN et al. 1987, FLANNIGAN et al. 1991). Zudem liegen einzelne Untersuchungen vor, nach denen mVOCs immunsuppressive Auswirkungen haben können (KREJA & SEIDEL, 2000). Bei Versuchen in vitro konnten für viele der typischen mVOC jedoch keine zytotoxischen, genotoxischen oder mutagenen Wirkungen auf Säugerzellen festgestellt werden (KREJA & SEIDEL, 2001).

Auch KORPI et al. (1999) kommen in Untersuchungen mit drei Substanzen aus der Gruppe der mVOC (1-Octen-3-ol, 3-Octanol, 3-Octanon) zu dem Schluss, dass der Beitrag der mVOC bezüglich der irritativen Effekte, die unter starken Schimmelpilzbelastungen häufig dokumentiert wurden, eventuell geringer ist als ursprünglich angenommen wurde.

Die Konzentrationen, in denen mVOCs in der Regel in Innenräumen auftreten, machen eine direkte gesundheitliche Gefährdung unwahrscheinlich. Sie können über ihren unangenehmen Geruch allerdings eine erhebliche Beeinträchtigung darstellen.

4.1.5 Psychosoziale Aspekte

Warum die meisten Menschen sich mit einem Schimmelpilzbefall in Ihrer Wohnung nicht wohlfühlen, hat sicherlich zu einem guten Teil zu tun mit dem Wissen um (bzw. dem Erahnen von) gesundheitliche Gefährdungen, welche mit dem Freisetzen von Sporen wie auch von Stoffwechselprodukten verbunden sein können. Wir haben versucht, Ihnen den ungefähren Stand der wissenschaftlichen Forschung bezüglich dieser Risiken in den vorangegangenen Kapiteln darzustellen.

Dass der Schimmel in der Wohnung uns in der Regel keine Ruhe lässt ist jedoch vermutlich nicht nur auf die Sorge vor Schädigungen der Gesundheit zurückzuführen. Viele Dinge, die wir zu uns nehmen, die unser Wohnumfeld gestalten und viele der Aktivitäten, welche wir Tag für Tag gewohnheitsmäßig unternehmen, erfüllen diese Bedingungen der gesundheitlichen Gefährdung und/oder Belastung; dennoch lösen sie häufig nicht ver-

gleichbare Reaktionen aus, wie dies bei Schimmelpilz-befallenen Wohnungen auftritt.

Nun, dieser Befund kann eigentlich nicht überraschen. Der sichtbare, unkontrollierte Befall von Nahrungsmitteln, Kleidung und Unterkünften durch Mikroorganismen ruft in uns, vermittelt durch kulturelle Normen und eventuell auch unterstützt durch angeborenes Vermeidungsverhalten, eine innere Ablehnung hervor, die von einem „sich unwohl in seiner Haut (Wohnung) fühlen“ bis hin zu reiner Abscheu reichen kann. Es ist vermutlich nicht allzu abwegig, wenn man feststellt, dass diese Ablehnung in dem Maße gestiegen ist, wie uns wissenschaftlicher wie technischer Fortschritt erlaubten, uns gegen die Welt der Mikroben überhaupt zur Wehr zu setzen. „My home is my castle“ – dieses zum Wohlbefinden beitragende Bekenntnis fällt schwer, wenn ein ungebetener Gast sich an unseren Raufasertapeten gütlich tut. Ein Gast, der sich nicht einfach zur Tür hinauskomplimentieren lässt, dessen „Verhalten“ wir nicht verstehen und den wir, auf Grund seiner Winzigkeit, in vielen seiner Lebensformen mit dem bloßen Auge gar nicht wahrnehmen können. Das Unsichtbare und das Unverständliche kann Angst in uns auslösen. Und (unkontrollierbare) Angst kann allein schon krank machen.

Die Eindrücke, die uns unser Richsinn vermittelt, sind uns häufiger weniger bewusst als jene, welche wir über die Ohren und die Augen aufnehmen. Die Gehirnregionen, welche unseren Richsinn verarbeiten (das sogenannte „olfaktorische Zentrum“), liegen im Mittelhirn und damit in stammesgeschichtlich sehr viel älteren Hirnregionen als unser Seh- und Hörzentrum. In diesen „älteren“ Hirnregionen findet auch ein Großteil dessen statt, was wir als Emotionalität bezeichnen. Die anatomische Nähe allein ist natürlich kein Beweis dafür, dass Gerüche stärker direkt unsere Emotionen beeinflussen können, als dies Reizen von Auge und Ohr, die zunächst sehr viel stärker durch unser Großhirn (unserem vermutlich eigentlichem „Bewusstsein“) vorsortiert und verarbeitet werden, möglich ist. Die neurophysiologische wie auch die Verhaltensforschung geben allerdings mittlerweile Anlass dazu, dem Richsinn einen sehr viel größeren Anteil an den unbewussten Prozessen, welche zu unserem Verhalten beitragen, zuzuweisen, als dem Seh- oder Hörsinn. Solche Erkenntnisse nutzt z.B. die Werbeindustrie, wenn durch die angenehme, kaum bewusst wahrnehmbare Duftnote in Kaufhäusern dem potentiellen Kunden bei seiner Kaufentscheidung etwas nachgeholfen werden soll.

Schimmelpilze bilden während ihres Wachstums die sogenannten mVOCs, welche von uns schon in geringen Raumluftkonzentrationen wahrgenommen (gerochen) werden können. Obgleich diese Konzentrationen nach heutigem Wissensstand meist weit unter den Konzentrationen liegen, welche schädigend auf unsere Zellen und Gewebe wirken können, vermögen sie es doch unser Wohlbefinden zu beeinflussen, eventuell auch dann, wenn uns ein unangenehmer Geruch gar nicht bewusst ist.

K. FIEDLER und E. SCHÜTZ berichten in einem Beitrag zu einer Fachtagung an der Medizinischen Universität zu Lübeck im Jahre 2001 von Untersuchungen, die sie in schimmelpilzbelasteten Wohnungen in Berlin Mahrzahn im Jahre 1988 durchführten. Hierbei sollten Probanden ihren subjektiven Eindruck der Raumluftqualität beim Betreten einer durch Schimmelpilze befallenen Wohnung angeben. Folgende Angaben wurden gemacht: Schimmelig, muffig, modrig, feucht, unsauber, schlecht gelüftet, schmutzig und stickig. In keinem Fall wurde der Geruch als angenehm empfunden. Zudem gaben nur die wenigsten an, sich

an die besondere Geruchssituation in der Wohnung im Laufe der Zeit gewöhnt zu haben. Weiterhin wurde als besonders störend der muffige Geruch der Kleidung angegeben, der teilweise noch Tage danach auch durch Dritte wahrgenommen worden sei, sowie die Angst geäußert, dass Dritte sie auf Grund dieses Geruches als unsaubere Personen verdächtigen könnten.

Es ist sicher nicht allzu abwegig, wenn hier festgehalten wird, dass diese Gefahr der sozialen Stigmatisierung auf Grund „unsauber“ riechender Kleidung eines Bewohners einer schimmelpilzbelasteten Wohnung ebenfalls von Belang ist, wenn es um die Frage geht, in wieweit Schimmelpilze unsere Lebensqualität negativ beeinflussen können – ohne dass sie uns im eigentlichen Sinne krank machen. Gerade Kinder neigen im besondern Maße dazu, andere Kinder auf Grund solcher Gerüche („Du stinkst!“) offen auszugrenzen.

4.2 Materialzerstörung durch Schimmelpilze

Ein Wachstum von Schimmelpilzen in Wohnräumen ist nicht nur deswegen problematisch, weil von ihnen gesundheitliche Gefahren, unangenehme Gerüche sowie eine allgemeine Minderung des ästhetischen Gebrauchswertes unserer Wohnung ausgehen. Bei einem schweren Befall durch Schimmelpilze können Baumaterialien auch ihre essentiellen bauphysikalischen bzw. mechanisch – statischen Eigenschaften einbüßen, so dass schließlich ihre Nutzbarkeit in Frage gestellt werden muss.

Neben der möglichen Gesundheitsgefährdung für die Bewohner stellt ein Schimmelpilzbefall u.U. auch eine Gefahr für die Immobilie selbst dar.

Unsere Wohnungen und Häuser bestehen zu einem Großteil aus Stoffen, die Pflanzen- und Holzfasern enthalten, geeignete Nährböden für das Wachstum eines Schimmelpilzes, wenn nur genügend Wasser darin enthalten ist. Wenn wir nicht konsequent darauf achten, für ihn geeignete Wachstumsbedingungen zu vermeiden (s. 2.4.3), wird ein Wachstum von Schimmelpilzen über kurz oder lang stattfinden. Sporen sind jedenfalls immer präsent.

Die Erforschung der materialzerstörenden Eigenschaften von Schimmelpilzen beruht zu einem guten Teil auf den Erfahrungen, welche die Streitkräfte der ehemaligen Kolonialmächte vor allem in den Tropen machen mussten, dass nämlich Textilien, Papier und Leder unter den dort herrschenden Bedingungen hoher Temperatur und hoher (Luft-)Feuchtigkeit schnell zerstört wurden. Diese Zerstörung oder Schädigung von Materialien durch das Wachstum von Schimmelpilzen beruht im Wesentlichen auf zwei Vorgängen:

- Chemische Veränderungen: Der auf dem Material wachsende Pilz nutzt das Material selbst oder zumindest einen organischen Teil davon als Nährstoff, was eine Zersetzung dieses organischen Anteils zur Folge hat. Hierzu gehört z.B. der Abbau von Cellulose-Fasern und verwandten Stoffen. Das im Holz mit einem hohen Massenanteil enthaltene Lignin wird zwar z.T. auch von Schimmelpilzen, hauptsächlich aber von Bakterien (sogenannten Actinomyceten) und von

höheren Pilzen (so z.B. der „berüchtigte“ Hausschwamm, *Serpula lacrymans*, ein Vertreter der Basidiomyceten, s. 2.2) abgebaut. Organische Substanzen zersetzende Enzyme können durch Schimmelpilze auch in das Material selbst abgegeben werden. Gleichzeitig kann der Befall durch Schimmelpilze auch den pH-Wert eines Materials verändern. Dies erfolgt durch die Stoffwechsellaktivität und die Ausscheidung von Abbauprodukten z.T. ungerichtet, z.T. aber auch durch die aktive Ausscheidung organischer Säuren. Veränderungen des pH-Wertes können zu einer weiteren Zerstörung des Materials führen. Schließlich bilden viele Schimmelpilze auch Pigmente, die zu Verfärbungen im Material führen.

- **Physikalisch – mechanische Veränderungen:** Hier beruht der Schaden auf dem Wachstum des Mycels (s. 2.1.1) im befallenen Material. In diesem entstehen nach und nach kleine Risse. Dies gleicht jenen Prozessen, die bei einem Wachstum von Pflanzenwurzeln auf und an Mauerwerk zu beobachten sind. Durch die zunächst mikroskopisch feinen Risse geht ein guter Teil der Stabilität des betroffenen Materials verloren. Auf Grund der nach und nach immer größer werdenden Risse dringen mehr und mehr Hyphen in das Material ein, aber auch andere Mikroorganismen sowie Feuchtigkeit. Dies treibt den fortschreitenden Zersetzungsprozess immer schneller voran. In elektrischen Geräten kann das fortwachsende Mycelwachstum auch dazu führen, dass sich die Leitfähigkeit verändert und Isolierungen unwirksam werden.



ABB. 7: Fruchtkörper des Hausschwamms

Durch Schimmelpilze abbaubare Materialien

Dass Schimmelpilze bei geeigneter Temperatur und Materialfeuchtigkeit (Bau-)Materialien angreifen, die aus Cellulose- (Textilien) und Holzfasern (u.a. vor allem Papier und Pappe) bestehen oder diese in Teilen enthalten, haben wir Ihnen bereits dargestellt. Dass Schimmelpilze auch Leder und (Schaf-)Wolle abbauen können, kann wenig überraschen. Schim-

melpilze besitzen aber ein noch viel weitreichenderes Spektrum an Materialien, auf denen ein – zumindest langsames – Wachstum stattfinden kann:

- Wachstum auf Kunststoffen und Gummi: Reine Kunststoffpolymere sind in der Regel resistent gegenüber fast allen Mikroorganismen. Diese Eigenschaft trug erheblich zum „Siegeszug“ dieser Werkstoffklasse bei. So existieren in der Tat auch nur sehr vereinzelt „Exoten“ auch unter den Schimmelpilzen, die unter optimalen Lebensbedingungen reine, vereinzelt Kunststoffe wie z.B. PVC und Polyurethane abbauen können. Viele Schimmelpilze sind hingegen in der Lage, die in Kunststoffen zum Einsatz kommenden Zusatzstoffe (Weichmacher, Emulgatoren, Füllstoffe, Gleitmittel u.a., BECKER & GROß, 1974) abzubauen. Das Schimmelwachstum führt dann zu einer Verminderung der Reiß-, Zug- und Biegefestigkeit, der Elastizität und u.U. auch der Isolierwirkung befallener Kunststoffe. Häufig wird über ein Schimmelpilzwachstum auf Dichtstoffen, so z.B. auf Silikonfugen, berichtet. In der Tat sind in Duschen und an anderen dauerfeuchten Orten häufig Fugen zu entdecken, die dunkle Flecken aufweisen, welche auf eingewachsene Pilzmycelien zurückzuführen sind. Erstaunlicherweise erweisen sich Silikondichtstoffe im Laborversuch aber als eigentlich sehr widerstandsfähig gegenüber mikrobiellen Angriffen. Bei diesen Schadensfällen könnte der eigentliche Nährboden also auch in dünnen „Schmutz“-Filmen zu suchen sein, die sich auf den betroffenen Materialien abgelagert haben.
- Wachstum auf Farben und Anstrichen: Meist dienen bei dem Befall von Farben und Anstrichen im Vorratsbehälter oder im verarbeiteten Zustand die dem eigentlichen Pigment zugefügten Tenside, Verdichtungsmittel, Weichmacher oder, falls vorhanden, organische Öle (Lein- oder Rhizinusöl) als Nahrungsgrundlage. Auf Wand- und Deckenanstrichen findet bei ausreichender Feuchtigkeit vergleichsweise häufig Schimmelpilzwachstum statt, was muffige Gerüche und Verfärbungen nach sich führen kann. Dabei sind die durch die Gattungen *Alternaria*, *Aspergillus* und *Cladosporium* hervorgerufenen Verfärbungen meist grau bis schwarz, die durch *Penicillium* verursachten hingegen häufig grünlich.
- Wachstum auf mineralischen Baustoffen: Schimmelpilze sind dazu in der Lage, durch das Ausscheiden organischer Säuren mineralische Baustoffe anzugreifen. Als eigentlicher Nährstoff dürften hierbei in erster Linie organische Verunreinigungen des mineralischen Baustoffes eine Rolle spielen. Einige Putzzusätze wie z.B. Vinylacetat, welches eine bessere Haftung und Verarbeitbarkeit gewährleisten soll, sind ein geeigneter Nährboden für Schimmelpilzwachstum.

Grundsätzlich soll an dieser Stelle nochmals (s.o.) darauf hingewiesen werden, dass das Wachstum von Schimmelpilzen auf der Oberfläche eines Materials nicht unbedingt bedeuten muss, dass der Schimmelpilz hierbei dieses Substrat als Nährboden nutzt. Vielmehr kann, oft begünstigt durch hohe Feuchtigkeit, ein Film organischer Substanzen (z.B. Anflugstaub, Schmutzwasserrückstände usw.) auf der Oberfläche haften, der genügend Nährstoffe bietet, um den genügsamen Schimmelpilzen ein Wachstum zu ermöglichen.

Durch fortlaufendes Mycelwachstum und das damit verbundene Ausscheiden von organischen Säuren und anderen zersetzenden Substanzen kann dann die Materialoberfläche mehr und mehr angegriffen werden und es so zu einer andauernden Schädigung kommen. Besonders problematisch ist ein solches Oberflächenwachstum dann, wenn Materialien nur durch eine dünne oberflächliche Beschichtung geschützt sind, unter dieser Beschichtung aber den Schimmelpilzen ein reichhaltiges Nährstoffangebot bieten (z.B. lackierte Sperrholzplatten). Durchdringt das Mycel eines Schimmelpilzbefalls erst einmal die schützende Barriere, dann wird dieses Material schnell auch in der Tiefe von dem Schimmelpilzwachstum erfasst – Voraussetzung hierfür ist, Sie ahnen es schon, eine ausreichende Materialfeuchtigkeit.

Teil C: Nachweisverfahren und Bewertungsgrundlagen

Sie haben im vorangegangenen Kapitel nun einiges über das Gefahrenpotential der Schimmelpilze erfahren. Doch gleichzeitig haben wir auch versucht, Ihnen zu vermitteln, dass eine natürliche Umgebung des Menschen niemals vollkommen frei von Schimmelpilzen sein kann. Doch wo verläuft die Grenzlinie zwischen dem Unvermeidbaren, dem Normalen und dem Außergewöhnlichen, dem Gefährlichen? Und welchen Bestandteil einer Schimmelpilzbelastung nutzen wir als Kriterium, an Hand dessen wir eine solche Grenzlinie ziehen könnten?

Ein guter Teil des Gefährdungspotentials von Schimmelpilzen rührt daher, dass sie auch in der Atemluft vorliegen und zudem eine Reihe von Stoffwechselprodukten erzeugen und ausscheiden, die ebenfalls die Luft belasten. Diese sind entweder gebunden an feinste Partikel und Stäube des ehemaligen Nährbodens (Mykotoxine) oder liegen als leicht flüchtige (gasförmige) organische Verbindungen (mVOCs) vor. Während wir den Verzehr befahrener Lebensmittel vergleichsweise leicht selbst vermeiden oder durch die gängigen Hygienevorschriften verhindern können, sind wir gegenüber den mit der Luft verfrachteten Zellen bzw. Sporen (= **Bioaerosolen**) und Stoffwechselprodukten eher hilflos. So sollte in der Frage einer Bewertungsgrundlage von Schimmelpilzbelastungen auch die Luft als Medium Aufmerksamkeit erfahren.

Die Aussage, dass unsere Umwelt niemals vollkommen frei von Schimmelpilzen sein kann, bezieht sich auf das Vorkommen von Schimmelpilzen unter freiem Himmel auf abgestorbenen organischen Materialien. Es ist nicht zu vermeiden, dass ihre mikroskopisch kleinen Sporen auch in unsere Wohnungen gelangen, stellen diese doch niemals luftdicht verschlossene Räume dar. Es sollte jedoch nicht hingenommen werden, wenn Schimmelpilze auf Baumaterialien in Innenräumen wachsen, allerdings unter dem Vorbehalt, dass in bestimmten Räumlichkeiten wie z.B. in einer Duschkabine, eine Besiedlung der Silikonfugen durch Schimmelpilze nicht in jedem Fall vermieden werden kann. Begründet ist die Forderung nach schimmelfreien Wohnungen darin, dass Schimmelpilzwachstum in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle vergleichsweise leicht vermeidbar gewesen wäre. Neben die unvermeidbare Belastung durch Schimmelpilze aus der Natur tritt dann die vermeidbare durch Schimmelpilze in unseren Wohnungen.

Eine Aufgabe von Bewertungsgrundlagen sollte es sein, einen Maßstab zu besitzen, an Hand dessen die normale, von außen kommende (= **extramurale**) und natürliche Belastung von der außergewöhnlichen, in Innenräumen entstehende (= **intramurale**) zu unterscheiden (Definition der Hintergrundbelastung).

Eine weitere wichtige Bedeutung von Bewertungsgrundlagen ist die im Sinne eines Grenzwertes, also die Frage, ab welcher Belastungssituation mit einer bestimmten gesundheitlichen Beeinträchtigung zu rechnen ist (Definition des epidemologisch definierten Dosis-Wirkung-Zusammenhanges). Dies stellt sich im Falle der mit Schimmelpilzen verbundenen gesundheitlichen Risiken in mehrerer Hinsicht häufig als schwierig dar bzw. ist schlecht nicht möglich. Die Gründe hierfür können unter drei Gesichtspunkten zusammengefasst werden:

- **An welcher individuellen gesundheitlichen Konstitution soll sich der Bewertungsmaßstab orientieren?** Gerade im Falle der durch Schimmelpilze ausgelösten allergischen Erkrankungen ist es plausibel, den bereits sensibilisierten von dem „gesunden“ Menschen zu unterscheiden oder in Hinsicht auf Mykosen für die bereits immungeschwächte Person andere Grenzwerte zu fordern als für einen Menschen, deren Immunsystem intakt ist.
- **Was sollen wir messen (und bewerten)?** Die Anzahl allein der bisher bekannten von Schimmelpilzen ausgehenden Faktoren mit einem möglichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit ist schwer zu bestimmen. Wir haben versucht, Ihnen in Kapitel 4.1 einen Überblick darüber zu verschaffen, was hierbei alles eine Rolle spielen kann. Zur Beurteilung der Gefährdungslage durch pathogene Schimmelpilze oder zur Abschätzung muss eine Artbestimmung und eine Quantifizierung der Schimmelpilzzellen durchgeführt werden. Es ist jedoch fraglich, ob wir dabei tatsächlich alle Arten bzw. alle Zellen, welche hier vorliegen, erfassen. Selbst wenn dies gelänge, wissen wir immer noch nicht, welche Mykotoxine, welche mVOCs von diesen spezifischen Stämmen in genau dieser Situation gebildet werden – zur Bestimmung aller prinzipiell möglichen Risikofaktoren müsste eine Unzahl an Einzeluntersuchungen durchgeführt werden.
- **Wann soll gemessen (und bewertet) werden?** Die Freisetzung von Sporen aus einer Schimmelpilzkolonie („**Sporulation**“) wird wahrscheinlich gesteuert durch eine Vielzahl an Faktoren (s. 2.4). Die Belastung der Atemluft durch Schimmelpilzsporen kann sich von einem Tag auf den anderen, eventuell von einer Stunde zur nächsten, vollkommen verändern. Vergleichbares gilt auch für die Produktion z.B. von Mykotoxinen und mVOCs, wobei hier dem aktuellen Nährstoffangebot, welches dem Schimmelpilz zur Verfügung steht, eine besondere Bedeutung beikommt. Die tatsächliche Belastungssituation kann strenggenommen immer nur für einen bestimmten Zeitpunkt definiert werden. Wollten wir die Belastung, der Sie in Ihrer durch Schimmelpilze belasteten Wohnung tagaus tagein ausgesetzt sind, bestimmen, müssten wir Messungen sehr viel häufiger als nur ein einziges Mal durchführen – was in den allermeisten Fällen zeitlich und finanziell zu aufwändig wäre.

Eine weitere Problematik auf dem Gebiet der Definition von Grenzwerten liegt darin begründet, dass wir zur Abschätzung gesundheitlich relevanter Schwellenwerte zu einem großen Teil darauf angewiesen sind, die Erkenntnisse, die wir aus Versuchen an Tieren und an Zellkulturen gewonnen haben, auf den menschlichen Organismus zu übertragen.

Dies alles resultiert darin, dass groß angelegte epidemiologische Studien über den kausalen Dosis-Wirkung-Zusammenhang von Schimmelpilzbelastungen, welche für die Festlegung von auch rechtlich verbindlichen Grenzwerten notwendig wären, bisher praktisch nicht vorliegen (HERR et al., 2002).

Aus unserer Sicht ist es bedauerlich, dass die Diskussion um wissenschaftlich begründete Grenzwerte, welche, wie oben angedeutet, nur schwer zu definieren sind, häufig zu Lasten

der Einsicht geht, dass grundsätzlich vorhandene Möglichkeiten genutzt werden sollten, um die Belastung von Menschen durch Schimmelpilze so gering wie möglich zu halten.

Die Belastung durch Schimmelpilze sollte stets so gering wie möglich gehalten werden, auch wenn kein konkretes Gefährdungspotential festgestellt werden kann.

Schimmelpilze stellen eine potentielle Gesundheitsgefährdung dar, sie können erwiesenermaßen eine Reihe von Erkrankungen verursachen, sie bilden unangenehme Gerüche und mindern ganz allgemein die Wohnqualität. Kein Mensch würde jemals behaupten, dass er *gerne* in einer verschimmelten Wohnung lebt.

Wir wollen nun versuchen, Ihnen im Folgenden die derzeit etablierten Nachweisverfahren und die dazugehörigen Bewertungsgrundlagen in Bezug auf Belastungen durch Schimmelpilze zu vermitteln. Zudem möchten wir auch den Versuch unternehmen, Ihnen neue, in der Praxis bisher nicht oder kaum eingesetzte Ansätze auf diesem Gebiet vorzustellen.

5 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen in der Raumluft

Das Vorkommen von Schimmelpilzen ist nicht auf feste Nährböden beschränkt. Zwar benötigen Schimmelpilze einen solchen für Wachstum und Vermehrung, aber fast alle gesundheitlich relevanten Komponenten einer Schimmelpilzbelastung sind auch in der Atemluft enthalten:

- Lebende bzw. fortpflanzungsfähige sowie tote Zellen (hier auch Bruchstücke von toten Zellen) der Schimmelpilze. Hiermit verbunden ist das Vorkommen von Allergenen und Glucanen (s. 4.1.2) in der Raumluft, zudem das Risiko einer Infektion über luftverfrachtete Schimmelpilze
- Mykotoxine, entweder anhaftend an in der Luft schwebenden Feinstaubpartikeln oder in Zellen bzw. Zellfragmenten von Schimmelpilzen enthalten
- MVOCs, also leicht flüchtige organische Verbindungen, welche durch Schimmelpilze produziert werden

Wichtig ist in diesem Zusammenhang noch die Bedeutung des Begriffs der „**Bioaerosole**“. Hiermit werden Gemische aus kleinsten Partikeln und Atemluft bezeichnet. Die Partikel, welche biologischen Ursprungs sind, schweben hierbei in der Luft, sie werden durch Luftbewegungen getragen. Bei vollständig ruhiger Luft sinken nach und nach alle Partikel zu Boden. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, ist für die Sedimentation in der Luft in erster Linie abhängig von der Dichte (Masse pro Volumen) eines bestimmten Partikels. Diese Partikel können, zumindest solange sie nicht durch den Kontakt mit Feuchtigkeit eine zu hohe Dichte erlangen, durch erneut einsetzende Luftbewegungen

5.1 Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft

wieder in den Schwebezustand übergehen. Wiederum gilt hier, dass dies umso leichter geschieht, je geringer die Masse und je geeigneter die aerodynamische Struktur der entsprechenden Partikel ist.

Luftuntersuchungen auf Partikel stellen „Momentaufnahmen“ dar, weil die in der Luft befindlichen Teilchen nach und nach zu Boden sinken.

Lebende Schimmelpilze hinterlassen „Spuren“ – Sporen und Mycelbruchstücke als sogenannte Bioaerosole sowie Mykotoxine und mVOCs – in der Innenraumluft und wer versteht, sie zu lesen, kann über diese Spuren auch einem Schimmelpilzbefall in einem Innenraum auf die Spur kommen, der dem Blick zunächst nicht zugänglich ist. Diese „Detektiv-Arbeit“ ist von erheblicher Bedeutung bei der Untersuchung der Raumluft auf Schimmelpilzbelastungen.

5.1 Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft

Nachweisverfahren

Sämtliche Nachweisverfahren für lebende Schimmelpilzzellen in der Raumluft beruhen darauf, Zellen von Schimmelpilzen (in erster Linie handelt es sich hier um Sporen), welche durch Wachstum ein neues Mycel bilden können, auf einen für ihr Wachstum geeigneten Nährboden zu bringen und sie dort unter Auswahl der für sie optimalen Umweltbedingungen auskeimen zu lassen. Man bezeichnet diese Schimmelpilzpartikel als „koloniebildende Einheiten“ mit der Abkürzung **KBE** (englisch: **Colony-Forming Units**, Abkz. **CFU**). Im Idealfall bilden sie dort Kolonien und schließlich auch Fruchtkörper, an Hand derer sich unter dem Lichtmikroskop dann die jeweiligen Gattungen bzw. Arten bestimmen lassen. Die in der Luft befindlichen einzelnen Sporen bzw. sonstigen Schimmelpilzzellen können hingegen bei höherem Aufwand (in der Mikroskopie werden für Einzelzellen höhere Vergrößerungen notwendig) in der Regel höchstens bis zur Gattungsgrenze bestimmt werden. Man könnte diese Verfahrensweise als eine Art „umgekehrte Lupe“ bezeichnen: die nachzuweisenden Partikel, nämlich die koloniebildenden Einheiten werden unter Ausnutzung ihres biologischen Potentials erst selbst vergrößert, bevor eine Bestimmung erfolgt. Während die einzelne Spore für das bloße Auge noch unsichtbar war, kann man die aus ihr hervorgegangene Kolonie sehr wohl ohne die Hilfe von Mikroskopen erkennen.

Die gängigen Nachweisverfahren unterscheiden sich darin, ob sie eine Konzentrationsangabe (quantitative Nachweisverfahren) ermöglichen oder nicht (semi- bzw. nicht-quantitative Nachweisverfahren) sowie in der Art und Weise, wie die koloniebildenden Einheiten auf den Nährboden gebracht werden (direkt oder indirekt).

Ein Beispiel für ein semi-quantitatives Nachweisverfahren ist das Aufstellen einer offenen „Petrischale“ (sogenannte „Settle Plates“) mit geeignetem Nährboden. Durch Sedimentation gelangen in der Luft befindliche Pilzsporen direkt auf die Petrischale. Nach dem „Bebrüten“ (Inkubation) der Platte kann dann eine Aussage über Anzahl und Art der auf

der Schale gesammelten Schimmelpilze getroffen werden. Dieses Verfahren erlaubt keinen Rückschluss darauf, wie viele Sporen pro Kubikmeter Raumluft enthalten sind. Bei gleicher Sammelzeit besteht lediglich die Möglichkeit, unterschiedliche Platten miteinander zu vergleichen (= semi-quantitativ). Dieses Nachweisverfahren gilt weithin als wenig zuverlässig. Schwerere Sporen, welche höhere Sedimentationsgeschwindigkeiten aufweisen, werden überrepräsentiert. Die Anzahl der nachgewiesenen Arten bzw. Gattungen ist in der Regel geringer als bei anderen Nachweisverfahren (s.u.) (INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON MEN, REPORT NO. 12, 1993).

Das Ansaugen eines definierten Volumens an Raumluft mittels einer Pumpe und das Abscheiden der in dieser Luft enthaltenen Partikel mittels „Niederschlagung“ (Impaktion) oder eines Filters stellen quantitative Nachweisverfahren dar. Es ist hier nämlich möglich, die Anzahl der koloniebildenden Einheiten auf ein Luftvolumen zu beziehen. Werden für die Abscheidung der Sporen Filter verwendet, kann der Nachweis auch indirekt erfolgen. In diesem Fall wird der Filter nicht direkt auf das Medium aufgelegt („abgeklatscht“), sondern zunächst mit einer geeigneten sterilen Lösung gewaschen. Die auf dem Filter befindlichen Sporen werden abgelöst („suspendiert“), diese Suspension wird sorgfältig gemischt, eventuell verdünnt und erst dann auf den Nährboden aufgebracht. Die Möglichkeit einer Verdünnung der Suspension eröffnet die Möglichkeit, auch hohe Luftvolumina als Probe zu nehmen. Direkte Verfahren hingegen erlauben meist nur Proben mit kleinem Volumen bei vergleichsweise kurzer Laufdauer der Pumpe. Beprobungen der Raumluft auf keimfähige Schimmelpilzsporen, welche sich nur eines kleinen Volumens bedienen, weisen meist einen recht hohen statistischen Fehler auf, welcher durch eine Erhöhung der Probenanzahl ausgeglichen werden muss. Insofern kann eine Langzeitmessung mit indirektem Nachweis von Vorteil sein. Dies wird nochmals betont durch den schon oben ausgeführten Umstand, dass sich die Sporenkonzentrationen in der Raumluft von einer Stunde zur nächsten stark unterscheiden können.

Bewertungsgrundlagen

Sie sollten nach der Lektüre der vorangegangenen Kapitel Folgendes nachvollziehen können, dass nämlich bei der Frage der Raumluftbelastung mit Schimmelpilzen nicht nur die Frage nach dem „Wie hoch?“ von Belang ist, sondern eine wichtige Rolle auch die Bestimmung der in der Atemluft vorkommenden Arten spielt. Einige Arten sind in Anbetracht ihres gesundheitlichen Gefährdungspotentials für den Menschen nämlich als „gefährlicher“ einzustufen als andere (s. 4.1). Bei der Angabe der Gesamt-Keimkonzentration in der Atemluft ist zudem von Bedeutung, wie viele unterschiedliche Arten hierin vertreten sind. Wurden pro Kubikmeter Raumluft 200 koloniebildende Einheiten (KBE) einer einzigen Schimmelpilzart nachgewiesen, ist diesem Befund eine ganz andere Bedeutung beizumessen, als wenn sich diese Gesamtkeimzahl aus zehn verschiedenen Schimmelpilzarten zusammensetzt. Aus diesem Grunde fordert u.a. auch der LEITFADEN DES UMWELTBUNDESAMTES aus dem Jahre 2002 bei der Bestimmung der Konzentration der koloniebildenden Einheiten stets eine Artendifferenzierung durchzuführen.

Der Identifizierung der Arten in einer konkreten Belastungssituation kommt hoher Stellenwert zu.

Hintergrundbelastung und Schwellenwerte

Angaben zur **durchschnittlichen, „normalen“ Hintergrundbelastung** können sich auf Innenräume und auf die Außenluft beziehen. In beiden Fällen besteht hier die Herangehensweise darin, einen arithmetischen Mittelwert aus den Ergebnissen vieler (wiederholter) Messungen zu bilden. Die Auswertung der Untersuchungen des Bremer Umweltinstitutes ergab jedoch, dass eine solch vereinfachte Herangehensweise eventuell zu Fehlinterpretationen führen kann (s. 8.2).

Die Messungen, deren Resultate zu einer solchen Durchschnittsbildung herangezogen werden, sollten an Orten durchgeführt worden sein, an denen keine extreme Schimmelpilzbelastung zu vermuten ist. Dies bedeutet für Innenräume, dass nur solche auszuwählen sind, an denen kein sichtbarer Befall vorliegt, die keinen massiven Feuchtigkeitsschaden aufweisen und in denen kein schimmlicher Geruch wahrzunehmen ist. Bezogen auf die Außenluft ist der Probenahmeort so auszuwählen, dass er nicht in unmittelbarer Nähe von Einrichtungen bzw. Orten liegt, welche eine erhöhte Schimmelpilzbelastung erwarten lassen (z.B. Müllsortierungs- wie Kompostierungsanlagen). Gleichzeitig ist bei Außenluftmessungen zu berücksichtigen, dass die Sporenkonzentrationen im hohen Maße von der jeweiligen Witterung (Temperatur, Niederschläge, Windverhältnisse usw.) und natürlich der Jahreszeit abhängig sind (s. 2.4.2). Es existieren zudem Hinweise darauf, dass auch die Schimmelpilzgemeinschaft in Innenräumen gewissen Vegetationsperioden unterliegt. Diese scheinen sich gegenläufig zu denen in freier Natur zu gestalten (also ein Maximum der Sporenkonzentration in den Wintermonaten!). Verursacht wird dies vermutlich dadurch, dass im Winter sehr viel häufiger durch Kondensation befeuchtete Baumaterialien in Innenräumen auftreten als in den Sommermonaten (s. 12.1).

Innenräume stellen keine luftdicht verschlossenen Einheiten dar. Hohe Sporenkonzentrationen in der Außenluft werden stets auch zu einer Erhöhung der Anzahl koloniebildender Einheiten in der Innenraumluft führen. Deswegen muss in jedem Fall neben der Messung der Sporenkonzentration im Inneren, also der Bestimmung der intramuralen luftgetragenen Schimmelpilzbelastung, auch eine außerhalb des betreffenden Gebäudes, welche die extramurale Schimmelpilzbelastung erfasst, erfolgen. Eine isolierte Angabe nur der Werte für den Innenraum ist ohne jegliche Aussagekraft in Hinsicht auf die einzuleitenden Maßnahmen, weiß man doch nicht, ob die Quelle einer nachgewiesenen Sporenkonzentration innerhalb oder außerhalb des Innenraumes zu suchen ist.

Bei der Festlegung von auf Erfahrungswerten basierenden Schwellenwerten werden in der Regel Messungen in Innenräumen durchgeführt, in denen ein massiver Schimmelpilzbefall offensichtlich ist und/oder in denen die Bewohner über Beschwerden klagen, die für Belastungen mit Schimmelpilzen typisch sind. Von diesen Werten wird dann die Differenz zu der jeweiligen Belastungssituation der Außenluft gebildet und diese Differenz schließlich mit den wie oben dargestellt empirisch ermittelten durchschnittlichen Hintergrundbelastungen gebildet. Nicht immer jedoch führt selbst ein erheblicher Schimmelpilzbefall in einem Innenraum auch zu einer Erhöhung der Keimkonzentration in der Innenraumluft (SENKPIEL & OHGKE 1992). Dies kann z.B. darin begründet liegen, dass die Sporen der in den betroffenen Innenräumen auftretenden Schimmelpilzarten schlechtere Flugigenschaften aufweisen als die der „typischen“ Schimmelpilze (Leitarten für letzteren Ver-

breitungstyp mit sehr guten Flugeigenschaften sind z.B. Arten der Gattungen *Aspergillus* und *Penicillium*). Auch hier zeigt sich, dass eine Identifizierung der einzelnen nachgewiesenen Arten sehr sinnvoll ist, auf deren Notwendigkeit schon zu Beginn dieses Unterkapitels hingewiesen wurde. Zudem sind die Unregelmäßigkeiten in der Sporulation der Schimmelpilzkolonien zu berücksichtigen (s.o.).

Im Folgenden sollen kurz die Ergebnisse von Arbeiten vorgestellt werden, welche sich mit der Festlegung von Werten für eine Hintergrundbelastung beschäftigen.

- Nach einer Arbeit von SENKPIEL und OHGKE (1992) lag das arithmetische Mittel einer unbelasteten Außenluft in der Umgebung von Lübeck für das erste und das vierte Quartal (Wintermonate) bei ca. 250 KBE/m³, für das zweite und dritte Quartal (Sommermonate) bei ca. 540 KBE/m³. Die beiden Autoren fanden bei korrespondierenden Messungen in Wohninnenräumen, deren Bewohner über gesundheitliche Beschwerden klagten und welche offensichtlich mit Schimmelpilzen befallen waren, für die Wintermonate eine durchschnittliche Belastung von ca. 3.000 KBE/m³, während diese in den Sommermonaten bei nur ca. 760 KBE/m³ lag. Die niedrigsten in Innenräumen gefundenen Werte lagen stets noch um ca. 100 KBE/m³ höher als die bei der korrespondierenden Beprobung der Außenluft gefundenen. Sie schlussfolgern daraus, dass Schimmelpilzsporenkonzentrationen in der Luft eines Innenraumes (intramural), welche um 100 KBE/m³ über der Konzentration in der Außenluft (extramural) liegen, auf das Vorliegen eines eventuell versteckten Schimmelpilzbefalles hinweisen kann. So definieren sie auch einen Orientierungswert. Hervorzuheben ist in dieser Studie, dass die intramurale Vegetationsperiode der Schimmelpilze sich gegenläufig zu der extramuralen Vegetationsperiode zu verhalten scheint, dass also in den Wintermonaten die durchschnittliche Belastung von Innenräumen mit Schimmelpilzen höher liegt als in den Sommermonaten (s.o.).
- Eine groß angelegte Studie des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg (JOVANOVIC 1997, JOVANOVIC et al. 1998) ergab an vier verschiedenen Standorten des Landes während eines Zeitraumes von November 1997 bis März 1998 eine durchschnittliche Außenluftbelastung von ungefähr 200 KBE/m³. Die korrespondierenden Innenraumluftmessungen wurden in Wohnungen durchgeführt, welche keine Feuchtigkeiterscheinungen und keinen offensichtlichen Schimmelpilzbefall aufwiesen. Das arithmetische Mittel dieser Messungen lag bei ca. 340 KBE/m³.
- Im Bericht der WHO No. 31 aus dem Jahre 1990 wird eine Empfehlung für einen Orientierungswert für **mesophile** Mischpopulationen gegeben. Danach können bis zu 150 KBE/m³ aus Innenraumquellen (Differenz zu Außenluft) akzeptiert werden. Es wird weiterhin ausgeführt, dass auch Sporenkonzentrationen von bis zu 500 KBE/m³ zu akzeptieren seien, wenn es sich hierbei um Schimmelpilze handelt, welche sich in erster Linie in der freien Natur auf Pflanzen ansiedeln.
- Eine Kommission der europäischen Gemeinschaft (INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON MEN, REPORT NO. 12, 1993) stufte Belastungen der Atemluft in

5.1 Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft

Unterkünften und nicht-industriellen Innenräumen mit Schimmelpilzsporen in folgende Kategorien ein:

Kategorie	Wohnungen [KBE/m ³]	Sonstige nicht-industrielle Innenräume [KBE/m ³]
Sehr gering	< 50	< 25
Gering	< 200	< 100
Mittel	< 1.000	< 500
Hoch	< 10.000	< 2.000
Sehr hoch	> 10.000	> 2.000

TAB. 5:

Kategorien der Konzentration koloniebildender Einheiten (KBE) in der Raumluft. Die Werte basieren auf Messungen mit einem Andersen Sechs-Stufen Sammler auf MEA-Medium mit einem Andersen N6 Ein-Stufen Sammler auf MEA und DG18-Medium und beziehen sich auf Mischpopulationen von Schimmelpilzen. Die Kategorien beruhen ausdrücklich nicht auf Abschätzungen des Risikos gesundheitlicher Gefährdungen, sondern rein auf Erfahrungswerten. Die Werte sind als absolut zu betrachten, d.h. es erfolgte keine Differenzbildung mit den jeweiligen Außenluftwerten. (Aus INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON MEN, REPORT NO. 12, 1993)

- Im LEITFADEN (...) des Umweltbundesamtes (2002) wird eine sogenannte „Bewertungshilfe“ dargestellt, die in wesentlichen Punkten auf der Vorlage der Ergebnisse einer Arbeitsgruppe des LGA BADEN-WÜRTTEMBERG aus dem Jahre 2001 beruht. Primäre Fragestellung war hier die Festlegung von Bereichen der Konzentration koloniebildender Einheiten (KBE) in der Innenraumluft bei der Suche nach verstecktem Schimmelpilzbefall. Es wurde eine Einteilung in „**Hintergrundbelastung**“ (Innenraumquelle unwahrscheinlich), „**Übergangsbereich**“ (Innenraumquelle möglich) und „**Innenraumquelle wahrscheinlich**“ vorgenommen. Die Bewertungshilfe legt dabei großen Wert auf eine Identifizierung der gefundenen Arten. Es wird unterschieden zwischen „**typischen**“ Außenluftgattungen (wie *Cladosporium*, ggf. *Alternaria*, ggf. *Botrytis* und Hefen) und „**untypischen**“ Außenluftarten bzw. -gattungen (wie *Acremonium* sp., *Aspergillus versicolor*, *A. penicillioides*, *A. restrictus*, *Chaetomium* sp., *Phialophora* sp., *Scopulariopsis brevicaulis*, *S. fusca*, *Stachybotrys chartarum*, *Tritirachium album*, *Trichoderma* sp. u.a.).

Arten-bzw. Gattungsspektrum	Hintergrundbelastung	Übergangsbereich	Innenraumquelle wahrscheinlich
Eine der typischen Außenluftgattungen	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung geringer ist als das 0,8- bis 1,2-fache der entsprechenden Konzentration in der Außenluft	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung geringer ist als das 1,0- bis 2,0-fache der entsprechenden Konzentration in der Außenluft	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung höher ist als das 2-fache der entsprechenden Konzentration in der Außenluft
Summe der untypischen Außenluftarten bzw. -gattungen	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 150 KBE/m ³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 500 KBE/m ³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft höher ist als 500 KBE/m ³
Eine Art der untypischen Außenluftarten bzw. -gattungen	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 50 KBE/m ³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 100 KBE/m ³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten höher ist als 100 KBE/m ³

TAB. 6: Bewertungshilfe für die Ergebnisse aus Beprobungen der Luft auf die Konzentration der Kolonie-bildenden Einheiten (KBE). Es sollten stets die drei Zeilen der unterschiedlichen Kategorien im bewerteten Arten- bzw. Gattungsspektrum zusammen bewertet werden (soweit möglich).

Der Gesetzgeber hat es bislang vermieden, rechtlich verbindliche Grenzwerte für die maximal zulässige Konzentration koloniebildender Einheiten in der Luft von Wohnungen zu definieren.

Für Arbeitsplätze in biologischen Abfallbehandlungsanlagen („Kompostierungswerke“ u.ä.) existiert eine Schwellenwertangabe von 5.000 KBE/m³, die jedoch lediglich einen Orientierungswert darstellt und sich von der durchschnittlichen (!) Außenluft hintergrundbelastung ableitet. In der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) 5 heißt es nämlich, dass „Atemluft ... in Außenluftqualität zu gewährleisten...“ sei. In der Technischen Regel TRGS 907 („Verzeichnis sensibilisierender Stoffe“) wird schimmelpilzhaltiger Staub als Gefahrstoff eingestuft, der nach gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnis eine atemwegssensibilisierende Wirkung aufweist. Die Technische Regel für biologische Arbeitsstoffe TRBA 405 („Anwendung von Messverfahren für luftgetragene biologische Arbeitsstoffe“) und die TRBA 430 („Verfahren zur Bestimmung der Schimmelpilzkonzentration in der Luft am Arbeitsplatz“) bestimmen die hier anzuwendenden Nachweisverfahren.

Die Europäische Union hat mit der Richtlinie des Rates 90/679/EWG vom 26.11.1990 Mindestvorschriften zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch biologische

Arbeitsstoffe festgelegt. Diese Richtlinie wurde jedoch noch nicht in deutsches Recht umgesetzt.

Für die Luftprobenahme auf keimfähige Schimmelpilzsporen existieren seit April 2003 zwei neue VDI-Richtlinien. Zum einen ist dies die VDI-Richtlinie 4252 (Blatt 2), welche die Probenahmeverfahren näher bestimmt, zum anderen die VDI-Richtlinie 4253 (Blatt 2), welche die Bedingungen, unter denen die Anzucht der Sporen erfolgen sollte, erläutert.

5.2 Nachweis der Gesamtzahl toter und lebender Schimmelpilzzellen in der Raumluft („Total Count“)

Das im vorangegangenen Unterkapitel vorgestellte Verfahren des Nachweises der Konzentration luftgetragener Kolonie-bildender Einheiten kann definitionsbedingt nur solche Zellen von Schimmelpilzen erfassen, die in der Lage sind, auf dem angebotenen Nährboden ein neues Mycel zu bilden. Aber im Zusammenhang mit Innenraumluft korrelierten gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie allergischen Erkrankungen und Mykotoxikosen sind auch tote Zellen und Sporen von Schimmelpilzen von Belang, die über eine Anzucht auf Nährmedien eben nicht mehr nachgewiesen werden können. Zugleich existiert eine große Anzahl von Schimmelpilzen, welche nur schwer oder gar nicht auf Nährmedien im Labor wachsen – doch auch diese können von gesundheitlicher Relevanz für den Menschen sein. Sollen all diese Zellen und Zellfragmente mit einem Nachweisverfahren erfasst werden, muss man sie direkt unter Zuhilfenahme von mikroskopischen Verfahren nachweisen, quantifizieren und, soweit möglich, auch ihrer Art- bzw. Gattungszugehörigkeit nach identifizieren.

Nachweisverfahren

In der Regel gehen hier der Arbeit am Mikroskop folgende Schritte voraus: zunächst wird mittels einer Pumpe eine definierte Menge Luft durch einen Filter mit bekannter Porengröße gezogen. Dieser Filter wird dann mit einem bekannten Volumen einer geeigneten Lösung so gewaschen, dass möglichst alle der auf dem Filter befindlichen Teilchen schließlich in der Lösung vorliegen. Von dieser – gut und gleichmäßig durchmischten – Lösung wird dann ein definiertes Volumen für die anschließenden Analyseschritte entnommen. Bis hierher ähnelt die Verfahrensweise der Bestimmung der Konzentration der koloniebildenden Einheiten in der Raumluft, die im vorangegangenen Kapitel behandelt wurde.

Einen anderen Probenahmenansatz stellt die sogenannte „Schlitzdüsenimpaktion“ dar. Hierbei werden mit einem Partikelsammler luftgetragene Sporen auf einem adhäsiv beschichteten Objektträger fixiert und nach Anfärbung (z.B. Phenolphthalein, Acridin-Orange) mikroskopisch ausgewertet.

Um nun die Konzentration von lebenden und toten Schimmelpilzzellen insgesamt (ohne Berücksichtigung einer Identifizierung der verschiedenen Zellen) zu bestimmen, können moderne mikroskopische Verfahren wie die „Epifluoreszenzmikroskopie“ zum Einsatz kommen. Im mikroskopischen Bild wird dann jede Schimmelpilzzelle, ob lebend oder

tot, vor einem dunklen Hintergrund als Lichtpunkt angezeigt, während sämtliche andere Feinstaub-Partikel, welche in der Raumluft vorlagen, dunkel bleiben. Dies ist von wesentlichem Vorteil im Vergleich zu herkömmlichen lichtmikroskopischen Verfahren, in denen bei der Auswertung für jedes einzelne „Staubkörnchen“ entschieden werden muss, ob es sich überhaupt um eine Schimmelpilzzelle handelt. Grundsätzlich kommen bei dieser Arbeit sogenannte „Zählkammern“ (z.B. ein Holbach-Objektträger) zum Einsatz.

Generell aufwändig gestaltet sich bei den sogenannten „Total Counts“ die Identifizierung einzelner Gattungen oder gar Arten an Hand der einzelnen Sporen. Unter dem Einsatz modernster molekularbiologischer Verfahren wäre zwar eine leichte und korrekte Identifizierung rein theoretisch längst realisierbar, doch diese Verfahren müssten erst bis zur Marktreife entwickelt werden und dies jeweils für jede einzelne Schimmelpilzart. Angesichts der Bedingungen, unter denen Forschung betrieben wird, ist dies ein viel zu hoher Aufwand.

Doch die Zuordnung der unter dem Mikroskop sichtbaren Sporen zu einzelnen Sporen-, „Typen“ (z.B. Typ *Aspergillus/Penicillium*, Typ *Chaetomium* spp., Typ *Stachybotrys chartarum* u.v.m.) ist für den geübten Fachmann eine zwar aufwändige, aber realisierbare Aufgabe. Unglücklicherweise sind gerade die Sporen der Gattungen *Aspergillus* und *Penicillium* einander vom Typ her so ähnlich, dass sie nur als Gesamtheit ausgewertet werden können. Humanpathogene Schimmelpilze wie *Aspergillus fumigatus* werden so der selben Kategorie zugeordnet wie ein vergleichsweise harmloser Schimmelpilz wie *Penicillium chrysogenum*. Bruchstücke des Mycels sind in der Regel gar nicht bestimmten Schimmelpilzen zuzuordnen.

Insgesamt muss dieses Verfahren als sehr zeit- und kostenintensiv eingestuft werden. Ein routinemäßiger Einsatz erweist sich aus diesen Gründen als wenig praktikabel (so wertvoll er unter Umständen auch sein möge).

Bewertungsgrundlagen

Da in der Luft stets neben keimfähigen auch tote oder nicht kultivierbare Schimmelpilzsporen vorliegen, ist die Konzentration „koloniebildender Einheiten“ (KBE) niedriger als die Gesamt-Sporenkonzentration, welche aus dem Ergebnis eines „Total Counts“ hervorgeht. Gleichzeitig ist die sogenannte „Diskriminierung“ (= verfahrensbedingte Benachteiligung) der Sporen einzelner Schimmelpilzarten bei der Anzucht von Schimmelpilzsporen größer als bei deren Auszählung in einer Zählkammer. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die einzelnen Schimmelpilzarten ganz unterschiedliche Ansprüche an die Wachstumsbedingungen (Nährboden, Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert usw.) haben, zum anderen auch in unterschiedlich hoher Toleranz gegenüber dem „Stress“, den eine Luftkeimsammlung für eine einzelne Spore darstellt. Erfolgt jedoch erst ein Wachstum auf den zur Verfügung gestellten Nährböden, so ist die Art-/ Gattungszuordnung in der Regel leichter und meist auch präziser möglich als bei Sporen in einer Zählkammer.

Hintergrundbelastung und Schwellenwerte

Bei der Bestimmung und Bewertung der Gesamtsporenkonzentration gelten jene Maßregeln, die auch für die Ermittlung der Konzentration koloniebildender Einheiten

von Bedeutung sind: das Vorgehen bei der Ermittlung von Hintergrundbelastungen, die Bedeutung der jeweils parallelen Untersuchung der Außenluft, die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen und der jeweiligen intra- und extramuralen Vegetationsperioden

Durch die Berücksichtigung auch von toten Schimmelpilzzellen bei einem „Total Count“ wird die zeitliche Dimension in der Bewertung einer Schimmelpilzbelastung erweitert: auch lange zurückliegende Belastungen können erfasst werden, während bei der Berücksichtigung nur von lebenden Zellen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit vermehrt solche Belastungen nachgewiesen werden, die erst in der jüngeren Vergangenheit durch das Wachstum von Schimmelpilzen in die Raumluft abgegeben wurden.

Die Bestimmung der Gesamtkonzentration an Schimmelpilzzellen in der Raumluft wird in der Praxis weitaus seltener angewandt als die der Konzentration koloniebildender Einheiten. Worin dies begründet liegt, ist gar nicht so leicht zu beantworten. Vermutlich trägt jedoch die vergleichsweise geringe „Trennschärfe“ (s. 5.2.1) eines „Total Counts“ vor allem im Bereich der häufig im Innenraumbereich häufigen Schimmelpilze der Gattungen *Aspergillus* und *Penicillium* entscheidend dazu bei. Gleichzeitig erfordert die Typisierung einzelner Sporen unter dem Mikroskop höhere Sorgfalt und größere Erfahrung, als dies bei der Identifizierung von ganzen Kolonien der Fall ist. Für das Aufspüren versteckter, **aktueller** Schimmelpilzbefälle im Innenraum ist es zudem eher von Nachteil, wenn man auch die bereits abgestorbenen Zellen in seinem Ergebnis notgedrungen berücksichtigen muss. Diese lassen sich unter dem Mikroskop nicht unmittelbar von lebenden Zellen unterscheiden und stammen eventuell von sehr weit zurückliegenden Belastungen (welche womöglich gar von außen stammen),

Vermutlich sind die eben angeführten Argumente die Gründe dafür, dass sich vergleichsweise wenige Arbeiten mit Hintergrundbelastungen und Schwellenwerten der Gesamtzellkonzentration von Schimmelpilzen in der Innenraumluft befassen. Ein Bewertungsschema soll hier dennoch angeführt werden. Es entstammt wiederum dem LEITFADEN DES UMWELTBUNDESAMTES (2002). Erneut wird versucht, durch den Vergleich von Konzentrationen in der Innenraumluft mit denen in der Außenluft eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit einer Quelle von Schimmelpilzbelastungen im Innenraum zu treffen. Es wird darauf hingewiesen, dass vor allem im Falle eines Befundes der zweiten Kategorie („Innenraumquelle nicht auszuschließen“) zusätzlich eine Bestimmung der Konzentration der koloniebildenden Einheiten erfolgen sollte.

SCHIMMELPILZE

Teil C: Nachweisverfahren und Bewertungsgrundlagen

Gesamtpilzsporen	Innenraumquelle unwahrscheinlich	Innenraumquelle nicht auszuschließen	Innenraumquelle wahrscheinlich
Sporentypen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen 1)	Wenn die Konzentration eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft unter dem ein- bis 1,4-fachen der entsprechenden Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft unter dem 1,6-fachen ($\pm 0,4$) der entsprechenden Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft über dem 2-fachen der entsprechenden Konzentration in der Außenluft liegt
Sporen vom Typ <i>Aspergillus/</i> Penicillium	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 300 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 800 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft um mehr als 800 über der Konzentration in der Außenluft liegt
Sporen vom Typ <i>Chaetomium</i> spp.	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft gleich hoch ist wie die in der Außenluft	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 5 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft um mehr als 5 über der Konzentration in der Außenluft liegt
Sporen von <i>Stachybotrys chartarum</i>	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft gleich hoch ist wie die in der Außenluft	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 2 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft um mehr als 2 über der Konzentration in der Außenluft liegt
Unterschiedliche Pilzsporen, welche nicht dem Typ der Basidiosporen oder Ascosporen angehören	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 400 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft nicht um mehr als 800 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft um mehr als 800 über der Konzentration in der Außenluft liegt
Mycelstücke	Wenn die Konzentration der Mycelbruchstücke in der Innenraumluft nicht um mehr als 150 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration der Mycelbruchstücke in der Innenraumluft nicht um mehr als 300 über der Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration der Mycelbruchstücke in der Innenraumluft um mehr als 300 über der Konzentration in der Außenluft liegt

Tab. 7: Bewertungshilfe für die Ergebnisse aus Beprobungen der Luft auf die Konzentration der lebenden und toten Schimmelpilz-Partikel. Es sollten stets die sechs Zeilen der unterschiedlichen Kategorien im bewerteten Arten- bzw. Gattungs-

5 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen in der Raumluft

5.3 Bestimmung der Konz. mikrobieller leicht flüchtiger organischer Verbindungen

spektrum zusammen bewertet werden (soweit möglich). Es wird vor Beginn der Probenahme keine gezielte Staubaufwirbelung durchgeführt

¹⁾ Unter den Sporentypen, welche in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen, finden sich z.B. Sporen vom Typ der Ascosporen sowie der Basidiosporen, vom Typ *Alternaria/Ulocladium* und vom Typ *Cladosporium* spp.

5.3 Bestimmung der Konzentration mikrobieller leicht flüchtiger organischer Verbindungen (mVOCs) in der Raumluft

Schimmelpilze können, je nach Wachstumsphase, eine Vielzahl flüchtiger organischer Verbindungen, sogenannte **VOCs** („Volatile Organic Compounds“) produzieren, welche, um ihren mikrobiologischen Ursprung zu dokumentieren, vereinbarungsgemäß **mVOCs** (microbial VOCs) genannt werden (s. 2.3.1). Ob eine solche in der Innenraumluft vorliegende Substanz dann einer mikrobiellen Belastung oder einer anderen Quelle (natürliche wie Zimmerpflanzen und Lebensmittel sowie technische wie Gebrauchsgegenstände und Baumaterialien) entstammt (ob sie also ein mVOC oder „nur“ ein VOC ist), ist der Substanz selbst nicht unbedingt in jedem Fall anzusehen.

Die zwingende Voraussetzung für die Nutzung einer mVOC-Analyse ist die Definition von solchen Substanzen, welche spezifisch ausschließlich von Schimmelpilzen gebildet werden. Mittlerweile gibt es eine ganze Reihe an Autoren, welche solche Listen von mVOCs, die einen versteckten Schimmelpilzbefall sicher indizieren sollen, veröffentlicht haben (u.a. KELLER 2001, LORENZ 2001). Diese sind in der Regel nicht in der Außenluft nachzuweisen, zumindest wenn keine Müllverwertungsanlage benachbart ist. Doch grundsätzlich gilt, dass von keiner dieser Substanzen grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, ob sie nicht auch von anderen Quellen im Innenraum emittiert werden können.

Ein weiteres Problem liegt darin begründet, dass die Bildung von mVOCs abhängig ist von dem Substrat, auf dem die Schimmelpilze wachsen. Auf Tapete wachsend können andere Substanzen gebildet werden als im Biomüll (LARSEN & FRISVAD 1995, SCHLEIBINGER et al. 2001). Aus diesen Unwägbarkeiten resultiert, dass eine genaue Zuordnung zwischen gefundener Konzentration an mVOCs und dem Ausmaß des Schimmelpilzbefalls noch schwer zu leisten ist. Außerdem bilden selbst unterschiedliche Stämme einer Art nicht selten unterschiedliche mVOCs, während Vertreter unterschiedlicher Gattungen teilweise eine ähnliche Palette an flüchtigen organischen Substanzen produzieren; eine Identifikation der in einem Innenraumbefall involvierten Arten bloß an Hand des gefundenen mVOC-Spektrums ist somit (bisher) nur unter Vorbehalten möglich (PARSANEN et al. 1998, MIERAU 2001).

Die Konzentration der mVOCs in der Raumluft nimmt selbst bei starken Befällen nur Werte an, die mehrere Größenordnungen *unter* den Konzentrationen liegen, welche VOCs, die z.B. aus Baumaterialien ausgasen, in der Raumluft annehmen können. Daraus resultieren sehr viel strengere Anforderungen an Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für die

mVOC-Analytik. Gleichzeitig erlangt die Problematik „saubere“ Blindwerte sowie der Überlagerungseffekte einen sehr viel höheren Stellenwert. Dies resultiert schließlich in einem erhöhten zeitlichen und apparativen Aufwand, den sich ein Dienstleistungsunternehmen dann vom Kunden auch bezahlen lassen muss. Dies alles steht vor dem Hintergrund, dass zumindest zur Zeit die Interpretierbarkeit der Ergebnisse noch mit Fragezeichen versehen ist. Auch sind die gesundheitlichen Risiken, die mit dem Auftreten von mVOCs bei den typischen (sehr niedrigen) Innenraumluftkonzentrationen auftreten können, als eher gering einzuschätzen (s. 2.1.4). Der Nachweis von mVOC allein erlaubt somit keinerlei Aussage darüber, inwiefern die Gesundheit der betroffenen Menschen gefährdet ist, wie dies z.B. bei einem Nachweis von Schimmelpilzsporen (Allergien, Mykosen) oder Mykotoxinen (Mykoxikosen) der Fall ist.

Aus unserer Sicht ist die mVOC-Analytik eine Methode, die im Bereich des Aufspürens solcher versteckter Schimmelpilzbrutherde gute Dienste leisten *kann*, wenn die oben aufgeführten Probleme vollständig abgeklärt sein sollten. Ihre möglichen Vorteile liegen in eine vergleichsweise schnellen Analytik und in der Möglichkeit, auch verdeckte Befälle aufzuspüren, begründet. Sie besitzt jedoch nur sehr eingeschränkte Aussagekraft, wenn man das gesundheitliche Risikopotential eines Schimmelpilzbefalles beurteilen möchte, ist doch bei den in der Regel in solchen Fällen vorzufindenden Konzentrationen der mVOCs nicht davon auszugehen, dass sie ursächlich für gesundheitliche Beschwerden verantwortlich zu machen sind. Auch scheint eine Identifizierung der vor Ort gefundenen Arten an Hand des gefundenen mVOC-Spektrums noch „Zukunftsmusik“ zu sein.

Nachweisverfahren

Es kommen bei der mVOC-Analytik zwei Nachweisverfahren zur Anwendung. Bei beiden wird zunächst mit Hilfe einer geeigneten kalibrierten Pumpe eine definierte Menge Luft durch ein Messröhrchen gezogen, in dem sich Substanzen befinden, welche die in der Luft enthaltenen mVOCs binden. Eine solche Substanz wird als „**Adsorbens**“ bezeichnet. In der Praxis wird zum einen das Verfahren der Thermodesorption sowie der Adsorption an Aktivkohle eingesetzt. Das Verfahren der Thermodesorption wird vom Bremer Umweltinstitut schon seit mehreren Jahren eingesetzt, um Belastungen der Raumluft durch sogenannte VOCs (Flüchtige organische Verbindungen, welche keinen biologischen Ursprung in der Situation vor Ort haben) zu analysieren. Allerdings liegen diese Belastungen, wie oben bereits beschrieben, in der Regel sehr viel höher als jene, welche der Produktion durch Schimmelpilze zuzuschreiben sind.

Eine VDI-Richtlinie (N° 4255) mit dem Ziel, die Messverfahren zur mVOC-Bestimmung zu standardisieren, wird z.Z. erarbeitet.

Bewertungsgrundlagen

Da eine mVOC Belastung bei praktisch allen in der Fachliteratur dargestellten Einzelfällen in Konzentrationsbereichen liegt, die eine durch diese hervorgerufene gesundheitliche Beeinträchtigung als sehr unwahrscheinlich erscheinen lässt, entbehren Bewertungsgrundlagen für mVOC jeglichen Charakter eines klassischen Grenzwertes. Bewertungsgrundla-

gen für mVOC-Belastungen der Raumluft sollten allein an der Frage orientiert sein, ob ein (versteckter) Schimmelpilzbefall in dem untersuchten Innenraum vorliegt. Bisher noch mit Unsicherheiten behaftet, aber von großem praktischen Nutzen wären zudem Kriterien, nach denen auch Ausmaß und Art des Befalls abschätzbar werden würden.

In der Literatur werden zumeist das Bewertungssystem von Lorenz aus dem Jahre 2001 sowie ein alternatives Bewertungssystem nach Keller aus dem selben Jahre für diesen Zweck herangezogen. Entscheidende Bedeutung kommt bei jedem Bewertungssystem der Klärung der Frage bei, welche Substanzen als wirklich spezifisch für ein Schimmelpilzwachstum zu gelten haben.

Auch wenn dem Verfahren der mVOC-Analytik im Zusammenhang mit Schimmelpilzbefall in (privaten) Innenräumen in der Zukunft eventuell eine hohe Bedeutung eingeräumt werden kann, verzichtet das Bremer Umweltinstitut z.Z. noch auf diese Methode (auf die Gründe hierfür wird u.a. in Kapitel 8.3 näher eingegangen). So möchten wir an dieser Stelle auch darauf verzichten, die angesprochenen Bewertungsschemata detailliert vorzustellen.

6 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen im Hausstaub

Alle festen Partikel, welche aufgewirbelt in der Raumluft schweben, sinken bei ruhiger Luft ab. Je größer das einzelne Partikel, desto schneller geht dies vonstatten. Zu den Partikeln, welche auf Schimmelpilzbelastungen zurückzuführen sind, zählen in erster Linie die Sporen, aber auch größere Partikel, wie z.B. Abschürfungen größerer Teile von Schimmelpilzfruchtkörpern, welche zunächst in die Raumluft geraten und dann zu Boden sinken. Hier vermengen sie sich mit allen anderen unterschiedlichen Partikeln, die aus der Luft absedimentiert sind, und bilden in ihrer Gesamtheit den sogenannten „Hausstaub“

Natürlich besteht der „gewöhnliche“ Hausstaub selbst in stark mit Schimmelpilzen belasteten Wohnungen zum größten Teil aus Partikeln, welche nicht von Schimmelpilzen gebildet wurden. Diese können biologischen (Hautschuppen von Mensch und Tier, Kot von Hausstaubmilben, zerkleinerte Bestandteile von Zimmerpflanzen und Lebensmitteln, Abrieb von natürlichen Baumaterialien u.a.) oder künstlichen (Faserbruchstücke von Teppichen und Kleidung, Abrieb und Bruchstücke von natürlichen Baumaterialien u.a.) Ursprungs sein. Was wir als „Hausstaub“ bezeichnen, ist also ein Gemisch aus Partikeln unterschiedlichen Ursprungs mit extrem unterschiedlichen Eigenschaften. Gleichzeitig weist Hausstaub als eine Ansammlung einer großen Menge von Feinpartikeln eine auf die Masse bezogene hohe innere Oberfläche auf. An diese hohe Oberfläche können sich wiederum verschiedene andere, gasförmige und flüssige Substanzen über die Zeit leicht anlagern. Der Hausstaub ist so einem Magneten vergleichbar, der alle möglichen unterschiedlichen Substanzen, die im Innenraum vorkommen, anreichert, von Wasserdampf bis hin zu Innenraumschadstoffen wie Pestiziden, PAK oder PCB, aber auch Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen wie z.B. die Mykotoxine. Man spricht in diesem Zusammenhang auch

vom Hausstaub als einer (Schadstoff-) „Senke“, in dem selbst lange zurückliegende Belastungen der Raumluft mit unterschiedlichsten Substanzen noch wiedergefunden werden können.

Untersuchungen des Hausstaubes können auch lange zurückliegende Belastungen zu Tage fördern.

Selbst bei gewissenhaftem Staubsaugen kann eine Wohnung niemals vollkommen „staubfrei“ gemacht werden. Neben den Staubpartikeln, die nach dem letzten Reinigen der Wohnung neu gebildet wurden, besteht der Hausstaub also stets auch aus Teilchen, welche bei den letzten Reinigungen nicht entfernt werden konnten. Die Bewegungen der Bewohner des Innenraums sowie allgemeine Luftbewegungen führen zu einem häufigen Wieder-Aufwirbeln des Hausstaubes; so mischt sich kontinuierlich alter mit neuem Staub.

Auf dem Boden spielende Kleinkinder können besonders stark von einer Belastung des Hausstaubes durch Schimmelpilze betroffen sein. Haushalte, in denen Kleinkinder leben, sollten demnach in Bezug auf Belastungen im Hausstaub anders bewertet werden, als wenn dies nicht der Fall ist.

6.1 Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub

Die gesundheitlichen Risiken, die von Schimmelpilzsporen im Hausstaub ausgehen, sind mit denen vergleichbar, welche mit Schimmelpilzbelastungen in der Atemluft in Verbindung gebracht werden. Sedimentierte Schimmelpilzsporen werden in erster Linie dann bedenklich, wenn sie wieder aufgewirbelt werden. In beiden Fällen ist der Hauptwirkungs-ort der gesundheitlichen Beeinträchtigung das Atemsystem. In diesem Zusammenhang wird klar, dass die Trennung zwischen Belastungen der Atemluft und Belastungen des Staubes durch Schimmelpilzsporen bei den meisten Fällen vor Ort eine willkürliche ist – die Belastung der Atemluft durch Schimmelpilzsporen setzt sich zusammen aus solchen, die kürzlich erst durch Sporulation in die Raumluft abgegeben wurden, und solchen, die aus der „Senke“ des Hausstaubes durch Luftbewegungen erneut in die Atemluft aufgewirbelt wurden und eventuell schon vor sehr viel längerer Zeit gebildet wurden. Letztlich werden bei vollkommener Ruhe alle Bioaerosole zu Boden sinken.

Nachweisverfahren

Grundsätzlich basieren alle entsprechenden Probenahmeverfahren darauf, dass der Staub vor Ort durch Ansaugen aufgesammelt wird, um dann in einer geeigneten Lösung suspendiert und als eine solche Mischung schließlich auf einen geeigneten Nährboden ausgebracht wird. Teilweise wird der Staub aber auch ohne den Zwischenschritt der Suspension auf die Nährböden aufgetragen. Die Anzucht der dort auskeimenden Schimmelpilze, die Bestimmung der Anzahl koloniebildender Einheiten (KBE) sowie deren Artbestimmung erfolgt dann im weiteren Verlauf wie für den Nachweis von fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzsporen in der Raumluft beschrieben (INDOOR AIR QUALITY AND ITS IMPACTS ON MEN,

6 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen im Hausstaub

6.1 Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub

REPORT N° 12, 1993).

Für die Gewinnung einer Hausstaubprobe existieren zwei unterschiedliche Ansätze. Zunächst besteht die Möglichkeit, den Staub – wie Sie es aus der eigenen Hausarbeit kennen – einfach im Staubsaugerbeutel aufzufangen. Das Verfahren erfordert nur einen geringen materiellen Aufwand, weist aber auch zwei entscheidende Nachteile auf: zunächst ist das „Innenleben“ eines Staubsaugers nur schwer zu reinigen. Damit besteht die Gefahr einer Kontamination einer Probe mit Verunreinigungen, die aus einer vorangegangenen Probenahme stammen. Zudem sind die heutzutage meist zweischichtigen Staubsaugerbeutel fast nie vollkommen dicht und weisen für feinste Stäube oft ein schwaches Rückhaltevermögen auf, während größere Partikel meist gut zurückgehalten werden. Damit werden bei einer solchen Probenahme gröbere Partikel gegenüber den feineren übergewichtet, da die Zusammensetzung des Staubes im Staubsaugerbeutel nicht die selbe ist wie die des Staubes vor Ort.

Eine andere Möglichkeit der Probenahme besteht darin, einen speziellen Sammelkopf vor das Rohr des Staubsaugers (oder einer leistungsstarken Pumpe) zu montieren. Ein in diesem Sammelkopf befindlicher Filter scheidet den in der angesaugten Luft befindlichen Staub ab. Von diesem Filter kann dann der Staub wieder abgewaschen werden. Der Vorteil eines solchen Sammelkopfes besteht darin, dass er einfach und zuverlässig gereinigt werden kann; dies verringert die Gefahr von Kontaminationen. Zudem weist ein solcher Sammelkopf genau definierbare Größen für die Strömungsverhältnisse wie auch die Abscheideleistung auf, so dass dieses Verfahren eher zu einer Standardisierung geeignet ist. Von Nachteil ist zunächst der erhöhte apparative Aufwand. Zudem kann ein solcher Filter aber auch schnell überladen werden, wenn zuviel Staub angesaugt wird.

Weiterhin unterscheiden sich die Probenahmeverfahren darin, ob der in der Probenahme gewonnene Staub vor der Suspension gesiebt wird oder nicht. Dies spielt vor allem bei Proben eine Rolle, die aus einem Staubsaugerbeutel entnommen werden. Schimmelpilzsporen stellen innerhalb des heterogenen Gemisches des Hausstaubes mit die kleinsten Partikel dar. Bei einem Sieben des Staubes werden größere Partikel (z.B. Fasern und Haare) zurückgehalten und verworfen, dies führt zu einer höheren Konzentration von koloniebildenden Einheiten in der Probe, als dies ohne Sieben der Fall gewesen wäre (BAUDISCH et al. 2001).

Bei Durchsicht der einschlägigen Literatur wird klar, dass ein Konsens über die Vorgehensweise bei der eigentlichen Probenahme vor Ort noch nicht gefunden ist. So ist z.B. strittig, welche Flächen in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit (Teppichboden, Auslegeware, Fliesen, Parkett, Laminat usw.) überhaupt beprobt werden sollen. Vor allem für Teppichböden ist auch die Frage nach der Saugleistung bzw. nach der Intensität (Probenahmedauer, die für eine bestimmte Fläche aufgewandt wird) von Interesse, da bei intensivem Saugen an einer Stelle sehr viel mehr Staub gewonnen werden kann als bei oberflächlicherem Vorgehen. Auf der anderen Seite wird sich z.B. auf einem Fliesenboden, zumal wenn er von Zeit zu Zeit feucht gereinigt wird, weniger (Alt-)Staub finden lassen als auf einem Teppichboden.

Teppichböden sind mitunter selbst von einem Schimmelpilzbefall betroffen. Ist dies der Fall, so muss dies unbedingt in der Bewertung der Proben berücksichtigt werden, da

die Probe dann nicht nur aus der Raumluft auf den Teppich abgesunkene Sporen, sondern überwiegend Sporen enthält, die im Teppich selbst gebildet wurden. Wichtig für die Bewertbarkeit der gewonnenen Proben ist auch die Zeitspanne vor der Probenahme, in der keine routinemäßige Reinigung der Bodenbeläge (Staubsaugen, Fegen, Wischen) durch die Bewohner mehr durchgeführt wurde.

Bewertungsgrundlagen

Die Bedingungen der Probenahme sowie das eigentliche Probenahmeverfahren sind, wie im letzten Abschnitt des vorangegangenen Unterkapitels dargestellt, in den existierenden Fallstudien und Reihenuntersuchungen bisher nur bedingt zu vereinheitlichen. Darunter leidet ihre Aussagekraft in Hinsicht auf die Ermittlung von durchschnittlichen Hintergrundbelastungen im Hausstaub. Von Interesse in Hinsicht auf die Bewertbarkeit von Schimmelpilzbelastungen in Hausstaub sind zudem Angaben über die relative Häufigkeit, mit der bestimmte Schimmelpilzgattungen gefunden werden bzw. die Abhängigkeit von durchschnittlichen Hintergrundbelastungen von den Jahreszeiten.

Eine Arbeit von KOCH et al. aus dem Jahre 1999 untersuchte insgesamt 767 Staubproben aus Haushalten in Erfurt und Hamburg. Die Probenahme erfolgte mit einem speziellen Filterhalter auf einem Papierfilter, ca. 1 m² wurde beprobt und die Dauer der Probenahme betrug ca. 2 min. Ort der Probenahme war der Teppichboden im Wohnzimmer. Die Proben wurden gesiebt, in geeigneten Lösungen aufgenommen und dann auf die Nährböden ausgebracht. Sie kommt u.a. zu dem Ergebnis, dass *Penicillium* sp. am häufigsten in den untersuchten Wohnungen auftritt (82% aller untersuchten Fälle), gefolgt von *Cladosporium* sp. (65%), *Aspergillus* sp. (56%) und *Alternaria* sp. (40%). Die Gattungen *Penicillium* und *Aspergillus* seien sehr viel weniger von jahreszeitlichen Schwankungen betroffen als die Gattungen *Cladosporium* und *Alternaria*. Schließlich schlagen sie einen Schwellen-Grenzwert vor, bei dessen Überschreitung auf einen Schimmelpilzbefall im Innenraum rückzuschließen sei. Dieser sogenannte „95-Perzentil“-Wert liegt in den Wintermonaten von November bis Mai für die Gesamtkonzentration an Schimmelpilzen bei **350.000 KBE/g** (*Penicillium* sp. 95.000, *Aspergillus* sp. 50.000, *Cladosporium* sp. 30.000, *Alternaria* sp. 10.000), für das gesamte Jahr bei **500.000 KBE/g** (*Penicillium* sp. 95.000, *Aspergillus* sp. 50.000, *Cladosporium* sp. 60.000, *Alternaria* sp. 20.000).

Eine Kommission der Europäischen Gemeinschaft (INDOOR AIR QUALITY AND ITS IMPACTS ON MEN, REPORT N° 12, 1993) stellte hingegen folgende, sehr viel niedrigere Kategorien für eine Schimmelpilzbelastung des Hausstaubes auf:

6 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen im Hausstaub
6.1 Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub

Kategorie	Methode			
	Direkt		Als Suspension	
	V8[KBE/g]	DG18[KBE/g]	V8[KBE/g]	DG18[KBE/g]
Sehr gering	< 1.000	< 2.000	< 10.000	< 10.000
Gering	< 2.500	< 6.000	< 20.000	< 20.000
Mittel	< 5.000	< 9.000	< 40.000	< 50.000
Hoch	< 10.000	< 15.000	< 100.000	< 120.000
Sehr hoch	> 10.000	> 15.000	> 100.000	> 120.000

TAB. 8: Kategorien der Konzentration koloniebildender Einheiten (KBE) im Hausstaub (nach INDOOR AIR QUALITY AND ITS IMPACTS ON MEN, REPORT N° 12, 1993). Die Werte basieren auf Anzucht der Proben aus nicht-industriellen Innenräumen auf zwei verschiedenen Nährböden (V8 und DG18), auf welche sie direkt oder nach Herstellung einer Suspension aus Probe und geeigneter Lösung (Pepton-Lösung) aufgetragen wurden. Die Kategorien beruhen ausdrücklich nicht auf Abschätzungen des Risikos gesundheitlicher Gefährdungen, sondern rein auf Erfahrungswerten.

In dem bereits mehrfach in den vorangegangenen Kapiteln zitierten Bericht des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg aus dem Jahre 2001 (LGA 2001) werden wiederum andere Bewertungsmaßstäbe, zum einen für gesiebte, zum anderen für ungesiebte Staubproben, vorgeschlagen. Wiederum werden hier Kategorien gebildet, die eine Unterscheidung über die Wahrscheinlichkeit einer im Innenraum liegenden Quelle von Schimmelpilzbelastungen treffen.

Pilzgattungen bzw. -arten	Hintergrundbelastung (Innenraumquelle unwahrscheinlich) [KBE/m ²]	Innenraumquelle nicht auszuschließen [KBE/m ²]	Innenraumquelle wahrscheinlich [KBE/m ²]
Indikator-Schimmelpilze 1) für Feuchtigkeitsschäden mit hohem Sporenflug 2)	< 3.000	> 3.000 < 20.000	> 20.000
Indikator-Schimmelpilze 1) für Feuchtigkeitsschäden mit geringem Sporenflug 3)	< 1.000	> 1.000 < 3.000	> 3.000
Gesamt KBE ohne:Aureobasidium spp., Cladosporium spp., Penicillium spp., Hefen und sterile Kolonien	< 20.000	> 20.000 < 60.000	> 60.000
Gesamt KBE Winter	< 50.000	> 50.000 < 120.000	> 120.000
Gesamt KBE Sommer	< 250.000	> 250.000 < 600.000	> 600.000

TAB. 9: Bewertungskategorien für die Ergebnisse aus Beprobungen von **ungesiebttem** Hausstaub auf die Anzahl der koloniebildenden Einheiten (KBE), bezogen auf eine beprobte Fläche von 1 m². Die angegebenen Werte entbehren bis zu diesem Zeitpunkt einer statistischen Absicherung. (Aus LGA 2001)

- ¹⁾ Hierbei handelt es sich um Schimmelpilze, die erfahrungsgemäß bei Feuchtigkeitsschäden im Innenraum auftreten und deren überrepräsentiertes Vorkommen so auf einen solchen Feuchtigkeitsschaden hinweisen kann. Hierbei handelt es sich um die Arten bzw. Gattungen *Acremonium* spp., *Aspergillus penicilloides*, *A. restrictus*, *A. versicolor*, *Chaetomium* spp., *Phialophora* spp., *Scopulariopsis brevicaulis*, *Sc. fusca*, *Stachybotrys chartarum*, *Tritirachium album* und *Trichoderma* spp. (Indikatorschimmelpilze siehe auch **14.2**).
- ²⁾ „Hoher Sporenflug“ bezieht sich auf die Flugeigenschaften der von dieser Art/Gattung gebildeten Sporen. In diesem Falle sind diese als gut ausgebildet anzusehen, die Sporen sind vergleichsweise leicht, klein, liegen meist vereinzelt vor und sind nicht in einer Schleimmatrix eingebettet. Von den Schimmelpilzen mit Feuchteindikator-Funktion (s.o.) sind dies in erster Linie *Aspergillus* spp. und *Tritirachium album*.
- ³⁾ „Geringer Sporenflug“ bezieht sich auf die Flugeigenschaften der von dieser Art/Gattung gebildeten Sporen. In diesem Fall sind diese schlecht ausgebildet, die Sporen sind vergleichsweise groß, schwer, liegen häufig in Aggregaten vor und sind z.T. in eine Schleimmatrix eingebettet. Von den Schimmelpilzen mit Feuchteindikator-Funktion (s.o.) sind dies in erster Linie *Acremonium* spp., *Chaetomium* spp., *Phialophora* spp. und *Stachybotrys chartarum*.

6.2 Nachweis von Mykotoxinen im Hausstaub

Wie zu Beginn ausgeführt, stellt der Hausstaub eine „Senke“ dar für viele nichtflüchtige, chemisch unter den gegebenen Umweltbedingungen ausreichend stabile Verbindungen, die im Innenraum auftreten. Erfüllen Mykotoxine diese beiden Bedingungen, so sollte es theoretisch möglich sein, diese im Hausstaub nachzuweisen und auch zu quantifizieren.

Anders als der Nachweis von koloniebildenden Einheiten in der Luft oder im Hausstaub ist der Nachweis von Mykotoxinen ein Verfahren des **direkten** Nachweises einer bestehenden Gefährdung der Gesundheit der jeweiligen Bewohner. Nach der Bestimmung der Lebend- oder der Gesamtkeimzahl kann nur eine Aussage darüber getroffen werden, wie hoch die Schimmelpilzsporenkonzentration pro Kubikmeter Raumluft oder im Falle einer Untersuchung des Hausstaubes pro Gramm dieses Hausstaubes oder pro Quadratmeter des beprobten Bodenbelages ist. Dies erlaubt aber nur ungefähre bzw. **indirekte** Abschätzungen über das Risikopotential der gefundenen Belastungssituation (Ausnahme hiervon bildet allerdings die Abschätzung des Risikos allergischer Erkrankungen). Könnte hingegen die Mykotoxin-Konzentration im Hausstaub bestimmt werden, wären direkte Risikoabschätzungen über Dosis-Wirkung-Korrelationen (soweit für den Menschen überhaupt bekannt, s. **Teil C**) unter Einbeziehung der matrixbedingten Inhomogenität möglich.

Der Konjunktiv im vorangegangenen Satz ist mit Bedacht gewählt. Denn der direkte Mykotoxin-Nachweis im Hausstaub oder anderen Materialien ist bisher nur in einem engen

Rahmen möglich. Bedingt wird dies durch folgende Faktoren:

- Z.Z. sind ungefähr 200 verschiedene Mykotoxine bekannt. Standardisierte und in wissenschaftlichen Untersuchungen eingesetzte Nachweisverfahren existieren hingegen nur für einen Bruchteil von ihnen. In erster Linie sind dies die potenten Mykotoxine wie z.B. das Aflatoxin und das Ochratoxin (s.u.).
- Die verschiedensten, häufig unbekanntem Beimengungen, die der Hausstaub enthält (dies gilt z.T. auch für andere (Bau-)Materialien), können das empfindliche Nachweisverfahren eines Mykotoxins auf dem Analyseweg stören und das Ergebnis verfälschen. Zusammen mit dem vorangegangenen Punkt machen diese Faktoren einen Nachweis von Mykotoxinen im Staub zu einer zeit- und materialaufwändigen Unternehmung – kurz gesagt: es wird teuer.
- Vorstufen der bekannten Mykotoxine sind häufig noch nicht bekannt und können so auch nicht nachgewiesen werden. Gleiches gilt für Abbauprodukte der Mykotoxine. Dieser Abbau kann entweder außerhalb der Schimmelpilzzellen oder innerhalb der (noch lebenden) Schimmelpilzzellen erfolgen.
- Wenn Sporen im Hausstaub enthalten sind (wovon bei einem Schimmelpilzbefall im Innenraum in der Regel auszugehen ist), muss die Frage abgeklärt werden, ob, und wenn ja, wie die meist sehr stabilen Zellwände der häufig Mykotoxin-haltigen Sporen vor der Untersuchung aufgebrochen werden sollen. Wird ein solcher Aufschluss nicht durchgeführt, so können Frachten an in den Sporen enthaltenen Mykotoxinen durch den Nachweis nicht erfasst werden, obschon sie, wenn sie dorthin gelangen, auf den Epithelien der Atmungsorgane (und erst recht in den Verdauungsorganen) freigesetzt werden könnten.

Häufig werden im Zusammenhang der Mykotoxinanalytik neben dem Nachweis über gaschromatographische Verfahren (mit vorangegangener Aufreinigung z.B. über Immunaффinitätssäulen) auch immunchemische Verfahren eingesetzt. Kommerziell erhältlich sind bisher Tests zum Nachweis von Aflatoxinen, Ochratoxin A, Citrinin sowie verschiedener Fusarientoxine (T2-Toxin, Deoxynivalenol, Zearalenon, Fumonisine) (DIETRICH & MÄRTLBAUER, 2001). Es kann statt des spezifischen Nachweises auf ein oder mehrere Mykotoxine auch ein allgemeines „Screening“ des betreffenden Materials mittels eines Zytotoxizitätstests durchgeführt werden (GAREIS et al., 2001). Die Schwierigkeiten im Umgang mit der Mykotoxinanalytik scheinen jedoch nach wie vor erheblich (NIELSEN, 2001).

6.3 Nachweis von Schimmelpilz-Allergenen im Hausstaub

Eine allergische Erkrankung wird nicht durch „einen Schimmelpilz“, sondern durch einzelne, baugleiche Bestandteile eines Schimmelpilzes, durch die sogenannten Allergene, ausgelöst. Zu Beginn dieses Kapitels wollen wir, um häufig in diesem Kontext entstehende Begriffsverwirrungen zu vermeiden, zunächst versuchen zu definieren, was unter dem

Nachweis von Schimmelpilz-Allergenen verstanden werden kann.

Nachweis einer Allergie (bzw. der Antikörper)

Hierbei wird versucht, eine bestehende Sensibilisierung eines Patienten gegenüber verschiedenen Schimmelpilz-Allergenen nachzuweisen. Dabei wird nicht das Allergen (also der Schimmelpilzbestandteil) im Hausstaub, sondern die existierenden Antikörper gegen dieses Allergen im Blut bzw. Serum des Patienten nachgewiesen. Eben dies kann durch sogenannte „Provokationstests“ oder durch molekularbiologische Nachweisverfahren „in vivo“ oder „in vitro“ erfolgen. Wird durch diese Verfahren das Vorhandensein entsprechender spezifischer Antikörper gegen ein Schimmelpilzallergen belegt (also eine bestehende Sensibilisierung nachgewiesen), so sagt dies zum einen aus, dass der Patient in Bezug auf diesen Schimmelpilz als Allergiker zu einer „Risikogruppe“ zählt und so selbst schwache Belastungen mit Schimmelpilzen für ihn zu einer gesundheitlichen Gefährdung führen können, zum anderen lässt sich daraus ablesen, dass der Patient in der Vergangenheit mit recht hoher Wahrscheinlichkeit einmal mit hohen Schimmelpilzbelastungen konfrontiert wurde. Auf die Schwierigkeiten in der Unterscheidung zwischen genetisch disponierter und erworbener Allergie wurde bereits eingegangen. Wann und wo letzteres allerdings erfolgte, lässt sich auf diesem Wege nicht nachweisen. Zudem ist nicht sicher, ob ein bestimmtes Allergen bei einem für einen Allergietest ausgewählten Stamm eventuell gar nicht vorkommt, während andere Stämme derselben Art dieses Allergen bilden.

Nachweis der Antigene

Im Zusammenhang des Erfassens einer Belastungssituation mit Schimmelpilzen in Hinblick auf die Gefahr allergischer Erkrankungen kann neben dem Nachweis der Sensibilisierung (also Nachweis von Antikörpern im Organismus des Patienten) auch versucht werden, die Belastung des häuslichen Lebensumfeldes eines Patienten mit einzelnen Schimmelpilz-Allergenen zu bestimmen. Und hier bietet sich – zumindest theoretisch – eine Untersuchung des Hausstaubes in der betreffenden Wohnung an, können so doch selbst vor geraumer Zeit gebildete Schimmelpilz-Allergene, die in der Regel im Laufe der Zeit kaum in ihrer Potenz abnehmen, da selbst tote Zellen und Zellfragmente noch als Allergen wirken können, noch nachgewiesen werden. Dies ist der kritische Punkt: ein positiver Nachweis von keimfähigen Schimmelpilzen im Hausstaub bedeutet zwangsläufig, dass auch Allergene dieses Schimmelpilzes vorliegen. Ein negativer Nachweis von keimfähigen Schimmelpilzen bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass der entsprechende Innenraum frei ist von den betreffenden Schimmelpilz-Allergenen, da ja nur lebende Zellen und keine toten Zellen oder Zellfragmente erfasst wurden. Diese Aussage kann nur getroffen werden, wenn ein direkter Nachweis gegenüber den Allergenen selbst erfolgte. Dieser direkte Nachweis von Schimmelpilz-Allergenen im Hausstaub ist theoretisch möglich, wird aber durch eine Reihe von Faktoren erschwert, die denen im vorangegangenen Kapitel recht ähnlich sind:

- Jeder Schimmelpilz kann im Prinzip eine Vielzahl unterschiedlicher Allergene bilden. Niemand kann mit Gewissheit sagen, dass auch nur von einer Art alle möglichen Allergene bekannt wären. Die Anzahl der unterschiedlichen Aller-

gene sämtlicher Schimmelpilze dürfte sehr hoch sein. Um auszuschließen, dass eine bestimmte Schimmelpilzart für einen Allergiker keine Gefährdung darstellt, müssten zum einen sämtliche potente Allergene dieses Schimmelpilzes bekannt sein, zum anderen müsste der Patient auch auf alle dieser Allergene getestet werden.

- Das heterogene Gemisch des Hausstaubes mit seiner Vielzahl an organischen Beimengungen kann den Nachweis von bestimmten Allergenen erschweren und verfälschen. Staubproben müssen vor der Analyse häufig mit hohem Aufwand gereinigt und aufbereitet werden.
- Die schon oben angesprochene häufig uneinheitliche Qualität von Standard-Allergenextrakten führt auch beim Nachweis der Allergene zu Schwierigkeiten. Hier werden molekularbiologische Methoden der Herstellung sogenannter „rekombinanter Proteine“ (Allergene) in Zukunft vermutlich bessere Möglichkeiten bereitstellen. Auch beim eigentlichen Nachweis der Schimmelpilz-Allergene werden hoch sensitive und spezifische molekularbiologische Techniken wie Gensonden und die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) in Zukunft wahrscheinlich den Direkt-nachweis selbst kleinster Allergenmengen im Untersuchungsmaterial möglich machen (M.SCHATA & SCHUMACHER 1995, BECKER & FEGELER 1996).

Im Idealfall sollte bei einem Patienten mit einer Allergiesymptomatik zunächst versucht werden, eine etwaige Sensibilisierung gegenüber bekannten Schimmelpilz-Allergenen nachzuweisen. Wird nun beispielsweise bei einem Patienten nachgewiesen, dass er gegen eines oder mehrere Allergene von *Alternaria alternata*, dem in Hinsicht auf allergische Erkrankung wahrscheinlich potentesten Schimmelpilz, allergisch reagiert, dass also bei ihm eine Sensibilisierung mit entsprechender Antikörperbildung bereits stattgefunden hat, so hat dies Auswirkungen auf die Bewertung der Ergebnisse aus den Schimmelpilznachweisverfahren, die in seiner Wohnung durchgeführt werden. Auch geringe Konzentrationen des Allergens können bei einem vorbelasteten Allergiker zu neuen Schüben führen. Aus diesem Grund sollten selbst geringe Schimmelpilzbelastungen im Innenraum beseitigt werden.

7 Nachweis von Schimmelpilzbelastungen in und auf sonstigen Materialien

Materialproben unterschiedlicher Baumaterialien (z.B. Tapete, Putz, Holz, Dämmstoffe usw.) werden untersucht, wenn sichtbarer Schimmelpilzbefall vorhanden ist bzw. ein gezielter und fundierter Verdacht für eine Belastung vorliegt. Wichtig ist auch bei der Untersuchung von Materialproben die Berücksichtigung der Allgegenwärtigkeit von Schimmelpilzen im Lebensumfeld des Menschen. Diese Hintergrundbelastung sollte durch Vergleichsuntersuchungen des selben Materials an einer nicht befallenen Stelle belegt werden.

Liegt sichtbarer Schimmelpilzbefall vor, kann die Bestimmung erfolgen durch:

- Eine direkte Kultivierung einer Abklatschprobe (Nachweis der koloniebildenden Einheiten, KBE).
- Eine indirekte Kultivierung einer suspendierten Materialprobe.
- Eine direkte mikroskopische Betrachtung eines Klebefilm-Abriss-Präparates.
- Eine direkte mikroskopische Betrachtung einer Materialprobe.

Bei den meisten Ergebnissen der Untersuchung von Materialproben handelt es sich um halbquantitative Aussagen. Das Schwergewicht liegt hier in der Differenzierung. Insofern ist die Frage nach Grenzwerten in Bezug auf Materialproben auch nur bedingt zu beantworten.

Untersuchungen von Materialproben sollten in erster Linie der Artenidentifizierung dienen, da sie in der Regel nur halbquantitativ sind bzw. ein Bezug auf eine Massen-, Flächen- oder Volumenangabe nur wenig aufschlussreich ist.

In erster Linie ist durch Materialproben abzuklären, ob bedenkliche Schimmelpilze (z.B. auch in Hinsicht auf eventuell ausgeprägte Sensibilisierungen der Bewohner der betroffenen Wohnung) vorliegen und wie massiv der vorliegende Schaden ungefähr ist.

7.1 Direkte Kultivierung einer Abklatschprobe

Eine Abklatschprobe wird gewonnen, in dem eine Schale mit Nährboden kurz gegen eine Stelle gedrückt wird, an der Schimmel sichtbar ist oder vermutet wird. Danach wird die entsprechende Platte für bis zu 10 Tagen bei $25 \pm 3 \text{ °C}$ bebrütet. Die Differenzierung und die Bestimmung der Anzahl der gebildeten Kolonien erfolgt dann unter dem Lichtmikroskop.

Eine Abklatschprobe führt bei Schimmelpilzen häufig zu einer verzerrten Wiedergabe des tatsächlich vor Ort herrschenden Zustandes. Dies ist zum einen dadurch zu begründen, dass die Sporen der Fruchtkörper von unterschiedlichen Schimmelpilzarten, welche mit dem Nährboden in Kontakt gebracht werden, unterschiedlich „reif“ sein können oder dass von einigen Schimmelpilzen an der betreffenden Stelle eben noch gar keine Fruchtkörper (geschweige denn Sporen) gebildet wurden. Zum anderen wirkt sich bei diesem Probenahmeverfahren das Vorhandensein von mit Schimmelpilzsporen versetztem Anflugstaub besonders stark aus.

Die Diskussion über Grenzwerte erübrigt sich bei diesem halbquantitativen Verfahren. Allenfalls kann der Fachmann vor Ort auf seine eigenen Erfahrungswerte zurückgreifen, die immer auch mit der jeweils herrschenden Situation abgeglichen werden müssen.

7.2 Indirekte Kultivierung einer suspendierten Materialprobe

Material, auf dem Schimmel sichtbar ist oder vermutet wird, wird in geeigneter Weise mit sterilen Werkzeugen entnommen. Im Labor wird die Materialprobe dann dokumentiert.

Anschließend wird die Probe zerkleinert und mit einer geeigneten Lösung vermischt. Diese Lösung sollte „abgepuffert“ werden, d.h. sie sollte so beschaffen sein, dass sie in ihrem pH-Wert stabil bleibt, auch wenn die Probe einen stark abweichenden pH-Wert aufweist. Es ist bei (mineralischen) Baumaterialien nämlich nicht unüblich, dass, wenn sie in wässrige Lösung gelangen, ein ausgesprochen saurer oder auch alkalischer pH-Wert resultiert, der zu einer Verfälschung der Ergebnisse der Kultivierung führen könnte. Die angesetzte Mischung sollte für mindestens dreißig Minuten geschüttelt oder gerührt werden. Von dieser Suspension werden dann definierte Volumina auf geeigneten Nährböden ausgestrichen, diese dann unter den üblichen Bedingungen (s. 5.1.1) bebrütet. Auch hier erfolgen Differenzierung und Auszählen der einzelnen Kolonien unter dem Lichtmikroskop.

Der Vorteil dieses indirekten Nachweisverfahrens ist, dass eine Pilzkonzentration pro Flächeneinheit oder Gramm ermittelt werden kann. Damit werden Vergleiche zu anderen Materialproben möglich. Auch wirkt sich bei diesem Nachweisverfahren mit Schimmelpilzsporen versetzter Anflugstaub nicht so stark auf das Ergebnis aus. In der Regel werden bei diesem Verfahren nur wenige Arten, diese dafür in großer Zahl gefunden. Um beurteilen zu können, ob nachgewiesene Schimmelpilze auf einen aktiven Schimmelpilzbefall zurückzuführen sind, kann die Untersuchung geeigneten Vergleichsmaterials sinnvoll sein.

Soll ermittelt werden, wie weit ein Schimmelpilzbefall bereits in die Tiefe des betroffenen Baumaterials eingedrungen ist, müssen Proben in unterschiedlichen Schichttiefen getrennt voneinander entnommen werden.

7.3 Klebefilm-Abriss-Präparat (Oberflächenkontaktprobe)

Mit einem Klebefilm (z.B. handelsüblicher „Tesa“-Film) werden die Schimmelpilzsporen von der befallenen Oberfläche abgenommen und vor Ort auf einem Objektträger befestigt. Im Labor werden die Präparate dann eingefärbt und unter dem Lichtmikroskop ausgewertet.

Durch dieses mikroskopische Verfahren können aktiver Befall und bloße Anflugsporen unterschieden werden, da nur im ersteren Fall auch Mycelbruchstücke zu erkennen sein sollten. Weiterhin ist von Vorteil, dass es sich um ein vergleichsweise schnelles Nachweisverfahren mit geringem materiellem Aufwand handelt. Es wird ein aktueller Zustand der Materialoberfläche abgebildet, bei dem auch die nicht (mehr) vermehrungsfähigen Schimmelpilzzellen mit erfasst werden.

Auch hier stellt die direkte Differenzierung bzw. Identifizierung der Arten hohe Ansprüche an die persönliche Erfahrung des Betrachters, an seine Routine und seine Sachkenntnis. Aussagen darüber, wie tief der Schimmelpilz in das Material eingedrungen ist, ermöglicht die Methode nur, wenn auch entsprechend tiefere Materialschichten untersucht werden. Für manche Baumaterialien (z.B. faserige Dämmstoffe) ist das Verfahren nur begrenzt anwendbar, da eine zu starke Beladung des Objektträgers mit dem entsprechenden Baumaterial die direkte Auswertung weiter erschwert.

7.4 Direkte mikroskopische Untersuchung einer Materialprobe

Die Probenahme erfolgt wie unter 7.2 beschrieben. Der direkte mikroskopische Nachweis erfolgt unter einem Auflicht-Stereo-Mikroskop. Es gilt hierbei das gleiche, was schon für den direkten Nachweis an Hand eines Klebefilm-Abriss-Präparates gesagt wurde. Die Anforderungen bezüglich der Fachkenntnis des Betrachters sind dabei allerdings als eher noch höher einzuschätzen. Ein Vorteil dieses Verfahrens kann sein, dass ein geeigneter Querschnitt eines befallenen Materials daraufhin untersucht werden kann, wie tief das Mycel bereits in dieses Material eingedrungen ist.

7.5 Zusammenfassung der Bewertungsmaßstäbe für die Untersuchung von Materialproben

In der Regel sind Schimmelpilzbelastungen im Innenraum auf befallene, feuchte Materialien, nicht selten auch Baumaterialien, zurückzuführen. Ein mit dem bloßen Auge erkennbarer Schimmelpilzbefall sollte, wenn offensichtlich, untersucht werden (sofern eine gezielte Beprobung überhaupt möglich ist), um z.B. die Aussagen, welche eine Raumluftuntersuchung erbrachte, zu verfeinern. Insbesondere das Vorkommen von in Hinsicht auf die gesundheitliche Gefährdung besonders kritischer Schimmelpilzarten ist hier von Interesse. Um einen solchen sichtbaren Befall allein von seinem Ausmaß her zu bewerten, schlägt der „Schimmelpilz-Leitfaden“ Umweltbundesamtes eine Einteilung in drei unterschiedliche Kategorien vor:

- Kategorie 1: Der Schaden besitzt keine oder nur eine sehr geringe Biomasse mit einem Flächenausmaß von unter 20 cm².
- Kategorie 2: Der Schaden weist mittlere Biomasse auf, erreicht eine oberflächliche Ausdehnung von bis zu 0,5 m², tiefere Materialschichten sind jedoch nur lokal begrenzt betroffen.
- Kategorie 3: Es ist eine hohe Biomasse an Schimmelpilzen vorhanden. Die oberflächliche Ausdehnung ist größer als 0,5 m², auch tiefere Schichten können im erheblichen Maße betroffen sein.

Generell muss zu Tiefenschäden angemerkt werden, dass ein Pilzwachstum tief in das Material hinein zu einer Einstufung in eine höher Kategorie führen kann. Auch eine Sanierung des betreffenden Schadens wird bei Tiefenschäden weitaus mehr Aufwand erfordern als bei einem „nur“ oberflächlichen Befall.

Zudem sollte stets versucht werden, zwischen einem aktiven Befall und einem abgetrockneten Altschaden zu unterscheiden. Zwar kann vor allem in Hinsicht auf allergische Erkrankungen auch ein Altschaden ein gesundheitliches Gefährdungspotential beinhalten. Doch ein aktiver Befall birgt unkalkulierbare Risiken in sich. Zum einen kann er sich in

seiner Zusammensetzung rasch verändern und es könnte dann auch zum unerwarteten Auftreten krankheitserregender Mikroorganismen kommen. Zudem nimmt die Menge an freigesetzten Sporen im Laufe der Zeit eher zu als ab, anders als bei einem Altschaden. Schließlich kann ein aktiver Befall auch die Nährstoffgrundlage für andere Organismen wie Milben oder auch mikrobielle Krankheitserreger darstellen. Nach der Austrocknung eines solchen Schadens nimmt in der Regel auch die Zahl der Begleitorganismen rasch ab.

8 Mess- und Bewertungsstrategien des Bremer Umweltinstitutes

Nach unserer Ansicht ist die Begehung des vermutlich von einem Schimmelpilzbefall betroffenen Gebäudes durch den erfahrenen Gutachter in den allermeisten Fällen auch durch die raffiniertesten Analysemethoden nicht zu ersetzen. Natürlich ist „der Fachmann / die Fachfrau vor Ort“ für Sie zunächst einmal mit einer gewissen finanziellen Belastung verbunden. Gleichzeitig garantiert jedoch nur der durch die Begehung gewonnene unmittelbare Gesamteindruck vor Ort, dass wirklich ausschließlich jene Maßnahmen zur Bestimmung der Belastung ergriffen werden, die auch sinnvoll sind. Hin und wieder stellt sich bei einer solchen Begehung auch heraus, dass der unangenehmen Geruch, den Sie seit einiger Zeit in Ihrer Wohnung feststellen, gar nicht von Schimmelpilzen stammt und Sie sparen sich die Kosten aufwändiger Analysen.

Von den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Nachweisverfahren werden durch das Bremer Umweltinstitut folgende Methoden als Standard-Untersuchungsverfahren eingesetzt:

- Bestimmung der Konzentration koloniebildender Einheiten, sowie der Gesamtzellzahl in der Raumluft (s. **5.1**).
- Bestimmung der Konzentration koloniebildender Einheiten, sowie der Gesamtzellzahl im Hausstaub (s. **6.1**)
- Bestimmung der Konzentration koloniebildender Einheiten in suspendierten Proben anderer Materialien (s. **7.2**)
- Eine direkte mikroskopische Betrachtung eines Klebefilm-Abriss-Präparates (s. **7.3**).

Die Beschränkung auf die Bestimmung der Konzentration koloniebildender Einheiten, also lebender Zellen, kann den Vorteil bieten, dass nur aktueller Schimmelpilzbefall erfasst wird. Die Dauer der Probenahme liegt für die Luftproben bei ungefähr 60 Minuten, für Staub- und Materialproben bei wenigen Minuten. Ein Nachteil der Bestimmung lebender Zellen durch die Anzucht der Proben auf geeigneten Nährböden ist der vergleichsweise hohe Zeitaufwand, der dafür notwendig wird (mindestens zehn Tage). Doch ist dieses Ver-

fahren im Vergleich zu den übrigen am besten dazu geeignet, eine relativ sichere Artenidentifizierung zu leisten. Das Verfahren zur Bestimmung der Konzentration koloniebildender Einheiten ist in der Praxis gut erprobt. Auf Grund der vergleichsweise hohen Anzahl an vorliegenden Untersuchungen zu Hintergrund- und Schadensfallbelastungen kann der gefundene Wert eingeordnet und bewertet werden.

8.1 Probenahmeverfahren des Bremer Umweltinstitutes

8.1.1 Luftproben

Zunächst sollte der Raum gründlich durchgelüftet werden. Es kann sinnvoll sein, eventuell vorhandene Zimmerpflanzen oder andere mögliche Quellen von Sporenbelastungen aus dem Raum zu entfernen. Spätestens ab diesem Zeitpunkt sollte in dem entsprechenden Raum nicht mehr geraucht werden. Es sind Vorkehrungen zu treffen, die Lufttemperatur in dem entsprechenden Raum auf ca. 20°C einzustellen, in den Sommermonaten kann dies z.B. bedeuten, Räume auf der Sonnenseite zu verdunkeln, im Winter sollte die Heizung auf geeigneter Leistung eingeschaltet werden. Eventuell vorhandene Zwangsbelüftungsanlagen (Klimaanlage) müssen abgeschaltet werden.

Anschließend wird der Raum für mindestens 8 Std. verschlossen. Während dieser Zeit sollte er nicht betreten werden. Es sollte selbstverständlich während dieser Zeitspanne in diesem Raum auch nicht geraucht werden.

Vor Beginn der Probenahme wird die Raumluft durch adäquate Maßnahmen leicht verwirbelt („Nutzungssimulation“), so dass absedimentierte Feinstäube wieder aufgewirbelt werden. Als Ziel der Luftprobenahme wird häufig genannt, nur die soeben durch Sporulation gebildeten und aktiv durch die Schimmelpilzkolonien freigesetzten Sporen zu erfassen. Einmal absedimentierte Sporen sollen durch Untersuchungen des Staubes erfasst werden. Eine Nutzungssimulation entspricht daher nicht dem Standard der Luftprobenahme auf Schimmelpilzsporen, weil dann die Probenahmemedien Staub und Luft wieder vermischt werden. Dennoch hält das Bremer Umweltinstitut diese Vorgehensweise aus folgenden Gründen für sinnvoll:

- In vollkommen ruhiger Luft kommt es zu einer sehr ungleichmäßigen Verteilung selbst der gerade erst gebildeten Sporen im gesamten Raumluftvolumen. Die Sedimentation der Sporen kann schneller vonstatten gehen als die seitliche Verdüftung. Dadurch kann es zu Verfälschungen des Ergebnisses kommen.
- Aus wissenschaftlicher Sicht mag es sinnvoll sein, ausschließlich Daten über die Konzentration gerade gebildeter Sporen in der Raumluft zu erhalten. Geht es allerdings darum, durch die Messung die akute Belastungs- und Gefährdungssituation der Nutzer eines Raumes zu ermitteln, muss zuvor auch eine Nutzungssimulation erfolgen. Eine Probenahme in einem verschlossenen Raum, der seit zwölf Stunden nicht gelüftet wurde und in dem keine Luftverwirbelungen durch die

Aktivitäten der Nutzer des Raumes erfolgen, kann keine Angaben darüber liefern, wie hoch die tatsächliche Belastung der Menschen in diesem Raum ist, wenn sie ihren gewohnten Aktivitäten nachgehen.

- Wie stark die Luftbewegungen in einem verschlossenen Raum sind, ist zumeist eine unbekannte Größe. Sie ist stark davon abhängig, wie hoch die Rate des Luftaustausches (die sogenannte **Luftwechselrate**) zwischen Innen- und Außenluft bei geschlossenen Fenstern und Türen ist, wird aber z.B. auch verschiedene Formen von Thermik (z.B. auf Grund von Sonneneinstrahlungen oder Beheizung) beeinflusst. In einigen Räumen wird es noch vergleichsweise starke, in anderen nur noch sehr schwache Luftbewegungen geben – und demzufolge auch Räume mit verlangsamter Sedimentation bei gleichzeitiger Wiederaufwirbelung bereits absedimentierter Stäube und Räume, in denen bei fast vollkommen ruhiger Luft die Sporen schneller absedimentieren und so gut wie gar nicht mehr wieder aufgewirbelt werden. Wenn diese Unterschiede bei der Beprobung nicht erfasst werden (können), schleichen sich in den Vergleich von Ergebnissen aus Messungen in unterschiedlichen Räumen oder in Bezug auf die Sporenkonzentration der – sehr stark durchmischten! – Außenluft höhere relative Fehler ein, als wenn von vornherein in jedem Raum eine Nutzungssimulation durchgeführt wird.
- Sporen sedimentieren je nach Dichte sowie Struktur ihrer Oberfläche unterschiedlich schnell. Schneller absedimentierende Sporen (z.B. von *Alternaria* sp.) werden bei einer Messung ohne Nutzungssimulation stärker diskriminiert als Teilchen, die sich länger in der Luft halten können (wie z.B. Sporen von *Aspergillus fumigatus*). Bei Messungen ohne Nutzungssimulation sollte in jedem Fall stets auch eine Hausstaubprobe aus dem entsprechenden Raum entnommen und untersucht werden, da ansonsten Sporen mit sehr schlechten Flugeigenschaften (wie z.B. von *Stachybotrys* sp.) mit hoher Wahrscheinlichkeit überhaupt nicht erfasst würden.

8.1.2 Staubproben

Der zu beprobende Raum sollte eine Woche vor dem Termin der Probenahme das letzte Mal gereinigt (Staubsaugen, Staubwischen) werden. Während dieser Zeit ist eine Querlüftung des Raumes möglichst zu vermeiden. Die Räume sollten fortlaufend auf ca. 20°C temperiert werden, sind ansonsten aber wie gewohnt nutzbar.

Die eigentliche Probenahme erfolgt mittels eines „ALK-Staubsammelkopfes“, welcher auf das Ansaugrohr eines Staubsaugers montiert wird. Die Probenahme erfolgt am Fußboden in unmittelbarer Nähe zum (vermuteten) Befall und, soweit möglich, vom Teppichboden. Die beprobte Fläche sollte mindestens 1 m² betragen, die Dauer der Probenahme richtet sich nach der beprobten Fläche bzw. nach der (augenscheinlich) dort vorliegenden Staubmenge.

In Einzelfällen (je nach vor Ort vorzufindender Sachlage und Fragestellung) erfolgt eine Probenahme auch mittels eines handelsüblichen Staubsaugers sowie eines frischen Staub-

saugerbeutels. Diese Probenahme kann auch durch den Verbraucher bzw. Nutzer selbst durchgeführt werden.

8.1.3 Materialproben

Bei dieser Probenahme ist eine entsprechende Vorbereitung des Raumes nicht notwendig. Die Probenahme sollte mit sterilisiertem Werkzeug erfolgen, die Proben dann großzügig in Alufolie verpackt werden. Nach der Bestimmung des Gewichtes und anschließender Suspension des Materials im Labor erfolgt die weitere Aufarbeitung der Proben wie unter **7.2** angegeben.

In Einzelfällen (je nach vor Ort vorzufindender Sachlage und Fragestellung) kann eine Probenahme auch durch den Verbraucher selbst durchgeführt werden.

8.2 Bewertungsgrundlagen des Bremer Umweltinstitutes

Allgemein gültige Bewertungsgrundlagen sind – wie ausführlich zu Beginn des Kapitels **4** diskutiert – nur schwer zu definieren. In den meisten Fällen ist eine Bewertung nur in Verknüpfung des bei der Begehung vor Ort vorgefundenen Sachverhaltes möglich.

Am fundiertesten sind die Aussagen über Hintergrundbelastungen bei der Beprobung der Raumluft auf koloniebildende Einheiten. Hier existieren bereits eine Reihe von vergleichsweise konkreten Angaben über durchschnittliche und erhöhte Außen- wie Innenraumluftwerte. In unserer Bewertung berücksichtigen wir meist mehrere unterschiedliche Qualifikationssysteme.

Im Laufe der Jahre hat das Bremer Umweltinstitut in zahlreichen Begehungen selbst eine ganze Anzahl an Daten bezüglich der in den Einzelfällen vor Ort gefundenen Belastung erhoben. Die aus unseren Daten resultierende durchschnittliche Belastung der Außenluft liegt in ihrem **Meridianwert** bei ungefähr 350 KBE/m³. Der **90-Perzentil-Wert** beträgt etwas über 1.000 KBE/m³. Diese Werte liegen z.T. deutlich über den Angaben anderer Autoren (s. **5.1**). Im Einzelfall bleibt jedoch auch stets der Vergleich zwischen der Konzentration in der Innenraumluft mit der *korrespondierenden* Konzentration in der Außenluft entscheidend.

Die folgende graphische Darstellung der vom Bremer Umweltinstitut erhobenen Daten bezüglich der Belastung der untersuchten Außenluft wirft einen interessanten Punkt auf, wenn die gefundenen Belastungen in unterschiedliche Klassen aufgelistet und dann nach der jeweiligen Häufigkeit aufgegliedert werden.

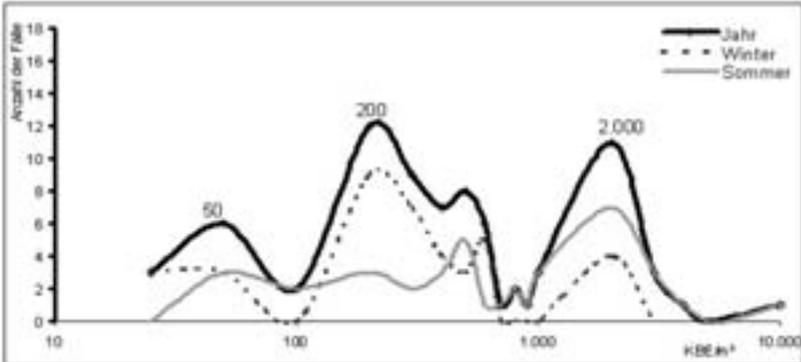


ABB. 8: In den Messungen des Bremer Umweltinstitutes aufgetretene KBE-Konzentrationen der Außenluft, aufgeschlüsselt nach der Häufigkeit ihres jeweiligen Auftretens. Die zu Grunde liegende Fallzahl beträgt $n = 76$. Beachten Sie bitte, dass die Darstellung halblogarithmisch ist. Zudem ist der Kurvenverlauf stark extrapoliert. Die mikrobiologischen Analysen erfolgten durch die „eco – Luftqualität und Raumklima“ GmbH

Hier zeigt sich, dass die bloße Erhebung eines Median- oder 90-Perzentil-Wertes, wie sie sonst häufig zur Beschreibung durchschnittlicher Belastungen herangezogen wird, nicht unproblematisch ist. Die Häufigkeitsverteilung folgt nämlich nicht dem idealen Verlauf einer Gauß'schen Glockenkurve, sondern bildet vielmehr mindestens zwei unterschiedliche „Klassen“ an häufig auftretenden KBE – Konzentrationen in der Außenluft. Häufig gefundene Außenluftkonzentrationen liegen demnach im Bereich von 200 bis 600 KBE/m^3 und um 2.000 KBE/m^3 .

Betrachtet man die graphische Auswertung der vom Bremer Umweltinstitut für die Innenraumluftmessung erhobenen Daten, so ergibt sich eine ähnliche Grundaussage.

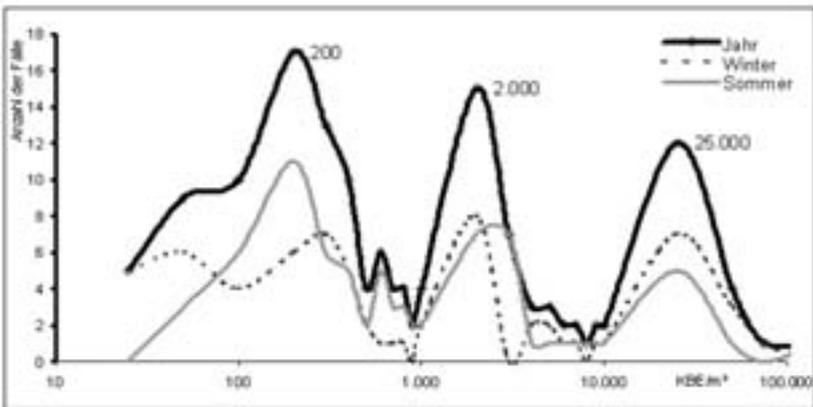


ABB. 9: In den Messungen des Bremer Umweltinstitutes aufgetretene KBE-Konzentrationen der Innenraumluft, aufgeschlüsselt nach der Häufigkeit ihres jeweiligen Auftretens. Die zu Grunde liegende Fallzahl beträgt $n = 142$. Beachten Sie bitte, dass die Darstellung halblogarithmisch ist. Zudem ist der Kurvenverlauf stark extrapoliert. Die mikrobiologischen Analysen erfolgten durch die „eco – Luftqualität und Raumklima“ GmbH.

Statt zwei sind hier drei „Klassen“ an Konzentrationen zu erkennen. Eine Häufung der Konzentrationen findet statt zunächst im Bereich von ca. 100 bis 400 KBE/m³, erneut um ca. 2.000 KBE/m³ und zudem in einem Bereich bei ungefähr 25.000 KBE/m³. Letzteres muss als sehr hoher Wert bezeichnet werden, welcher in der Außenluft nicht wiedergefunden werden kann (s. Tab. 9). Für Innenraumluftmessungen im Winter scheint zu gelten, dass hier mit höherer Häufigkeit sehr hohe Konzentrationen (um und über 25.000) als in den Sommermonaten auftreten.

Zieht man von den Werten für die Innenraumluft jene der jeweils korrespondierenden Außenluftmessungen ab, so ergibt sich folgendes Bild:

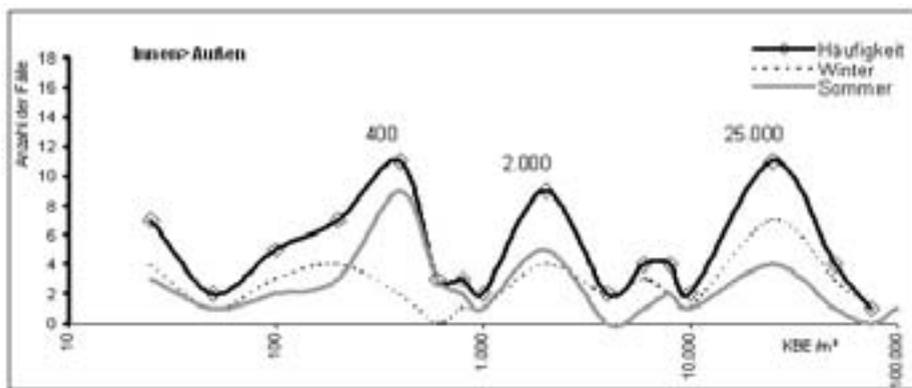


ABB. 10: In den Messungen des Bremer Umweltinstitutes aufgetretene KBE-Konzentrationen der Innenraumluft, nachdem die Werte der jeweils korrespondierenden Außenluftmessungen abgezogen wurden. Die zu Grunde liegende Fallzahl beträgt $n = 76$. Die Darstellung erfolgt aufgeschlüsselt nach der Häufigkeit des jeweiligen Auftretens. Beachten Sie bitte, dass die Darstellung halblogarithmisch ist. Zudem ist der Kurvenverlauf stark extrapoliert. Die mikrobiologischen Analysen erfolgten durch die „eco – Luftqualität und Raumklima“ GmbH

Überraschenderweise bleibt die Aufteilung in unterschiedliche „Klassen“ von Häufigkeiten auch erhalten, wenn die jeweils korrespondierenden Werte für die Außenluftkonzentrationen von den Werten der KBE-Konzentration im Innenraum abgezogen wurden. Der Kurvenverlauf ähnelt hierbei demjenigen aus der graphischen Darstellung der Innenraumluftkonzentrationen (s. Tab. 9). Aus den vorliegenden Daten geht hervor, dass relativ geringe Überschreitungen (um 400 KBE/m³) der Außenluftkonzentration im Innenraum

eher im Sommer stattfinden, sehr hohe Überschreitungen (um 25.000 KBE/m³) hingegen im Winter häufiger vorkommen. Nicht dargestellt sind jene Fälle, bei denen die Außenluftkonzentration höher lag als jene in der Innenraumluft.

Auch bei der Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen von Hausstaub durch das Bremer Umweltinstitut spiegeln sich die bisher dargestellten Muster wieder. Hier lassen sich in einer graphischen Darstellung zumindest zwei unterschiedliche Häufigkeitsklassen wiederfinden.

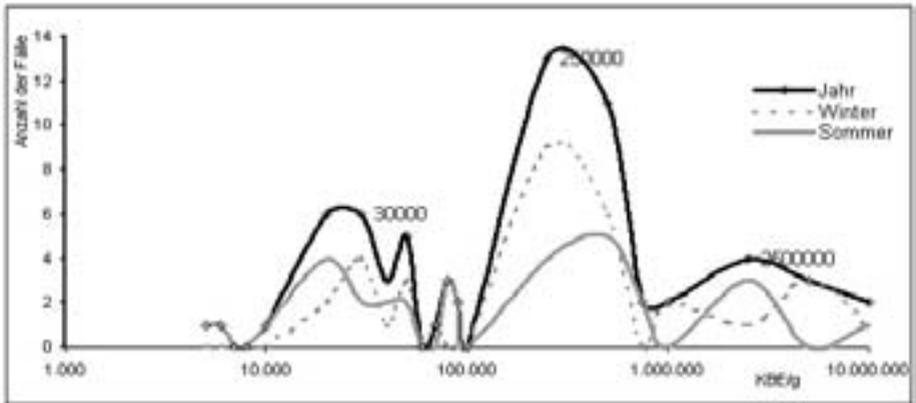


ABB. 11: In den Messungen des Bremer Umweltinstitutes aufgetretene KBE-Konzentrationen im Hausstaub, aufgeschlüsselt nach der Häufigkeit ihres jeweiligen Auftretens. Die zu Grunde liegende Fallzahl beträgt $n = 67$. Beachten Sie bitte, dass die Darstellung halblogarithmisch ist. Zudem ist der Kurvenverlauf stark extrapoliert. Die mikrobiologischen Analysen erfolgten durch die „eco – Luftqualität und Raumklima“ GmbH

Auch die Konzentration der koloniebildenden Einheiten im Hausstaub folgt nach dieser Abbildung verschiedenen Häufigkeits-„Klassen“. Mindestens zwei verschiedene solcher „Klassen“ lassen sich hier feststellen: eine der eher geringen Konzentration zwischen 20.000 und 30.000 KBE/g sowie eine der hohen Konzentrationen von 250.000 KBE/g und darüber. Allgemein scheinen Konzentrationen um 250.000 KBE/g weitaus am häufigsten nachgewiesen zu werden. Stäube, die mit Konzentrationen von 10.000 KBE/g oder weniger belast sind, machen nur eine sehr geringe Anzahl an Fällen aus.

Die Interpretation der hier dargestellten Werte ist noch nicht abgeschlossen. Eine abschließende Darstellung und Bewertung der vorliegenden Daten durch das Bremer Umweltinstitut wird zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht werden. An dieser Stelle wird auch eine Artdifferenzierung innerhalb der hier skizzierten Ergebnisse durchgeführt werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Bewertung der Konzentration koloniebildender Einheiten in Staub- und Materialproben noch nicht auf einer so breiten Datenlage gegründet ist, wie dies für die Luftproben der Fall ist. Entsprechende Angaben zu erhöhten bzw. Hintergrundbelastungen weichen z.T. stark voneinander ab. Auch der im Jahre 2002 erschienene LEITFADEN (...) des Umweltbundesamtes verzichtet auf die Angabe eines detaillierten Bewertungsschemas für Belastungen des Hausstaubes. Ursächlich für diese „Bewertungslücke“ verantwortlich ist wohl die Unsicherheit, welche die Analyse einer so heterogenen Matrix wie Hausstaub stets mit sich bringt. Solange keine einheitlichen Vorschriften für die Probenahmebedingungen existieren, werden diese Schwierigkeiten fortbestehen. Als problematisch erweist sich in der Praxis das Auftreten unterschiedlicher Bodenbeläge sowie die Forderung nach einer allgemeingültigen Prüfanweisung bezüglich des Probenahmeortes in einem gegebenen Innenraum.

8.3 Vom Bremer Umweltinstitut nicht angewandte Nachweisverfahren

Die unter 5.3 dargestellte Methode des Nachweises von mVOCs in der Raumluft könnte ein geeignetes Werkzeug darstellen, vor allem um einen versteckten Schimmelpilzbefall nachzuweisen und aufzuspüren. Aus unserer Sicht ist die Methode jedoch noch mit Unwägbarkeiten und einigen verfahrensbedingten Mängeln behaftet. Anzuführen wäre hier zunächst, dass die Definition jener mVOCs, welche spezifisch von Schimmelpilzen gebildet werden, immer noch mit einigen Unsicherheiten versehen ist. Vor allem der Einfluss der unterschiedlichen Substrate (Baumaterialien) auf die Bildung dieser Substanzen, sowie die Auswirkungen der vor Ort herrschenden Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) sind unserer Ansicht nach noch nicht abschließend zu bewerten. MIERAU (2001) gibt eine große Anzahl an Untersuchungen an, bei denen eine Innenraumbewertung mit Hilfe von mVOC zu falsch-positiven bzw. zu falsch-negativen Interpretationen geführt hat, so dass der Stellenwert der mVOC-Analytik für die Ermittlung verdeckter Schimmelpilzbefälle als eher gering einzuschätzen sei.

Auch bei Bestimmungen der Konzentration der koloniebildenden Einheiten in der Raumluft werden hin und wieder „falsch negative“ Ergebnisse beobachtet. Dies bedeutet, dass in Wohnungen mit deutlich sichtbarem Schimmelpilzbefall Konzentrationen von KBE gefunden wurden, die deutlich unter denen der korrespondierenden Außenluftmessungen lagen. Dennoch erlaubt die Bestimmung der Luftkeimkonzentration stets auch eine Bewertung der aktuellen direkten Gefährdungssituation; das Risiko hoher Sporenkonzentrationen für die menschliche Gesundheit ist unstrittig. Vergleichbares gilt für die Konzentration der mVOC in der Raumluft jedoch nicht. Dies stellt den Sinn einer eventuell falsch negativen mVOC-Bestimmung in Frage.

Auch PASANEN et al. (1998) bezweifeln die Indikatoreigenschaft der mVOC. Sie schätzen, dass Mikroorganismen nur zu einem geringen Teil an der Bildung der in der Luft befindlichen mVOC beitragen. Störend kann sich u.a. auch auswirken, wenn in dem entsprechenden Innenraum geraucht wurde (SAMWER, 2001, SCHLEIBINGER et al., 2001).

Ein Vortrag auf der CGÖF im Jahre 2003 in Fulda ging auf die Schwierigkeiten ein, welche die mVOC-Analytik vor allem in Hinsicht auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (noch) aufweist.

Bei Parallelbeprobungen in einem mit Schimmelpilzen belasteten Raum wurden vier unterschiedliche Labore beauftragt, die mVOC-Konzentration der entsprechenden Proben zu bestimmen. Die jeweiligen Ergebnisse lagen weit auseinander; zwischen der niedrigsten und der höchsten gefundenen Konzentration lag ein Faktor von 15. Auch wenn dies ein Extremfall sein mag, so deuten diese Ergebnisse doch darauf hin, dass die mVOC-Analytik zum gegenwärtigen Zeitpunkt als noch nicht verlässlich genug anzusehen ist.

Eine weitere Möglichkeit, einen verdeckten Schimmelpilzbefall aufzuspüren, besteht im Einsatz eines sogenannten „Schimmel-Spürhundes“. Hunde werden auf Grund ihres exzellent ausgebildeten Geruchssinns und weil sie leicht auf eine Zusammenarbeit mit dem Menschen abzurichten sind heutzutage für eine Vielzahl von „Suchaufgaben“ eingesetzt (Drogenhunde, Suchhunde in Katastrophenfällen). Jedoch können Schimmel-Spürhunde stets nur Stellen „markieren“, an denen es nach Schimmelpilzen riecht. Diese sind nicht unbedingt deckungsgleich mit den Stellen, an denen der Schimmelpilz auch tatsächlich wächst. Außerdem ist die „Reichweite“ eines solchen Hundes eingeschränkt; befindet sich der Schimmelpilzbefall unter einer abgehängten Raumdecke, muss der Einsatz eines Schimmelpilzspürhundes scheitern. Auch eine objektive Quantifizierung der gefundenen Belastung durch den Hund allein ist kaum möglich.

Teil D: Vorbeugung vor und Sanierung von Schimmelpilzbefall im Innenraum

9 Die Kontrolle der Feuchtigkeit ist der Schlüssel

Unsere Wohnungen sind zumeist mit einer Vielzahl an Materialoberflächen ausgestattet, welche dem Schimmelpilz mehr oder weniger gut geeignete Nährböden bieten. In Mietwohnungen ist es dem Mieter in der Regel nur begrenzt möglich, gefährdete Baumaterialien auszutauschen.

Auch die Temperaturen, die in unseren Wohnungen herrschen, sind für viele Schimmelpilze „wie gemacht“. Nun kommen wir jedoch nicht umhin, in den Wintermonaten unsere Räumlichkeiten zu heizen, auch wenn die zu dieser Zeit auftretenden scharfen Temperaturunterschiede zwischen Innen und Außen ganz erheblich zu der Schimmelpilzproblematik beitragen können.

So bleibt häufig als einzig möglicher Angriffspunkt bei der Bekämpfung von Schimmelpilzen im Innenraum der Faktor Feuchtigkeit. In ihren Ansprüchen an die Feuchtigkeit liegen Schimmelpilze weit über jenem „Level“, welchen wir Menschen als optimal bezeichnen würden. Wenn wir nur sicherstellen, dass unsere Wohnungen tatsächlich nicht feuchter sind, als wir sie uns ohnehin wünschen würden, so ist der Kampf gegen den Schimmel schon halb gewonnen.

Noch vor wenigen Jahren glaubte man, die Luft in unseren Wohnungen sei im Allgemeinen zu trocken. Dies mag in Einzelfällen, vor allem in der Heizperiode, der Fall sein, in der Regel trifft dies jedoch nicht zu. Vielmehr scheint eine hohe **relative Luftfeuchtigkeit** (s. 11), d.h. ein Wert, welcher dauerhaft über 80% liegt, u.a. auch die Ausbildung von Atemwegserkrankungen wie z.B. des schon angesprochenen „Sick-Building-Syndromes“ (s. 4.1.2) zu begünstigen.

Eine relative Luftfeuchtigkeit um 40 - 50% in Innenräumen schafft ein angenehmes Klima für Menschen, aber ein unangenehmes für Schimmelpilze

10 Wo kommt die Feuchtigkeit her?

Feuchtigkeit taucht in Innenräumen in zwei Erscheinungsformen auf, nämlich als Wasser in flüssiger Form und in gasförmigen Zustand, als sogenannter „Wasserdampf“. Diese beiden Zustände des Wassers können ineinander übergehen; flüssiges Wasser kann „verdampfen“, also zu Wasserdampf werden, der Wasserdampf kann aber durch Kondensation auch in die flüssige Form übergehen.

Wasserdampf ist gasförmiges Wasser. Er ist unsichtbar und darf nicht mit Nebel verwechselt werden, welcher aus sehr kleinen Wassertropfchen besteht. Nebel ist optisch wahrnehmbar.

Der überwiegende Teil des Wassers, welches sich in unseren Wohnungen befindet, liegt als unsichtbarer Wasserdampf vor. Wenn sich der Wasserdampf durch Kondensation in Wasser umwandelt, kann dies – in Abhängigkeit des Ortes, wo dies geschieht – zur Durchfeuchtung von Baumaterialien und damit zu Problemen führen. Die Mechanismen des Wechselspiels zwischen Wasser in flüssiger wie in gasförmigen Zustand werden in Kapitel 11 erläutert.

Wo aber kommt das Wasser, welches sich in einem Innenraum befindet, überhaupt her?

Zum einen kann Wasser in flüssiger Form in Ihre Wohnung gelangen: aus undichten Leitungen im Innenraum bzw. im Mauerwerk kann Wasser – vor allem bei geringen Mengen häufig für lange Zeit unbemerkt – austreten. Gleichzeitig kann aber auch die „Außenhülle“ eines Hauses (Fundament, unter- und oberirdische Wände und Dach) undicht sein. Niederschläge oder Grundwasser können dann in das Mauerwerk eindringen und schließlich im Inneren zu Feuchtigkeitsproblemen führen.

Zum anderen führen die Aktivitäten der Nutzer bzw. Bewohner eines Innenraumes zur Freisetzung erheblicher Mengen an Wasserdampf. Die folgende Tabelle zeigt Ihnen, wie viel Wasserdampf bei einigen beispielhaften Tätigkeiten freigesetzt wird.

Quelle	ProTag abgegebene Feuchtigkeitsmenge in Litern
Mensch	1 - 2,5
Kochen	0,5 - 1
Duschen, Baden (pro Person)	0,5 - 1,0
Wäschetrocknen (4,5 kg)	
Geschleudert	1,0 - 1,5
Tropfnass	2,0 - 3,5
Zimmerblumen, Topfpflanzen ¹⁾	0,5 - 3,5

TAB. 10: Durchschnittliche, exemplarisch angeführte tägliche Wasserabgabe in einem Haushalt in Abhängigkeit unterschiedlicher Quellen.

¹⁾ Dies ist abhängig von Menge und Art der Pflanzen

11 Wasserdampf und die relative Luftfeuchtigkeit

Die meisten Menschen werden Wärme zunächst mit Trockenheit und Kälte mit Nässe assoziieren. Im jahreszeitlichen wie im Tagesrhythmus ist die Abkühlung der Umwelt in Herbst und Winter bzw. in der Nacht (oder am frühen Morgen, wenn in der Regel die niedrigsten Temperaturen erreicht werden) mit der Bildung von sichtbarer Feuchtigkeit verbunden: es entstehen Nebel, Tau und Reif. Wie kommt es hierzu?

Stellen Sie eine Schale voll Wasser auf eine Heizung; dieses Wasser wird nach und nach immer weniger, schließlich verschwindet es ganz. In Wahrheit verschwindet es jedoch nicht, vielmehr verändert es seine Form von (sichtbarem) Wasser in (unsichtbaren) gasförmigen Wasserdampf. Prinzipiell gilt: je höher die Temperatur von Wasser in flüssiger Form, desto größer seine „Neigung“, in die gasförmige Phase überzugehen, zu „verdampfen“. Gleichzeitig gilt: je trockener die Luft, welche über einer Wasseroberfläche liegt, desto schneller ist der Prozess des Verdampfens.

Der gebildete Wasserdampf „löst“ sich in der Luft, er vermischt sich mit ihr, ähnlich wie sich das Kochsalz in Wasser Ihres Kochtopfes löst, wenn Sie Nudeln kochen. Bleiben wir einmal bei diesem Beispiel. Vielleicht haben Sie nämlich in diesem Zusammenhang auch schon einmal zwei Erfahrungen gemacht, zum einen nämlich, dass sich Kochsalz umso besser löst, je wärmer das Wasser ist, zum anderen, dass Sie nicht beliebig viel Salz in einem gleichbleibenden Volumen Wasser lösen können.

Vergleichbares gilt für das in der Luft „gelöste“ Wasser. Die Luft besitzt pro Volumeneinheit (z.B. pro Kubikmeter, Liter) nur ein bestimmtes Fassungsvermögen für die Aufnahme an Wasserdampf und diese ist abhängig von der Temperatur der Luft: je höher die Lufttemperatur, desto größer ist das Fassungsvermögen (die Kapazität) der Luft für Wasserdampf. Stellen Sie die erwähnte Schale Wasser in einen geschlossenen Raum mit einer Lufttemperatur von konstant 20 °C, in dem die Luft bereits vollkommen mit Wasser abgesättigt ist, wird kein Wasser mehr verdunsten. Erst wenn die Temperatur der Luft wieder erhöht wird, steigt die Kapazität der Luft für Wasserdampf und es wird wieder Wasser verdampfen.

Je höher die Temperatur der Raumluft ist, desto höher ist ihre Aufnahmekapazität für Wasserdampf.

Hier ist es an der Zeit, zu definieren, was der Begriff der **relativen Luftfeuchtigkeit** eigentlich aussagt. Die Einheit dieser physikalischen Größe ist Prozent (%). Sie gibt an, welcher prozentuale (relative) Anteil der von der herrschenden Temperatur abhängigen maximalen Kapazität der Luft für Wasserdampf im Augenblick erreicht ist. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die Hälfte der bei dieser Temperatur maximal möglichen Wasserdampfmenge in einem Kubikmeter Raumluft enthalten ist. Die maximalen Kapazitäten von Luft für Wasserdampf in Abhängigkeit der Temperatur sind bekannt. **Tabelle 11.1** stellt dar, wie hoch jeweils die absolute Menge an Wasserdampf (in Gramm) pro Kubikmeter Luft bei 40, 60, 80 und 100% relativer Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher

Lufttemperaturen ist. Bei einer gleichbleibenden absoluten Menge an Wasserdampf in der Luft steigt die relative Luftfeuchtigkeit mit sinkender Temperatur (da sich ja der 100%-Wert der maximal möglichen Kapazität erniedrigt). Wird die Temperatur erhöht, so sinkt die relative Luftfeuchtigkeit (denn die maximale Aufnahmekapazität, auf die sich 100% relativer Luftfeuchtigkeit beziehen, erhöht sich).

Raumlufttemperatur	Wasserdampfgehalt in einem Kubikmeter Luft (in Gramm [g], gerundete Werte) bei einer relativen Luftfeuchte von				
	20 %	40 %	60 %	80 %	100 % (gesättigt)
- 5 °C	0,6 g	1,2 g	1,8 g	2,4 g	3,0 g
0 °C	1,0 g	2,0 g	3,0 g	4,0 g	5,0 g
5 °C	1,4 g	2,8 g	4,2 g	5,6 g	7,0 g
10 °C	1,9 g	3,8 g	5,7 g	7,6 g	9,5 g
15 °C	2,6 g	5,2 g	7,8 g	10,4 g	13,0 g
20 °C	3,5 g	7,0 g	10,5 g	14,0 g	17,5 g

TAB. 11: Wasserdampfgehalt (absolute Feuchtigkeit in Gramm [g] pro Kubikmeter [m³] Luft) bei verschiedenen Raumlufttemperaturen und relativen Luftfeuchten.

Wenn Sie diese Tabelle betrachten, wird Ihnen auffallen, wie sehr uns unsere eigene Beobachtung in die Irre leiten kann: mitnichten nämlich ist „kalt“ per se mit „feucht“ und „warm“ mit „trocken“ verknüpft. Ein Kubikmeter Luft enthält bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% bei +20 °C sehr viel mehr Wasserdampf (10,5 g) als bei -5 °C (1,8 g)! Wir haben zwar ein recht gutes Gespür für Veränderungen der Temperatur, jedoch so gut wie keine sinnliche Wahrnehmungsfähigkeit für die relative Luftfeuchtigkeit. Flüssiges Wasser hingegen können wir sehen und fühlen.

Lassen Sie uns nochmals zurückkehren zu dem Beispiel der Wasserschale in einem Raum bei 20 °C, dessen Luft vollkommen mit Wasserdampf abgesättigt war, also eine relative Luftfeuchtigkeit von 100% aufwies.

Wenn wir die Raumlufttemperatur in diesem Raum weiter erhöhen, kann noch mehr Wasser aus der Schale in die Luft verdampfen. Was passiert aber, wenn wir die Temperatur senken? Nun, die Luft enthält dann mehr Wasserdampf, als sie „tragen“ kann. Das überschüssige Wasser beginnt zu „kondensieren“, d.h. es geht von der gasförmigen (unsichtbaren) Phase zurück in die flüssige (sicht- und fühlbare) Phase. In der Luft bilden sich feine Wassertröpfchen, sogenannter „Nebel“.

Nehmen wir nun einen Raum, in dem die Luft bei 20 °C eine relative Luftfeuchtigkeit von 75 % aufweist. Die Luft in diesem Raum enthält pro Kubikmeter 13 Gramm Wasserdampf. Senken wir die Temperatur in diesem Raum auf 15 °C, ohne dass wir der Luft neuen Wasserdampf zuführen, so liegt die relative Luftfeuchtigkeit nun bei 100%, obwohl die absolute Menge an Wasserdampf pro Kubikmeter Luft weiterhin bei 13 g/m³ liegt

(s. Tabelle 12). Senken wir nun die Temperatur in diesem Raum nochmals um 5 °C auf 10 °C ab, so beginnt der Wasserdampf zu kondensieren und Nebel bildet sich, denn die maximale Kapazität der Raumluft für Wasserdampf hat sich weiter erniedrigt, ohne dass sich die absolute Menge an Wasserdampf pro Kubikmeter Luft (nach wie vor 13 g/m³) verringert hätte. Da die relative Luftfeuchtigkeit bei 15 °C schon 100% betrug, bleibt dem Wasserdampf kein anderer Ausweg mehr, als abzukondensieren, da die Luft ihn nicht mehr „tragen“ kann. Es wird so viel Wasser auskondensieren, bis die absolute Menge an Wasserdampf pro Kubikmeter Luft einen Wert annimmt, der 100% relativer Luftfeuchtigkeit bei der verringerten Temperatur von 10 °C entspricht. Wie sie der Tabelle 11.2 entnehmen können, beträgt der absolute Wasserdampfgehalt der Luft bei 100% relativer Luftfeuchtigkeit und 10 °C Lufttemperatur 9,5 Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter. 3,5 Gramm Wasserdampf (die Differenz von 13 g und 9,5 g) wird also auskondensieren, der Rest (9,5 g) verbleibt als Wasserdampf in der Luft.

	Raumlufttemperatur		
	20 °C	15 °C	10 °C
	Abkühlung →		
Relative Luftfeuchte	75 %	100% Sättigung!	100 % Übersättigt!
Absolute Menge an Wasserdampf in der Raumluft	13 g	13 g	9,5
Absolute Menge an Wasser (flüssig) als Nebel oder Kondensat	--	--	3,5



TAB. 12: Anschauungsbeispiel über die Entwicklung von absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit bei Abkühlung eines bestimmten Luftvolumens, z.B. in einem Zimmer. In dem Beispiel wird vorausgesetzt, dass es keinerlei Luftaustausch mit der Außenluft gibt.

Die in unserem Beispiel dargestellte Raumluft weist einen absoluten Wasserdampfgehalt von 13 g/m³ auf. Sie erreicht bei einer Temperatur von 15 °C – wie dargestellt – eine relative Luftfeuchte von 100%. Man nennt diese Temperatur – eben 15 °C – die sogenannte „**Taupunkttemperatur**“. Bei einem Unterschreiten dieser Temperatur kommt es zur Kondensation von Wasser, es bildet sich „Tau“. Die Taupunkttemperatur bezeichnet jene Temperatur, bei der Luft mit einem bestimmten absoluten Wasserdampfgehalt pro Kubikmeter (g/m³) eine relative Luftfeuchte von 100% erreicht.

„Abkühlung“ der Luft kann bedeuten, dass sich aus dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf Kondenswasser bildet. „Erwärmung“ hingegen ist mit Verdunstung verbunden, da sich die Aufnahmekapazität der Luft für Wasserdampf durch die Erwärmung erhöht. Über

die Bildung von Kondenswasser entscheidet nicht die herrschende Temperatur, sondern die Veränderung der Temperatur.

Kondenswasser entsteht bei Abkühlung von Luft, und zwar wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Der **Taupunkt** ist abhängig von der absoluten Wasserdampfmenge im Raumluftvolumen. Eine Unterschreitung des Taupunktes ist gleichzusetzen mit einer relativen Luftfeuchte von 100 %.

12 Wie gelangt das Wasser in die Baumaterialien?

Feuchtigkeit gelangt durch verschiedene Transportmechanismen in Baustoffe. Die physikalischen Grundlagen, die diesen zu Grunde liegen, wollen wir Ihnen in den folgenden Kapiteln erläutern. Gleichzeitig möchten wir Ihnen Beispiele an die Hand geben, an welchen Stellen auch in Ihrer Wohnung, in Ihrem Haus solche Mechanismen zu einer Durchfeuchtung von Baumaterialien führen können.

Die Transportmechanismen von Wasser in Baumaterialien sind:

- Die Wasseraufnahme durch Kondensation
- Die Wasseraufnahme in Folge der Wasserdampfdiffusion
- Die Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation
- Die Hygroskopische Wasseraufnahme
- Die kapillare Wasseraufnahme
- Die Wasseraufnahme durch Sicker- bzw. Hangwasser

Bei den letzten beiden Transportmechanismen gelangt die Feuchtigkeit in flüssiger Form in die Baumaterialien. Die ersten drei der vorgestellten Mechanismen beruhen hingegen alle letzten Endes auf einer Aufnahme von Feuchtigkeit durch Kondensation.

12.1 Die Wasseraufnahme von Baumaterialien durch Kondensation

Feuchtigkeit in Form von Kondenswasser kann entstehen, wenn sich Luft abkühlt (s. 11). Zum einen besteht natürlich die Möglichkeit, dass sich die Raumlufthtemperatur insgesamt absenkt und es so zu Kondensation kommt. Dies ist jedoch eher selten der Fall: bedeutete dies doch, dass sich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit bei 20 °C von 60% die Raumlufthtemperatur um ungefähr 8 °C absenken müsste, bis die Taupunkttemperatur erreicht wäre (s. Tab. 13). Dies ist in bewohnten Räumen bei nicht allzu kalten Außentemperaturen eher unwahrscheinlich (wer will schon frieren?). Diese Temperaturabsenkung müsste nämlich ohne ein Öffnen der Fenster vonstatten gehen, denn im Falle einer niedrigen

Außentemperatur gelänge dann Luft mit einem geringeren absoluten Feuchtigkeitsgehalt in den Raum, es handelte sich um einen Luftaustausch, nicht um eine Abkühlung der Raumluft als solcher. Und nur die Abkühlung führt zu Kondensation.

Sehr viel häufiger ist vielmehr eine teilweise Abkühlung der Luft. Zumindest in Altbauten mit Einfachverglasung sind es im Winter die Fenster, an denen man dieses Phänomen beobachten kann. Die Luft, die sich an einer kalten Fensterscheibe entlang bewegt, wird abgekühlt. Liegt diese Temperatur unter der betreffenden Taupunkttemperatur, findet örtlich begrenzte Kondensation statt, die sich an der Fensterscheibe niederschlägt.

Selbstverständlich ist Kondensation nicht auf Fensterscheiben beschränkt. Jedes Bauteil in der Wohnung, welches im Vergleich zur Raumlufttemperatur sehr kalt ist, kann durch Kondenswasser befeuchtet werden. Dies tritt ein, wenn die Luft an diesem kalten Bauteil unter die jeweilige Taupunkttemperatur (s. 11) abgekühlt wird. Die Kondensation trifft im Prinzip stets nur das kälteste Bauteil, denn hier wird sie bei einer Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Luft auch als erstes einsetzen. Durch die einsetzende Kondensation wird der Raumluft Wasserdampf entzogen, die Luftfeuchtigkeit kann gar nicht so weit ansteigen, dass eine Kondensation an wärmeren Bauteilen möglich würde.

Kondensation entsteht also im Wechselspiel zwischen der absoluten Luftfeuchtigkeit der Raumluft, der Temperatur der Raumluft (das Verhältnis dieser beiden spiegelt sich in der relativen Luftfeuchtigkeit wieder) und der Temperatur des kältesten Bauteils. Einer Kondensation entgegenwirken kann demzufolge entweder die Verringerung der absoluten Luftfeuchtigkeit, die Erhöhung der Temperatur der Raumluft (resultierend in einer Verringerung der relativen Luftfeuchte) oder die Erhöhung der Temperatur des kältesten Bauteils.

12.1.1 Wärmebrücken

Wie kommt es zu niedrigen Temperaturen an Bauteilen? Die Hauptursache hierfür ist in der Abgabe von Wärme nach außen zu sehen – natürlich nur, wenn außen niedrigere Temperaturen herrschen als innen (in unseren Breiten also zumeist im Winter). Diese Abgabe von Wärme wird als „Wärmefluss“ oder „**Wärmedurchgang**“ bezeichnet.

Jedes Bauteil besitzt einen bestimmten Wert des Wärmedurchgangs, den sogenannten **Wärmedurchgangskoeffizienten**, abgekürzt mit dem Buchstaben „**k**“. Ein hoher Wärmedurchgangskoeffizient bedeutet einen hohen Wärmedurchgang durch das entsprechende Bauteil und schlechte Isolierungseigenschaften. Ein niedriger Wärmedurchgangskoeffizient bedeutet dementsprechend einen geringen Wärmedurchgang und hohe Isolierungseigenschaften. In Tab. 13 wird der Wärmedurchgangskoeffizient einiger beispielhafter Bauteile aufgeführt.

12 Wie gelangt das Wasser in die Baumaterialien?
 12.1 Die Wasseraufnahme von Baumaterialien durch Kondensation

Bauteil der Außenwandhülle	k - Wert	↑ Abnehmen der k - Wert Zunehmende Isolierung ↓
Fenster Einfachverglasung	5,8	
Fenster Isolierglas	3,2	
24 cm Mauerwerk	1,6	
Fenster Wärmeschutzglas	1,4	
36 cm Mauerwerk	1,2	
49 cm Mauerwerk	0,96	
24 cm Mauerwerk + 4 cm Dämmung ¹⁾	0,61	
24 cm Mauerwerk + 10 cm Dämmung ¹⁾	0,3	

TAB. 13: Einige typische Bauteile der Außenwandhülle und ihre k – Werte. Nach Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Mauerwerks bzw. der Isolierung können die k – Werte auch über oder unter den hier angegebenen Beispielwerten liegen.
¹⁾ Für den gesamten k – Wert eines Wandaufbaus ist es unerheblich, ob die Dämmung innen oder außen angebracht ist.

Das Ausmaß des Wärmeflusses oder Wärmedurchganges durch ein Bauteil ist abhängig von dem jeweiligen Baumaterial und der Schichtdicke. Abbildung 12 zeigt graphische Darstellungen von sogenannten „Wärmedurchgangskurven“ für drei unterschiedliche Wandaufbauten.

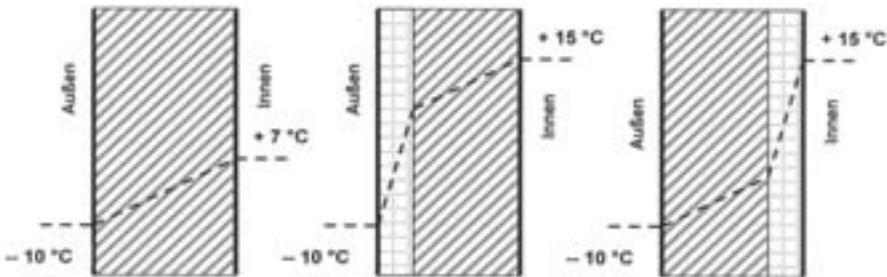


ABB. 12: Graphische Darstellung des Wärmedurchganges durch drei unterschiedliche Wandaufbauten. Links: ausschließlich Mauerwerk (schraffiert), Mitte: Mauerwerk (schraffiert) mit Außenisolierung (Kästchenmuster), Rechts: Mauerwerk (schraffiert) mit Innendämmung (Kästchenmuster).

Die Wärmedurchgangskurve ist steil, wenn der k-Wert des entsprechenden Baumaterials niedrig, die Isolationswirkung also hoch ist. Die Wärmedurchgangskurve verläuft umso

flacher, je höher der k-Wert, je niedriger demnach die Isolationswirkung des jeweiligen Baumaterials ist. In unserem Beispiel hat das Mauerwerk einen höheren k-Wert als die Dämmschicht, es isoliert also schlechter.

Durch Kondensation hervorgerufene Feuchtigkeitsprobleme im Inneren des Wandaufbaus können z.B. dann entstehen, wenn eine Innendämmung der Außenwand (in der obigen Abbildung rechts dargestellt) nicht dicht gegenüber Wasserdampf ist. Auf Grund der innenliegenden Dämmschicht ist die Innenseite des eigentlichen Mauerwerks sehr kalt. Dringt Wasserdampf in die Isolierungsschicht ein, so kann er an dem kalten Mauerwerk abkondensieren.

Die innere und die äußere Oberfläche einer Außenwand sind Ort eines weiteren interessanten Phänomens mit Belang für Kondensationsrisiken. Gemeint sind die unterschiedlichen „Grenzschichten“. An Oberflächen lassen sich generell viele physikalische Phänomene beobachten, welche zunächst ungewöhnlich sind. Die Saugwirkung der Kapillaren in einem porösen Material sind ein Beispiel, dass Sie bereits kennen gelernt haben (s. 12.2). Auch die Luftschicht, welche unmittelbar an feste Oberflächen wie z.B. eine Wand grenzt, unterliegt „eigenen Gesetzen“. Die Wärmedurchgangskurve durch eine solche Luftschicht gleicht nicht einer Geraden, sondern einer abgeflachten Kurve. Verantwortlich hierfür ist der Umstand, dass diese Grenzschichten im Gegensatz zum freien Luftvolumen nicht durchmischt werden. Lassen sie uns die Wärmedurchgangskurve durch eine einfache, gemauerte Wand einmal aus der Nähe betrachten.

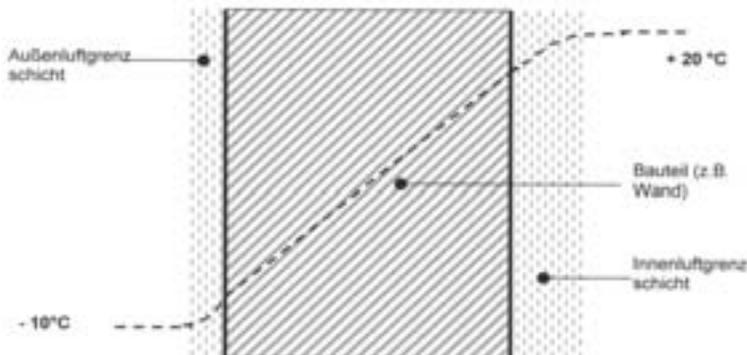


ABB. 13: Graphische Darstellung des Wärmedurchganges durch eine Außenwand. Die beiden „Luftgrenzschichten“ sind in ihrer Stärke abhängig von der Intensität der Luftbewegungen im angrenzenden „freien Luftvolumen“: je stärker die Luftbewegungen, desto dünner die Grenzschicht. Da die Luftbewegungen im Außenbereich in der Regel stärker sind als auf der Innenseite wurde die Außenluftgrenzschicht dünner gezeichnet als die Innenluftgrenzschicht.

Beachten Sie, wie wichtig eine ständige Durchmischung der Innenluftgrenzschicht in Bezug auf die Gefahr von Kondenswasserbildung ist. Die Innenluftgrenzschicht wirkt wie

12 Wie gelangt das Wasser in die Baumaterialien?

12.1 Die Wasseraufnahme von Baumaterialien durch Kondensation

eine innenliegende Isolierung. Bei starker Luftbewegung auf der warmen Innenseite der Wand (= dünne Innenluftgrenzschicht) ist die Temperatur der inneren Wandoberfläche höher, als wenn sich bei stehender Luft die Innenluftgrenzschicht immer weiter ausdehnt. Je kälter die Innenseite einer Wand, desto größer die Gefahr der Bildung von Kondenswasser.

Werden in einer Wand (oder gegebenenfalls auch Decke bzw. Fußboden), an deren beiden Seiten häufig stark unterschiedliche Temperaturen auftreten (in der Regel sind dies in erster Linie die Außenwände), teilweise Materialien eingesetzt, die eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die umgebenden Materialien, so fließt die Wärme hier schneller ab als an der übrigen Wand (z.B. Rollladenkasten). Diesem erhöhten Wärmefluss kann nur durch zusätzliche Isolierung entgegengewirkt werden. Gleichzeitig können selbst schmale Lücken in einer Isolierung oder an deren Rändern zu einer Zone erhöhten Wärmedurchflusses führen. Die schematische Darstellung einer „Wärmebrücke“ (hier ein Bauteil mit höherem Wärmedurchgangskoeffizienten als die umgebenden Baumaterialien) sehen Sie in **Abb. 14**.

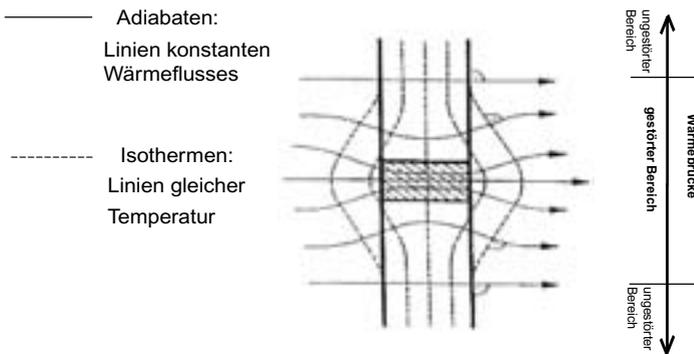


ABB. 14: Graphische Darstellung einer Wärmebrücke.

Es existieren jedoch neben den materialbedingten auch sogenannte „**geometrische Wärmebrücken**“. Sie entstehen nicht in erster Linie auf Grund eines höheren Wärmedurchganges eines unterschiedlichen Baumaterials, sondern auf Grund der räumlichen Anordnung der Bauteile zueinander. Ein Beispiel hierfür sind die Raumecken von Außenwänden oder die Deckenkante an einer Außenwand, zumal wenn der darüber liegenden Dachboden nur schlecht isoliert ist.

Ein weiterer Typ „Wärmebrücke“ kann als „**Massestrom**“-Wärmebrücke bezeichnet werden. Ein Beispiel für diese Art Wärmebrücken sind z.B. Kaltwasserleitungen im Mauerwerk. Das durch das Rohr fließende Wasser bildet einen Massestrom, welcher Wärme aus dem Mauerwerk abtransportiert.

Schließlich können Wärmebrücken auch durch **Feuchtigkeit in Baumaterialien** verursacht werden. Der Dämmwert poröser Materialien sinkt in dem Maße, wie die Poren in dem Material mit Wasser gefüllt werden. Gleichzeitig bedeutet dies, dass sich die Kapazität einer auch bei trockenen Materialien bestehenden Wärmebrücke durch die Durchfeuchtung mehr und mehr erhöht, dadurch wiederum auch die Kondensation zunimmt – ein „Teufelskreis“.

Abbildung 15 zeigt die schematische Darstellung der hier vorgestellten Wärmebrücken.

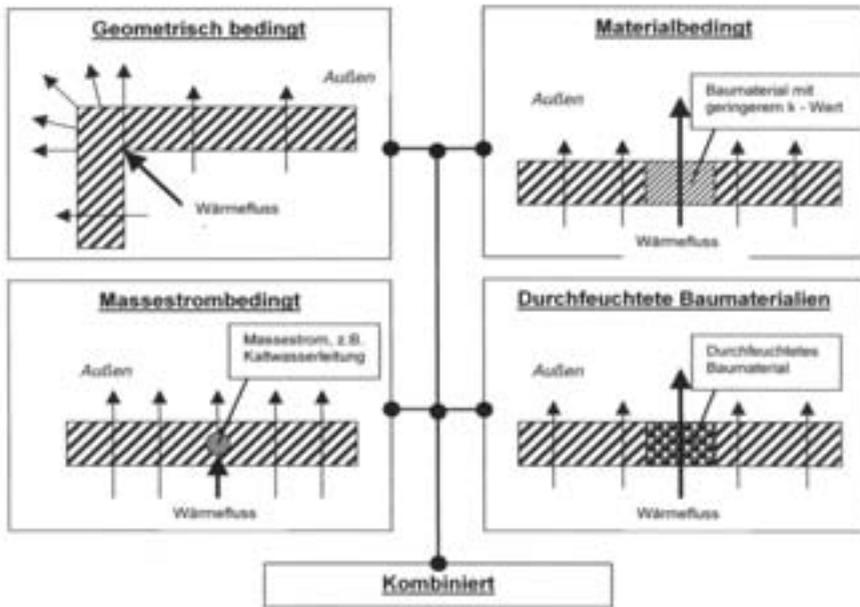


ABB. 15: Schematische Darstellung der wichtigsten Formen von Wärmebrücken. Die dargestellten Wärmeflüsse gelten unter der Annahme, dass außen eine (erheblich) niedrigere Temperatur herrscht als innen, also z.B. im Winter.

All diese Wärmebrücken können natürlich in Kombination zueinander auftreten und ihre gegenseitigen Effekte dadurch verstärken.

Auch abgelenkte Warmluftströmungen, verursacht z.B. durch zu breite Fensterbänke über einem Heizkörper, durch Vorhänge oder Möbel, können zu einer lokal begrenzten erhöhten Auskühlung des Mauerwerks führen, da hier weniger Wärme über die Luft nachgeliefert wird. Diese Effekte sind **umgebungsbedingt**, strenggenommen aber eigentlich keine „Wärmebrücken“.

12.1.2 Richtig Isolieren – Keine „Flickschusterei“

Die schon angesprochenen Einfachverglasungen von Fenstern, welche heutzutage nur noch in Altbauten angetroffen werden können, waren in der Vergangenheit häufig die Bauteile in der Außenwand, an denen der größte Wärmedurchgang stattfand, an denen es folglich auch zu Kondensation kam. Motiviert durch die begrüßenswerten Überlegungen zur Einsparung von Heizenergie (Wärmeschutzverordnung) begann man nun, diese schlecht isolierten Fenster durch wesentlich besser isolierte („Isolierverglasung“) auszutauschen, ansonsten aber auf zusätzliche Wärmedämmung aller anderen Bauteile zu verzichten. Während bisher durch die Kondensation am Fenster der Luft kontinuierlich Feuchtigkeit entzogen wurde, stieg diese nun auf höhere relative Luftfeuchtigkeiten an. Die Raumlufttemperatur wurde nicht erhöht, die Bewohner heizten jetzt eher weniger. Durch das Ansteigen der Luftfeuchtigkeit konnte es nun zu Kondensation an anderen, noch nicht bekannten Wärmebrücken kommen. Diese ist aber häufig als problematischer zu bewerten, denn anders als eine Fensterscheibe stellen jene häufig gute Nährböden für ein Wachstum von Schimmelpilzen dar (z.B. Tapete, Anstriche). Zudem ist die Kondensfeuchtigkeit hier nicht mehr so leicht zu entfernen, wie sie es an einer Fensterscheibe war.

Grundsätzlich gilt es bei der Konzeption einer Gebäudeisolierung zu bedenken, dass die unterschiedlichen Bauteile in ihrem Wärmedämmverhalten aufeinander abgestimmt werden müssen. Unter dem Aspekt des Feuchtigkeitshaushaltes eines Gebäudes ist es vor allem die Differenz zwischen den einzelnen Dämmwerten der unterschiedlichen relevanten Baumaterialien, welche es zu beachten gilt. Eine Verbesserung des Dämmwertes an nur einigen Bauteilen führt zwar zu einer Verringerung des gesamten Wärmeaustausches des Gebäudes mit seiner Umgebung (was unter dem Aspekt der Energieeinsparung zu begrüßen ist), verschärft aber die Diskrepanz zwischen der kältesten und der wärmsten Oberfläche im Innenraumbereich und kann so zu Feuchtigkeitsniederschlägen auf Grund von Kondensation führen, wenn das Lüftungs- und Heizverhalten der Bewohner (s. 13.2) nicht konsequent auf die veränderten Bedingungen angepasst wird.

12.1.3 Problematiken bei Niedrigenergiehäusern

Eines der Kennzeichen u.a. von Niedrigenergiehäusern ist neben ihrer guten Isolierung (verringertes Wärmeabfluss) der Umstand, dass versucht wird, das Einströmen von Kaltluft zu vermeiden. Vor allem Fenster und Türen wurden so konzipiert, dass kein kontinuierlicher Luftaustausch mit der Außenluft mehr stattfand. Dies kann allerdings den Nachteil haben, dass die Luftfeuchtigkeit ansteigt, denn durch das kontinuierliche Einströmen von kalter Luft (niedrige absolute Luftfeuchtigkeit), die im Innenraum durch die Heizung erwärmt wird, sinkt auch die relative Luftfeuchte im Innenraum. Bei älteren Gebäuden im ursprünglichen Zustand sind die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle z.T. so groß, dass selbst bei geschlossenen Fenstern und Türen **Luftwechselraten** von 2 h^{-1} und darüber keine Seltenheit sind. Werden in solchen Gebäuden durch den Einbau neuer Fenster und Türen die Undichtigkeiten der Gebäudehülle zu einem erheblichen Anteil geschlossen, sollte gleichzeitig überprüft werden, ob die gewohnten Lüftungsgewohnheiten noch aus-

reichen, um für einen genügenden Luftaustausch zu sorgen.

12.2 Weitere Mechanismen der Wasseraufnahme

Welche Relevanz die folgenden Mechanismen der Wasseraufnahme durch Baumaterialien für die Entstehung von Schimmelpilzschäden jeweils haben, kann von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Sicherlich wird ein Großteil der Feuchtigkeitsproblematiken durch die Kondensation von Wasserdampf verursacht, jedoch spielen z.B. die „Kapillare Wasseraufnahme“ und die „Wasseraufnahme durch Sicker- oder Hangwasser“ (s.u.) bei der Durchfeuchtung von Baumaterialien erfahrungsgemäß ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Wasseraufnahme durch Dampfdiffusion

Wenn ein kleiner Teil des in der Raumluft enthaltenen Wasserdampfes durch das Mauerwerk hindurchwandern kann, spricht man von **Dampfdiffusion**.

Das Bestreben des Wasserdampfes, die Außenwand zu durchdringen, ist umso stärker, je größer der Unterschied der Wasserdampfkonzentrationen (= absolute Luftfeuchte) auf beiden Seiten des Bauteiles ist. Die Bewegungsrichtung des Wasserdampfes verläuft in der Regel in der kalten Jahreszeit von innen nach außen, also von der feuchteren (weil wärmeren) zur trockeneren (weil kälteren) Seite.

Die unterschiedlichen Baumaterialien weisen verschiedene Dampfdiffusionswiderstände auf. Allgemein sollte bei einem Wandaufbau der Diffusionswiderstände der verwendeten Baumaterialien von innen nach außen abnehmen. Dies ist wichtig, um zu vermeiden, dass eine Kondensation auf dem Weg des Wasserdampfes durch die nach außen hin immer kälter werdenden Baumaterialien im Inneren der Wand stattfindet. Feuchtigkeit im Inneren einer Wand ist aus zweierlei Gründen problematisch: zum einen trocknet hier die Feuchtigkeit wesentlich langsamer wieder ab als an der Oberfläche, zum anderen steigt der Wärmedurchgangskoeffizient eines feuchten Baumaterials im Vergleich zum trockenen Zustand an, d.h. die Wärmedämmfunktion der betroffenen Mauer verringert sich. In Folge dessen kann sich an betroffenen Stellen eine Wärmebrücke bilden, welche wiederum die Bildung von Oberflächenkondensat an der Innenseite zur Folge haben kann (s. **12.1.1**).

Die Wasseraufnahme von Baumaterialien durch Kapillarkondensation

Als Kapillare werden feinste „Röhrchen“ in einem Material bezeichnet. Fast jedes Material besitzt solche Kapillare; unterschiedlich ist nur ihre Anzahl bezogen auf ein bestimmtes Volumen des Materials. Ihr Durchmesser liegt im Bereich weniger Nanometer (ein Nanometer = ein Milliardstel Millimeter). Kapillare stellen in vielerlei Hinsicht ein „physikalisches Ausnahmegebiet“ dar. Dies trifft auch im Bereich der Kondensation von Feuchtigkeit zu. Kondensation findet in solchen Kapillaren nämlich auch bei Temperaturen statt, die weit oberhalb des eigentlichen Taupunktes liegen. Kapillaren z.B. mit einem Durchmesser von 5 nm füllen sich schon ab einer Luftfeuchtigkeit von 75% mit Wasser. Sie ist die Ursache dafür, dass bei Angaben über ausreichend niedrige relative Luftfeuchtigkeiten in

Innenräumen ein gewisser „Sicherheitsabstand“ eingerechnet werden muss.

Die Kapillarkondensation stellt einen wesentlichen Wasseraufnahmemechanismus von Baumaterialien dar. Sie ist für das Verhältnis zwischen relativer Luftfeuchte und der Materialfeuchte verantwortlich. Tabelle 14 zeigt beispielhaft die unterschiedliche Wasserdampfaufnahmekapazität dreier unterschiedlicher Baumaterialien.

Baumaterial	Wasserdampfaufnahme nach ...		
	... 0,5 Std.	1 Std.	2 Std.
Ölfarbe	0,5 g/m ²	1 g/m ²	2 g/m ²
Putz mit Tapete	16 g/m ²	23 g/m ²	32 g/m ²
Teppich aus Naturfaser	20 g/m ²	32 g/m ²	48 g/m ²

TAB. 14: Aufnahme von Wasserdampf in Gramm pro Quadratmeter (g/m²) durch drei unterschiedliche Baumaterialien in Abhängigkeit von der Dauer, während der die Baumaterialien der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind. In diesem Beispiel wird die relative Luftfeuchtigkeit von 40% auf 80% angehoben.

Die Aufnahme von Feuchtigkeit durch poröse Baumaterialien kann einen Puffer darstellen, um zeitlich begrenzte Extreme in der relativen Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Dies kann zu einem Ausbleiben von massiver Kondenswasserbildung beitragen. Bei zu lange anhaltender extrem hoher relativer Luftfeuchtigkeit werden die feuchten porösen Baumaterialien allerdings selbst „zum Problem“.

Die kapillare Wasseraufnahme

Was unter Kapillaren zu verstehen ist, haben wir Ihnen in einem der obenstehenden Unterkapitel bereits erläutert (s. 12.2). Eine weitere Konsequenz aus dem angesprochenen „physikalischen Ausnahmezustand“ ist das Vermögen der Kapillare, Wasser auch entgegen der Schwerkraft aufzusaugen, vergleichbar einem Strohhalm. Allerdings ist die hierfür verantwortliche Kraft nicht wie beim Strohhalm Unterdruck, sondern wechselwirkende Kräfte zwischen Wasser und der Materialoberfläche. Das Wasseraufnahmeverhalten eines Schwammes z.B. wird durch die Vielzahl seiner Kapillare verursacht.

Eine kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen findet immer dann statt, wenn Baumaterialien direkt mit flüssigem Wasser in Kontakt kommen. Dies kann z.B. bei einem Wasserrohrbruch oder einem Waschmaschinenschaden der Fall sein. Abgesehen von solchen „Unfällen“ geschieht dies vornehmlich im Fassadenbereich und im nicht abgedichteten erdberührenden Bereich. In Bezug auf die Zahl und auf die Größe der Kapillare gilt die Regel, dass je größer der durchschnittliche Durchmesser der Kapillare in einem Baustoff ist, desto höher fällt die Sauggeschwindigkeit aus, desto geringer ist jedoch die maximal mögliche Steighöhe (d.h. das Wasser dringt weniger tief in das Material ein).

Die hygroskopische Wasseraufnahme

Vielleicht haben Sie sich auch schon einmal gefragt, warum die kleinen Löcher in ihren

Salzstreuer immer durch Salzkumpen verstopft sind. Die Ursache hierfür ist, dass Kochsalz, wie alle Salze, Feuchtigkeit (egal ob dampfförmig oder flüssig) anzieht, es wirkt „**hygroskopisch**“.

Weisen Baumaterialien einen hohen Salzgehalt auf, so ziehen sie Wasser an, auch den Wasserdampf aus der Luft. Eine salzhaltige Mauer kann so durchfeuchtet werden, ohne dass dabei Kondensation im eigentlichen Sinne stattfindet.

Demzufolge wird man heutzutage nur noch selten Baumaterialien finden, welche per se einen hohen Salzgehalt aufweisen. Ihr Einsatz verbietet sich von selbst, und ein Einbau von ihnen käme Fahrlässigkeit gleich. Es kann in Folge eines Wassereintruchs mit anschließender Trockenlegung aber zu Salzablagerungen auf und in Baumaterialien kommen. Diese Beläge werden auch als „mineralische Ausblühungen“ bezeichnet. Das Salz wurde hierbei, im Wasser gelöst, während des Schadensfalles in das Baumaterial eingeschwemmt und bleibt zurück, wenn das Wasser durch die Trockenlegung nach und nach verdunstet. Diese „Salzkrusten“ können anschließend über ihre hygroskopische Wirkung zu einer Durchfeuchtung der Baumaterialien führen.

Die „mineralischen Ausblühungen“ an ehemals oder noch feuchten Wänden werden im Übrigen von Laien häufig mit dem eigentlichen Schimmelpilzbefall verwechselt.

Die Wasseraufnahme durch Sicker- oder Hangwasser

Im Gegensatz zu der im vorangegangenen Unterkapitel vorgestellten kapillaren Wasseraufnahme bedarf es bei der Wasseraufnahme durch Sicker- oder Hangwasser keines Saugvermögens der Kapillare, vielmehr wird das Wasser durch seinen eigenen hydrostatischen Druck in das Material hineingetrieben. Dies findet z.B. an nicht abgedichteten Außenwänden im erdberührenden Bereich statt, wenn dort (z.B. auf Grund hoher Niederschläge) das Wasser „steht“. Auch durch Risse in der Fassade oder im Bereich des Daches kann Regenwasser „einsickern“.

13 Dem Schimmelpilzbefall vorbeugen

Dem Schimmelpilzbefall vorzubeugen bedeutet in erster Linie, die Durchfeuchtung von Baumaterialien zu verhindern. Die Mechanismen, welche zu einer Durchfeuchtung von Baumaterialien führen können, wurden in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt.

Die Ursachen für ein „Zuviel“ an Feuchtigkeit im Innenraum können zu zwei großen Themenkomplexen gebündelt werden:

- **Bauseitige Mängel**
- **Mangelhaftes Lüftungs- und Heizverhalten der Nutzer**

In fast allen Fällen der Praxis ist ein bestehendes Feuchtigkeitsproblem in einem Innenraum nicht nur auf einen dieser beiden Komplexe zurückzuführen. Sehr gutes Lüftungs- und Heizverhalten kann in einem gewissen Rahmen etwaige Defizite in der baulichen

Konstruktion so weit ausgleichen, dass es zu keinem andauernden Feuchtigkeitsproblem kommt. Ein Innenraum kann aber auch bauphysikalisch so gut gestaltet werden, dass selbst mangelhaftes Lüftungs- und Heizverhalten nicht zu Schäden führt. Bestehen jedoch in beiden Bereichen Defizite, die die jeweilige Toleranz überschreiten, so ist ein Feuchtigkeitsschaden in der Regel nicht mehr zu vermeiden. Häufig ist es im konkreten Einzelfall schwierig, zu bestimmen, wo die hauptsächliche Schuld für den Schadensfall genau liegt.

13.1 Vermeiden von bauseitigen Ursachen für Feuchtigkeitsschäden bzw. Schimmelpilzbefall

Ist ein Haus erst einmal fertiggestellt, so ist eine Behebung bauseitiger Mängel häufig nur noch mit erheblichem Aufwand möglich. Jeder Bauherr darf jedoch heutzutage mit gutem Recht erwarten, dass solche Mängel gar nicht erst auftreten. Verschiedene DIN - Vorschriften definieren die Minimalanforderungen, die für die Vermeidung von Feuchtigkeitsschäden an ein Gebäude gestellt werden müssen. Darüber hinaus darf sogar erwartet werden, dass vor allem bei der Planung und konzeptionellen Gestaltung eines Gebäudes durch Architekten und Bauingenieure nicht nur diese Minimalanforderungen erfüllt werden, sondern vielmehr eine Orientierung an dem jeweils aktuellen Wissens- und Erkenntnisstand erfolgt (MÜLLER, 2002).

Werden nachträglich Sanierungsarbeiten an einem bestehenden Gebäude durchgeführt, möchten wir Ihnen empfehlen, folgende Empfehlungen hierbei zu berücksichtigen:

- Ein Einsatz von Baumaterialien, die längere Zeit einen eher alkalischen pH-Wert beibehalten (z.B. Kalkfarben, Wasserglasfarben, alkalische Silikatanstriche, Putz mit ungelöschtem Kalk) kann sinnvoll sein. Schimmelpilze bevorzugen meist einen leicht sauren pH-Wert.
- Jeder Gebäudehohlraum, welcher Ihrer Kontrolle entzogen ist, birgt die Gefahr, dass ein massiver Schimmelpilzbefall entsteht, da Sie seine Entstehung nicht bemerken und so die Problematik gar nicht erkennen. Klassisches Beispiel für versteckten Schimmelpilzbefall sind abgehängte Decken sowie Hohlräume in der Fußbodenkonstruktion. In solchen Hohlräumen kommt es auf Grund der mangelhaften Luftzirkulation bzw. Beheizbarkeit zudem oft zu Kondenswasserbildung.
- Wir empfehlen Ihnen den Einsatz von Baumaterialien, die „offene“ Oberflächen haben. Sie bilden einen Wasserdampfpuffer, d.h. sie entziehen der Luft Feuchtigkeit, wenn diese sehr viel davon enthält, und geben sie wieder ab, wenn die Raumluft wieder trockener ist. Allzu viele Materialoberflächen aus Glas oder Kunststoff führen zu Extremen in der Raumluftfeuchte, bei denen es zu Kondensation an kalten Oberflächen kommen kann. (s. 12.2)
- Bei im Nachhinein durchgeführte Isolierungen, z.B. an festgestellten Wärmebrücken, existieren gewisse Risiken. Großflächige Isolierungsmaßnahmen sind den nur punktuellen (Gefahr der „Flickschusterei“, s. 12.1.2) häufig vorzuzie-

hen. Auch ist eine Außendämmung zumeist besser als eine Innendämmung. Letztere resultiert häufig nur in einer Verlagerung des Feuchtigkeitsproblems. Zudem sollte bei einer Innendämmung eine intakte Dampfsperre auf der Innenseite installiert werden. Nachträgliche Isolierungsmaßnahmen sollten Sie erst nach dem Einholen sachkundiger Beratung durchführen.

- Das Bremer Umweltinstitut propagiert – unserer Erfahrung nach aus gutem Grund – seit seiner Gründung vor gut 25 Jahren die Verwendung von Baumaterialien, welche aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden (demnach organischen Ursprungs sind) und zudem möglichst keine chemischen Beimengungen enthalten. In extrem und chronisch durch Feuchtigkeit belasteten Innenräumen kann es jedoch sinnvoll sein, anorganische statt organischen Baumaterialien zu verwenden, welche Schimmelpilzen nicht als Nährböden dienen können. Große Vorsicht sollten Sie gegenüber mit pilzwidrigen Mitteln ausgestatteten Baustoffe walten lassen. Wenn Sie auf einen Einsatz so ausgerüsteter Baumaterialien (deren Langzeitriskiken häufig nicht abschätzbar sind) nicht verzichten wollen, sollten Sie sich zumindest vorher umfassend über die Toxizität und das Migrationsverhalten der verwendeten fungiziden Mittel informieren lassen.
- Nach den Renovierungsmaßnahmen: Lassen Sie sämtliche Oberflächen gut austrocknen. Falls Sie den Wandaufbau erneuert haben: Bringen Sie die Tapeten erst an, wenn der Untergrund vollkommen abgetrocknet ist.

13.2 Richtiges Lüften und Heizen

Zunächst sollten Sie sich nochmals folgendes vergegenwärtigen: die relative Luftfeuchtigkeit wird beeinflusst durch die Raumlufttemperatur **und** die absolute Menge an Feuchtigkeit in einem Kubikmeter Raumluft. Beides sind Größen, die durch Sie beeinflussbar sind.

Machen Sie sich bewusst, dass beim Wäschetrocknen, bei einem Dusch- oder Vollbad, beim Kochen oder Spülen erhebliche Mengen Wasserdampf entstehen (vgl. Tabelle 10). Versuchen Sie möglichst, diese Wassermengen direkt nach ihrem Entstehen sofort wieder „herauszulüften“.

Tipps für richtiges Lüften:

- Der Erwerb und die Anwendung eines Hygrometers (Gerät zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit) kann sinnvoll sein. Kontrollieren Sie damit regelmäßig die relative Luftfeuchtigkeit in Ihrer Wohnung. Diese sollte grundsätzlich nicht über 60% liegen.
- Lüften sie viel, dies aber richtig! Meist ist hierbei der Sommer die unproblematische Jahreszeit, denn die Außenlufttemperatur ist meist höher als die Temperatur im Inneren. Demzufolge sind auch die Außenwände wärmer als die Temperatur der Innenraumluft, so dass es zu keiner Unterschreitung des Tauwasserpunktes an Außenwänden kommen kann, wird doch die Luft an diesen Oberflächen

erwärmt und nicht abgekühlt. Anders stellt sich die Situation im Winter dar. Ziel einer Lüftung sollte es dann sein, so schnell wie möglich einen vollständigen Austausch der Raumluft durchzuführen, in der kalten Jahreszeit also die feuchte - weil warme - Innenraumluft durch trockene - weil kalte - Außenluft zu ersetzen. Das Gebot der Schnelligkeit resultiert aus der Überlegung, dass sich die Temperaturen der Materialien im Innenraum bei einer Lüftung so wenig wie möglich verringern sollen (Kondensationsgefahr!). Zu diesem Zweck sollten sie stets „Stoßlüften“, vorhandene Fenster also ganz öffnen, am besten gar „Querlüften“, also mehrere (idealerweise gegenüberliegende) Türen und Fenster gleichzeitig weit öffnen. Das weit verbreitete permanente Lüften über gekippte Fenster führt hingegen nur zu einem sehr langsamen Luftaustausch, gleichzeitig kühlen sich in der kalten Jahreszeit die dem gekippten Fenster naheliegenden Bauteile (z.B. der Fenstersturz) durch die ständig eindringende Kaltluft stark ab (Kondensationsgefahr!). Die folgende Tabelle stellt dar, wie viel Zeit für einen kompletten Raumluftaustausch bei den unterschiedlichen Lüftungsweisen notwendig wird.

Art der Lüftung	Ungefähre Luftwechselrate (h^{-1})	Ungefähr benötigte Zeit ¹⁾ für einen vollständigen Luftwechsel
Geschlossene, ältere Fenster und Türen	< 2	< 30 min
Geschlossene, moderne Fenster und Türen	< 0,3	< 4 Std.
Fenster gekippt, gegenüberliegende Fenster / Türen geschlossen	0,3 bis 4	4 Std. bis 30 min
Stoßlüftung: Fenster ganz offen, gegenüberliegende Fenster / Türen geschlossen	4 bis 20	30 min bis 5 min
Querstromlüftung: (mehrere) Fenster ganz offen, gegenüberliegende Fenster / Türen ganz offen	10 bis 50	1 min bis 10 min

TAB. 15: Angabe der ungefähren Luftwechselrate sowie der Zeit, welche für einen Luftwechsel benötigt wird in Abhängigkeit der gewählten Lüftungsmethode. Die weiten Angabenbereiche werden verursacht durch mehrer Faktoren, welche erheblichen Einfluss auf die Luftwechselrate haben können. Dies sind neben des Raumvolumens und der Größe der Fenster bzw. Türen auch die Temperaturdifferenzen zwischen Innenluft und Außenluft (je höher die Differenz, desto schneller der Luftaustausch) sowie die Außen herrschenden Windverhältnisse.

¹⁾ Luftwechselrate: Verhältnis zwischen dem während einer Stunde Volumen ausgetauschter Luft zum Raumvolumen. Eine Luftwechselrate von 1 bedeutet, dass pro Stunde

einmal das Raumvolumen, eine Luftwechselrate von 2, dass in einer Stunde das doppelte Volumen, eine Luftwechselrate von 0,5, dass nur das halbe Raumluftvolumen innerhalb einer Stunde ausgetauscht wurde.

Tipps für richtiges Heizen

- Kontrollieren Sie regelmäßig die Raumtemperatur. Diese sollte in keinem Raum der Wohnung langfristig 16-18°C unterschreiten. Eine Verringerung der Raumtemperatur führt immer auch zu einer Verringerung der Temperatur der Wandoberflächen, und dies kann zur Bildung von Kondenswasser an diesen Oberflächen führen. Auch die Wände zu Nachbarräumen, die meist nur wenig isoliert sind (sie wurden ja schließlich als Innenraumtrennwände und nicht als Außenwände konzipiert) können so auskühlen, dass es an den Wandoberflächen des Nachbarräumens zur Bildung von Kondenswasser kommt.
- Halten Sie die Türen zwischen mehr und weniger intensiv beheizten Räumen geschlossen. Diese Maßnahme verhindert, dass feuchtwarme Luft aus dem Raum mit der höheren Raumlufttemperatur in den Raum mit der geringeren Raumlufttemperatur eindringt, dort abkühlt und bei einer eventuellen Unterschreitung der Taupunkttemperatur zu Kondensationsfeuchte an kalten Oberflächen führt. Die Türen sollten Sie auch zu Küche oder Bad schließen, wenn dort gerade (z.B. durch Kochen oder Duschen) erhebliche Mengen an Feuchtigkeit in die Luft gelangen. Dadurch verhindern Sie, dass sich die Feuchtigkeit in der gesamten Wohnung verteilt.
- Behindern Sie nicht die Wärmeabgabe von Heizkörpern durch Möbel oder Vorhänge, welche den Heizkörper verdecken. Die Luft sollte vom Heizkörper auf direktem Wege entlang der Wand nach oben steigen können. Zumeist sind die Heizkörper in den Wohnräumen an den Außenwänden angebracht. Dies hat seinen guten Grund: die an der Wand aufsteigende Warmluft, die noch eine vergleichsweise niedrige relative Luftfeuchte aufweist – sie wurde ja gerade eben erst erwärmt und hatte noch keine Gelegenheit, zusätzliche Feuchtigkeit aufzunehmen – sorgt zum einen für eine gleichmäßige Erwärmung der Bauteile an der Außenwand, zum anderen für eine Trocknung dieser Wand.
- Achten Sie darauf, dass die Zirkulation warmer Innenraumluft an den Außenwänden nicht durch dicht herangerückte Möbelstücke wie z.B. Schrankwände und Betten unterbunden wird. In Bereichen der Außenwand, die solchermaßen von der Warmluftzirkulation abgeschirmt sind, findet eine starke Abkühlung statt. Kondenswasserbildung an diesen Stellen kann die Folge sein. Ist es aus Platzgründen unumgänglich, dass Möbel auch an der Außenwand aufgestellt werden müssen, so sollten sie zumindest 5 cm, besser 10 cm von dieser abgerückt werden. Eventuell ist es auch möglich, Lüftungsschlitze z.B. in den Fuß einer Schrankwand zu installieren. So kann auch hinter dem Möbelstück die Luftzirkulation verbessert werden.

Das oben Gesagte bezieht sich in erster Linie auf oberirdische Räume, deren Außenwände an den umgebenden Luftraum grenzen. Für Räume, deren Außenwände ganz (Keller) oder teilweise im Erdreich liegen (Souterrain) gelten einige Besonderheiten:

- **Sonderfall Keller:** die Außenwände des Kellers sind typischerweise fast vollständig von Erdreich umgeben. Dieses ist im Sommer in der Regel kühler, im Winter hingegen wärmer als die Außenluft. Demzufolge sind auch die Außenwände des Kellers im Sommer vergleichsweise kühl (Sie werden sicher nicht auf die Idee kommen, im Sommer Ihren Keller zu heizen), im Winter hingegen relativ warm. Dies resultiert darin, dass hier für das Lüften umgekehrte Verhaltensregeln zu gelten haben wie in den oberirdisch liegenden Räumen: die „kritische Jahreszeit“ ist hier der Sommer, denn an den dann vergleichsweise kalten Wänden kühlt die eingedrungene feuchtwarmluften Außenluft ab und es kann dabei zu einer Unterschreitung des Taupunktes mit anschließender Kondenswasserbildung kommen. Keller sind zudem häufig ohnehin feuchter als oberirdische Räume. Dies hat seinen Grund darin, dass fast immer (auch bei guter Abdichtung) kleinste Mengen Wasser durch das Mauerwerk, das Fundament bzw. die Nahtstellen zwischen und in diesen in das Innere des Kellers gelangen. Gleichzeitig weisen Kellerräume häufig keine oder sehr wenige, kleine Fenster auf. Dadurch sind sowohl aktive als auch passive Lüftung (unbeabsichtigter Luftaustausch durch kleinste Ritzen) unmöglich bzw. stark eingeschränkt.
- **Sonderfall Souterrain-Wohnung:** Was für den Keller in Bezug auf eine unvermeidbare höhere Feuchtigkeitsbelastung gilt, gilt bedingt auch für die Souterrain-Wohnung. Als besonders problematisch erweist sich allerdings der Umstand, dass das Erdreich häufig bis auf halbe Höhe der Außenwände hinaufreicht. Somit sind die Außenwände während des ganzen Jahres besonders von Kondensationsfeuchtigkeit gefährdet: der untere Teil (an das Erdreich angrenzend) im Sommer, der obere Teil (an die Außenluft angrenzend) im Winter.

Die „Lüftungsampel“

Das Bremer Umweltinstitut nimmt regelmäßig auch an interdisziplinären Forschungsprojekten, welche durch unterschiedliche Institutionen gefördert werden, teil. Eines der aktuell laufenden Projekte hat die Konzeptionierung und praktische Erprobung einer sogenannten „Lüftungsampel“ zum Inhalt. Hiermit ist ein Gerät gemeint, welches es dem Bewohner erlaubt, sich jeweils über den aktuellen Zustand der Luftqualität zu informieren. Als Parameter werden von diesem Gerät u.a. auch die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit erhoben und in ihrem zeitlichen Verlauf festgehalten. An Hand dieser Größen kann der Bewohner sein Lüftungsverhalten orientieren, so dass nutzungsbedingte Feuchtigkeitsschäden vermieden werden können. Gleichzeitig könnte z.B. ein Mieter gegenüber seinem Vermieter an Hand der langfristig aufgezeichneten Daten belegen, dass eine ausreichende und sinnvolle Lüftung durch ihn durchgeführt wurde.

Zudem bleibt noch anzumerken, dass richtiges Lüften nicht nur dabei hilft, Feuchtigkeitsschäden und Schimmelpilz zu verhindern, sondern auch sinnvoll ist um die

Anreicherung verschiedener Schadstoffe (Formaldehyd, Lösemittel, VOC usw.) in der Innenraumluft zu minimieren. Diese Schadstoffe können in unterschiedlichen Bau- und Einrichtungsmaterialien enthalten sein und von dort kontinuierlich in die Innenraumluft abgegeben werden. Außerdem können durch den Einsatz einer „Lüftungsampel“ unnötige Lüftungswärmeverluste vermieden und damit ein Beitrag zur Energie- und Kosteneinsparung geleistet werden.

13.3 Andere vorbeugende Maßnahmen

Zwar sind Schimmelpilzsporen im Innenraum ständig gegenwärtig, wenn Ihre Konzentration aber zusätzlich in die Höhe getrieben wird, kommt es auch mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zu einem Befall von Schimmelpilzen. Gleichzeitig stellen natürlich auch diese Sporen ein Risiko gesundheitlicher Beeinträchtigung dar. Versuchen Sie also, zusätzliche Quellen von Sporenbelastungen auszuschalten. Zudem sollten Sie darauf achten, dass Sie Schimmelpilzen keinen Nährboden auf Materialoberflächen zur Verfügung stellen:

- Eine der Hauptquellen für Sporen in der Innenraumluft sind Komposteimer! Verwenden Sie unbedingt einen Komposteimer mit fest verschließbarem Deckel. Hilfreich ist zudem, die Größe dieses Komposteimers bewusst klein zu wählen, so dass ein tägliche Leerung unabdingbar wird.
- Auch in der Blumenerde von Zimmerpflanzen gedeihen viele Schimmelpilze. Je älter diese Blumenerde wird, desto größer ist die Gefahr eines Befalls. Topfen Sie daher Ihre Zimmerpflanzen besser einmal im Jahr um.
- (Feuchter) Staub, der auf Oberflächen haftet, bietet einen guten Nährboden für Schimmelpilzwachstum. Das „gute alte“ Staubwischen, aber auch qualitativ hochwertige Staubsauger mit gutem Rückhaltevermögen auch für Feinstaub können Ihnen dabei helfen, die Anlagerung allzu großer Staubmengen auf Oberflächen aller Art zu verhindern. Staubsauger, welche nach dem Motto verfahren „Vorne rein – hinten raus“ verschlimmern die Situation hingegen eher.
- Halten Sie die Oberflächen von Fliesen und Arbeitsflächen im Bereich von Küche und Bad sauber. In beiden Räumen ist die Luftfeuchtigkeit naturgemäß hoch. Fettschmutz an Küchenfliesen hat schon so manchen Schimmelpilzbefall gefördert. Auch eine stark verschmutzte Küchenabzugshaube bietet Schimmelpilzen gute Lebensbedingungen.
- Wischen Sie z.B. das Wasser auf den Badezimmerfliesen nach einem Duschbad sofort auf. Diese Wasserlachen können dann nicht mehr zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchtigkeit beitragen.

14 Den Schimmelpilzbefall sanieren

14.1 Beratung und Bestandsaufnahme

Es ist sicher nicht notwendig, wegen einer durch Schimmel schwärzlich verfärbten Silikonfuge sofort Dritte damit zu beauftragen, eine fachgerechte Sanierung durchzuführen. Spätestens aber wenn die befallene Fläche größer ist als ca. einen halben Quadratmeter, aber auch wenn Sie bei einem vorliegenden Befall ein ungutes Gefühl haben und erst recht, wenn Sie z.B. Schimmelpilze riechen, aber keine sehen können, sollten Sie nicht mehr in „Eigenregie“ handeln.

Wenn Sie bei einem Schimmelpilzbefall ein ungutes Gefühl haben, oder wenn Sie einen Befall räumlich nicht eingrenzen können bzw. diesen nur (z.B. über den muffigen Geruch) nur errahnen, so sollten Sie sich beraten lassen.

Wenn Sie sich z.B. dafür entschieden haben, sich wegen eines Schimmelpilzproblems bei uns, dem Bremer Umweltinstitut, telefonisch beraten zu lassen, so erhalten Sie in vielen Fällen schon Lösungsvorschläge, die Ihnen bei der Bewältigung Ihres Problems helfen. Gelangen wir allerdings bei dem Gespräch mit Ihnen zu der Überzeugung, dass es sich um einen Schadensfall handelt, der besondere Vorsichtsmaßnahmen erfordert, oder stellt sich heraus, dass der vorliegende Schaden nicht eingegrenzt bzw. überhaupt nicht lokalisiert werden kann, und wird die Sachlage durch gesundheitliche Beeinträchtigungen (Allergien etc.), wie sie für Schimmelpilzbelastungen typisch sind, noch verschärft, so werden wir Ihnen empfehlen, eine „Begehung“ zu beauftragen.

Eine Begehung beinhaltet die Besichtigung der betroffenen Wohnung durch den Fachmann / die Fachfrau vor Ort, wobei eine Befragung der Betroffenen erfolgt. Zum einen sind die Hinweise der Bewohner unverzichtbar, wenn es darum geht, Hinweise oder Anzeichen eines nicht offensichtlichen Schimmelpilzbefalls festzustellen. Zum anderen dienen Fragen nach dem Auftreten von gesundheitlichen Beschwerden, die mit Schimmelpilzbelastungen in Verbindung gebracht werden könnten, ebenfalls der Ermittlung der Belastungssituation sowie der gesundheitlichen Vorsorge.

Zweiter wichtiger Bestandteil dieser ersten Begehung ist die Erhebung (bau-)physikalischer Parameter, die der Klärung der Frage dienen sollen, ob und in welchem Umfang bestehende Feuchtigkeitsprobleme einen Schimmelpilzbefall wahrscheinlich machen.

Folgende Fragen sollten im Rahmen einer Begehung abgeklärt werden:

- Weist der begangene Raum in der Luft und / oder in seinen Baustoffen eine erhöhte Feuchtigkeit auf, die ein Schimmelpilzwachstum wahrscheinlich machen?
- Wenn ja, ist diese erhöhte Feuchtigkeit eher auf ein Fehlverhalten der Nutzer (Lüftung, Heizung) oder auf bauliche Mängel zurückzuführen?
- Ist ein Schimmelpilzbefall sichtbar und eingrenzbar?

- Unabhängig von der Beantwortung der vorangegangenen Frage: Gibt es Hinweise (Feuchtigkeits- und Temperaturwerte, bauliche Konstruktion, Geruch, gesundheitliche Beschwerden) auf (zusätzliche) verdeckte Schimmelpilzquellen?

Nach Auffassung des Bremer Umweltinstitutes sollte sich eine Begehung im Zusammenhang mit Schimmelpilzbelastungen nicht auf schon bestehende Quellen beschränken, sondern auch das Risiko zukünftiger Befallssituationen erfassen. Und dieses ist im großen Maße abhängig von Feuchtigkeitsproblemen.

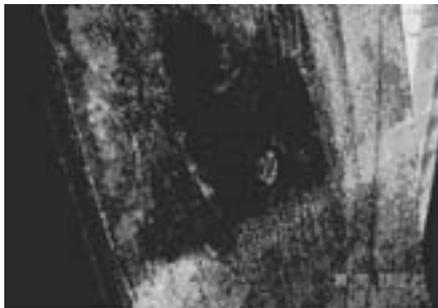


ABB. 16: Beispiel für eine verdeckte Schimmelpilzquelle: Starker Schimmelpilzbefall auf der Rückseite einer Deckenplatte.

Wurde bei der Begehung eine Schimmelpilzquelle gefunden bzw. stellt es sich als wahrscheinlich dar, dass eine verdeckte Schimmelpilzquelle vorliegt, so kommen die bereits in **Teil C** detailliert vorgestellten Nachweisverfahren zum Einsatz. Sie haben dann zwei unterschiedliche Funktionen: zum einen den sichtbaren Schimmelpilzbefall bewerten (hauptsächlich über Material- und Oberflächenkontaktproben), zum anderen den Verdacht auf eine versteckte Quelle von Schimmelpilzbelastungen zu verifizieren (durch Entnahme von Luft-, Material und Staubproben) und, wenn möglich, den Ort des Befalls aufzuspüren. Auch nach dem „SCHIMMELPILZLEITFADEN“ des Umweltbundesamtes ist bei der direkten Beprobung eines sichtbaren Schimmelpilzbefalls über Material- und Oberflächenkontaktproben der Artendifferenzierung eine größere Bedeutung beizumessen als einer Quantifizierung. Wichtig bei der Ausarbeitung einer geeigneten Probenahmestrategie ist, dass keine standardisierten Lösungsansätze zum Einsatz kommen sollten. Was und wie gemessen wird, muss sich immer an der konkreten Einzelsituation, die durch Beratung und Begehung dokumentiert wurde, orientieren.

Die Artbestimmung der gefundenen Schimmelpilze kann dabei helfen, die vorgefundene Belastung zu interpretieren. So sind einige Schimmelpilze eher typisch für ein Vorkommen unter „freiem Himmel“, andere hingegen treten vor allem in Innenräumen mit Feuchtigkeitsproblemen. Das vermehrte Auftreten von Vertretern letzterer Gruppe in einer Probe kann als Hinweis darauf interpretiert werden, dass tatsächlich ein (versteckter) Feuchtigkeitsschaden in dem betroffenen Innenraum existiert. Ein Nachweis hauptsächlich von

Außenluftarten deutet hingegen eher darauf hin, dass es sich bei der vorgefundenen Belastung in erster Linie um aus der Außenluft stammende, in den Innenraum eingetragene Sporen handelt. **Tabelle 16** listet die typischen Außenluftarten (bzw. Gattungen) sowie die sogenannten Indikator-Schimmelpilze auf.

Pilzspezies /-Gattung mit hoher Indikation Feuchtigkeitsschäden im Innenraum	Flugfähigkeit der Sporen
Acremonium spp.	-- / ±
Aspergillus penicillioides	+
Aspergillus restrictus	+
Aspergillus versicolor	+
Chaetomium spp.	-- / ±
Phialophora spp.	-- / ±
Scopulariopsis brevicaulis	±
Scopulariopsis fusca	±
Stachybotrys chartarum	--
Tritirachium (Engyodontium) album	± / +
Trichoderma spp.	±

TAB. 16: Schimmelpilze mit hoher Indikation für Feuchteschäden und die Flugfähigkeit ihrer Sporen

- schlechte Flugeigenschaften der Sporen bzw. geringe Sporenbildung
- ± mittlere Flugeigenschaften bzw. mittlere Sporenbildung
- + gute Flugeigenschaften bzw. massive Sporenbildung

Die Entnahme, die Untersuchung und die Bewertung von Proben in Bezug auf Schimmelpilzbelastungen durch qualifiziertes Personal ist zugegebenermaßen nicht für ein paar Euro durchzuführen. Dennoch möchten wir Ihnen ausdrücklich davon abraten, aus Gründen der Kostenersparnis z.B. auf die von einigen Anbietern offerierten Schnellnachweise im „Do-it-yourself“-Verfahren zurückzugreifen, wenn Ihnen die auf Ihren Fall abgestimmte und genaue Aufklärung Ihres Schimmelpilzverdachts wirklich am Herzen liegt. Sie bezahlen dann zwar weniger, erhalten dafür in den allermeisten Fällen aber auch entweder falsche, ungenaue oder wenig aussagekräftige Ergebnisse.

Eine der größten Gefahren für die Bausubstanz eines Hauses stellt der sogenannte „Hausschwamm“ dar. Dieser befällt in erster Linie feuchtes Holz, welches in der Folge nach und nach seine Tragfähigkeit verliert. Er bildet häufig ein sehr raumgreifendes Mycel aus, dessen Hyphen mehrere Meter lang werden können. Ein Befall, der durch Fruchtkörper sichtbar und auffällig wird, ist so nur sehr schwer einzugrenzen. Ein zu spät erkannter Befall von tragenden Holzkonstruktionen durch den „Hausschwamm“ kann im Extremfall soweit führen, dass das Gebäude nicht mehr zu sanieren ist und in der Folge

abgerissen werden muss. Der Experte / die Expertin vor Ort kann auch einen solchen Befall rechtzeitig erkennen, so dass häufig größerer Schaden abgewendet werden kann.

14.2 Sanierung

Kleinflächiger Schimmelpilzbefall erfordert nicht unbedingt den Experten / die Expertin vor Ort. Vielmehr können Sie ihm – in einem gewissen Rahmen – auch selbst zu Leibe rücken. Anders sieht es aus, wenn die befallene Fläche über einen halben Quadratmeter groß ist, der Schimmelbelag sehr dick ist oder wenn sie eine Schimmelpilzquelle vermuten, sie aber nicht genau lokalisieren können. Auch wenn z.B. tief in der Baukonstruktion liegende Baustoffe (wie z.B. die vergleichsweise häufig betroffenen Dämmmaterialien) oder sehr poröse Baumaterialien von Schimmel befallen sind, empfiehlt es sich, die Arbeiten nicht mehr selbständig in Eigenregie durchzuführen.

Unbedingt sollten Sie auch bei minderen Schadensfällen eine Sanierung anstreben, wenn besonders durch Schimmelpilze gefährdete Personenkreise sich in den betroffenen Räumlichkeiten aufhalten.

Wenn eine Sanierung nicht unmittelbar erfolgen kann, können Sie dennoch versuchen, zumindest das Fortschreiten des Schimmelpilzwachstums zu bremsen. Dies kann zum einen durch Wachstumshemmende bzw. abtötende Mittel („Desinfizierung“) erreicht werden, zum anderen sollte versucht werden, dem Schimmelpilz die Feuchtigkeit zu entziehen.

Zur Desinfizierung betroffenen Flächen ist am besten 70 bis 80%iger bzw. der preisgünstigere Isopropylalkohol geeignet. Die in diesem Zusammenhang vielfach empfohlene Essiglösung ist hingegen weniger gut geeignet. Auf alkalischen Baumaterialien (z.B. Kalk) wird zum einen der Essig rasch neutralisiert, so dass er seine abtötende Wirkung verliert. Gleichzeitig kann der ehemals leicht alkalische Untergrund zu einem leicht sauren pH übergehen, welcher ein Wachstum von Schimmelpilzen sogar noch unterstützt. Schließlich stellt Essig ein organisches Substrat dar, welches nach einer Neutralisation von den Schimmelpilzen als Nährstoff genutzt werden kann. Zwar ist auch Ethylalkohol eine organische Verbindung, auf Grund seiner hohen Flüchtigkeit verbleibt jedoch nur ein geringer Anteil der ursprünglich aufgebracht Menge auf der betroffenen Fläche. Andere chemische Lösungen wie Wasserstoffperoxid oder Ammoniak besitzen zwar sehr gute hemmende Eigenschaften auf Schimmelpilze, sind aber auf Grund etwaiger gesundheitlicher Beeinträchtigungen (Reizung der Atemwege, Verätzungsgefahr, Geruchsbelastung) oder der Gefahr von Verfärbungen auf den Baumaterialien dem Laien nicht zu empfehlen. Abzuraten ist zudem von der Verwendung von kommerziell erhältlichen Fungiziden im Innenraum für den privaten Gebrauch. Auch hier besteht die Gefahr gesundheitlicher Beeinträchtigungen. Bei sämtlichen Desinfizierungsarbeiten sollten stets nur kleine Mengen verarbeitet und während sowie nach der Arbeit für eine gute Lüftung der Räume gesorgt werden. Auch ist es ratsam, Schutzhandschuhe, Schutzbrille und Atemschutz zu tragen. Beim Umgang mit hochkonzentriertem Ethyl- / bzw. Propylalkohol ist dessen leichte Entflammbarkeit zu berücksichtigen (nicht rauchen, kein offenes Feuer).

Richtiges Lüften und gezieltes Heizen (s. **13.2**) kann dazu beitragen, die vom Schimmel-

pilz befallenen Flächen auszutrocknen. Dadurch wird ein weiteres Wachstum unterbunden. Stellen, die von Schimmel bewachsen und von der Luftzirkulation abgeschottet sind (z.B. Tapeten hinter Schränken und Bildern), sollten zum Raum hin geöffnet werden, um eine Austrocknung zu ermöglichen. Dies kann z.B. bedeuten, Schränke zu versetzen oder zumindest abzurücken bzw. Bilder vorübergehend abzuhängen.



ABB. 17: Schimmelpilzbefall auf und unter der Tapete. Deutlich zu sehen der schmale, von Schimmelpilzen befallene Streifen entlang der geometrischen Wärmebrücke zwischen Zimmerdecke und Außenwand.

14.2.1 Sanierung eines kleineren Schimmelpilzbefalls

Auch wenn der Schimmelpilz in den meisten Fällen nur an der Oberfläche des Baustoffes wächst (vor allem bei Tapeten und Silikonfugen), ist das vollständige Entfernen des betroffenen Baumaterials langfristig gesehen erfolversprechender als ein nur oberflächliches „Abkratzen“, bei dem zumeist nur die Fruchtkörper und Sporen des Schimmelpilzes erfasst und zudem in hohem Maße in der Atemluft verteilt werden.

Es ist wichtig, dass Sie sich vergegenwärtigen, dass bei jeglicher Arbeit an von Schimmelpilzen befallenen Materialien viele Sporen und Bruchstücke des Mycels in die Luft gelangen. Sie sollten während dieser Tätigkeit also gut lüften und eine Staubschutzmaske (zum Schutze der Atemwege) sowie eine Schutzbrille (zum Schutz der Augenschleimhäute) tragen. Um zu verhindern, dass Sie über Ihre Hände Bestandteile der Schimmelpilzbelastung verschleppen (z.B. beim Reiben der Augen oder bei Mahlzeiten, die nach der Arbeit eingenommen werden) aber auch um einen Hautkontakt mit Allergenen und Mykotoxinen zu unterbinden, sollten zudem auch Einweg-Untersuchungshandschuhe getragen werden.

Nach dem Lesen dieser Broschüre wissen Sie, dass Sie nur einen kleinen Teil des Schimmelpilzes, nämlich nur die zusammengeballten, gefärbten Fruchtkörper und Sporen an der Oberfläche sehen können. Deswegen ist es wichtig, beim Ausbau der betroffenen Baumaterialien eine großzügig bemessene „Sicherheitszone“ um den sichtbaren Schimmelpilzfleck herum zu entfernen. Als grobe Faustregel kann hier gelten, dass der Radius der zu sanierenden Stellen doppelt so groß sein sollte wie der der von Schimmelpilzen bewachsenen Stelle.

Im LEITFADEN (...) des Umweltbundesamtes (2002) wird bei schwachem Befall vorgeschlagen, die nur oberflächlich befallene Stellen mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter (Filterklasse „Hepa“) abzusaugen und dann zu desinfizieren. Ob dies zu einem langfristigen Sanierungserfolg führen kann ist nach Ansicht des Bremer Umweltinstitutes jedoch nicht sicher, in jedem Fall aber in großem Maße von der Art des Untergrundes abhängig.

Nach einem Ausbau des betroffenen Baumaterials sollte die nun freigelegte Oberfläche vor Beginn des Rückbaus desinfiziert werden. Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten ist eine Entfernung von Feinstaubpartikeln in der Umgebung der sanierten Stellen notwendig. Diese kann durch den Einsatz geeigneter Staubsauger (mit Feinstaubfilter) und durch mehrmaliges feuchtes Wischen erfolgen.

Im Anschluss an die Sanierungsarbeiten sollte großer Wert darauf gelegt werden, die betroffenen Stelle gut trocken zu lassen. Hierfür sind gezieltes Lüftung und Heizen unerlässlich.

Im Folgenden möchten wir Ihnen kurz darstellen, wie einige häufig von Schimmelpilzen befallene Materialien am besten saniert werden können:

- Glatte Oberflächen wie Metall, Keramik und Glas sind durch Reinigung vom Schimmelpilz zu befreien. Die Entfernung kann durch Wasser und normalen Haushaltsreiniger erfolgen.
- Möbelstücke mit geschlossener (lackierter, furnierter und laminiertes) Oberfläche, bei denen der Befall offensichtlich noch nicht in tiefere Bereiche eingedrungen ist, können ebenfalls wie oben dargestellt gereinigt werden. Anschließend sollte eine ausgiebige Trocknung sowie eine Desinfizierung der betroffenen Oberfläche erfolgen.
- Poröse Baumaterialien wie Tapeten, Gipskartonplatten, poröses Mauerwerk und Deckenverschalungen können nicht durch bloßes Abwaschen gereinigt werden. Hier ist in der Regel ein Ausbau zu empfehlen, wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde.
- Aktiv und in der Tiefe befallenes Holz ist häufig nur schwer sanierbar. In einigen Fällen kann ein oberflächliches Abschleifen den Befall erfassen und entfernen. Hierbei werden Sporen und Bestandteile des Mycels als Bioaerosole in die Luft freigesetzt. Eine solche Sanierungsarbeit ist dem Laien auf Grund der gesundheitlichen Gefährdung nicht zu empfehlen.
- Gepolsterte Möbel, bei denen der starke Befall auch in die Tiefe eingedrungen ist, sind in der Regel nicht mehr unter vertretbarem Aufwand sanierbar. Das gleiche gilt für Teppiche und Vorhänge. Hier überwiegen die Sanierungskosten zumeist die Kosten einer Neuanschaffung.

14.2.2 Sanierung eines größeren Schimmelpilzbefalls

Bei einem großflächigeren Befall, oder wenn der Befall tiefer in das betroffene Baumaterial hineinreicht (dies kann in der Regel nur durch den Experten / die Expertin sicher erkannt werden) bzw. wenn die Schimmelpilzquelle nur schwer oder gar nicht zugänglich ist, sollten Sie davon absehen, ein Schadensbehebung selbst durchzuführen. Auch wenn eine vorangegangene Untersuchung ergeben hat, dass als besonders kritisch anzusehende Schimmelpilzarten in dem konkreten Fall eine Rolle spielen, oder wenn besonders gefährdete Personenkreise von einer solchen Sanierungsmaßnahme betroffen sind, sollte der Auftrag einer Sanierung an eine gewerbliche Sanierungsfirma vergeben werden. Hierbei sollten Sie darauf achten, dass die von Ihnen beauftragte Sanierungsfirma mit den einschlägigen zu beachtenden Vorschriften und Empfehlungen vertraut ist, sowie Erfahrung im Umgang mit den bei einer Sanierung auftretenden Gefahren sowie den erforderlichen Schutzmaßnahmen besitzt.

Bewährt hat sich in der Praxis das Hinzuziehen eines von der Sanierungsfirma unabhängigen „Sanierungsfachplaners“, der im Vorfeld eine detaillierte Planung der Arbeitsabläufe erstellt und die dem Schadensfall angemessenen Gerätschaften festlegt.

Wir empfehlen die Festlegung eines Zielwertes vor der Sanierung. Dieser sollte nach Abschluss der Sanierung von einer von der Sanierungsfirma unabhängigen Instanz (wie z.B. dem Bremer Umweltinstitut) überprüft werden. Die Vergütung für die Sanierungsarbeiten erhält die Sanierungsfachfirma dann erst nach dem erfolgreichen Abschluss (Einhalten des zuvor festgelegten Sanierungszielwertes) der Arbeiten – selbstverständlich ohne jene Zusatzkosten, die für eventuell notwendig gewordenen Mehraufwand angefallen sind.

Besondere Aufmerksamkeit sollte bei einer Sanierung stets dem Umstand gelten, dass sich bei der Sanierung auftretende Feinstäube (Partikel des Nährbodens und Bioaerosole) bei nicht getroffenen Abschottungsmaßnahmen in andere Räume des betroffenen Innenraums verteilen können. So sollten die Räume, in denen die Sanierung erfolgt, staubdicht abgeschottet werden. In jedem Fall müssen Gegenstände des täglichen Gebrauchs (Kleidung, Spielzeug) und Lebensmittel zuvor aus dem Sanierungsbereich entfernt werden.

Unerlässlich für jede Sanierung ist die abschließende Feinreinigung jenes abgeschlossenen Bereiches, in dem die Sanierungsarbeiten vorstatten gingen.

Bezüglich der Anforderungen, die an die Arbeit einer kompetenten Sanierungsfirma zu stellen sind, berät Sie das Bremer Umweltinstitut gerne.

Teil E: Schimmelpilze in der Wohnung – wer hat „Schuld“?

Eine besondere Brisanz gewinnt die Problematik von Feuchtigkeits- und Schimmelpilzschäden immer dann, wenn Eigentümer einer Wohnung und Bewohner derselben Wohnung nicht ein und dieselbe Person sind, also in Mietwohnungen. Schnell erwächst aus der (berechtigten) Sorge des Mieters um seine Gesundheit und die seiner Familie bzw. auf Grund des Empfindens eines ästhetischen Mangels der Anspruch, dass dieser Mangel umgehend behoben wird. Meist ist sich der Mieter keinerlei Mitschuld am Entstehen der Schimmelpilzproblematik bewusst, er vermutet Mangel an der Bausubstanz als alleinige Schadensursache und er fordert vom Vermieter, dass dieser für die Behebung des Schadens aufkommt und dass der Mietzins bis zu einer Beseitigung des Mangels verringert wird. Auf der anderen Seite besteht aus Sicht des Vermieters der (berechtigte) Anspruch, dass der Mieter pfleglich mit der Mietsache umzugehen habe, die er ihm ja im hoffentlich mangelfreien Zustand übergeben hat. Auch der Vermieter ist sich keiner Schuld bewusst, vielmehr hat er den Eindruck, dass das Fehlverhalten des Mieters (nicht ausreichendes Lüften und Heizen, Produktion von zu viel Feuchtigkeit im Innenraum) ursächlich für den Schaden verantwortlich zu machen ist.

In der Praxis ist es jedoch nicht selten so, dass die Schuld an einem Schimmelpilzschaden gar nicht eindeutig zu beantworten ist. Oft wird ein bauseitiger Mangel (Verantwortung des Vermieters) durch fehlerhaftes Wohnverhalten (Verantwortung des Mieters) ergänzt (s. **13**). So können die im Rahmen eines angestregten Gerichtsverfahrens beauftragten Gutachter und Gegengutachter auch mit gutem Gewissen zu gegensätzlichen Urteilen kommen, ein „Glaubenskrieg“ entsteht. Aus diesem Grund möchten wir jedem Betroffenen empfehlen, eine gütliche Einigung mit der Gegenseite anzustreben, wenn die Wahrscheinlichkeit einer jeweiligen Teilschuld hoch ist – denn so sparen Sie sich die Kosten eines aufwändigen Prozesses.

Die **außergerichtliche, gütliche Einigung** ist in den allermeisten Fällen einem langwierigen Gerichtsprozess vorzuziehen. Dies entspricht der Feststellung, dass es oft keine objektive Alleinschuld für den Schimmelpilzbefall gibt.

Leider kommt es häufig zu einer Situation, in der ein Mieter den Vermieter auf einen Schimmelpilzbefall aufmerksam macht, der Vermieter jedoch versucht, das Problem „klein zu reden“ und durch die Strategie des berüchtigten Aussitzens zu lösen. Schließlich ist der Vermieter ja auch nicht direkt von den Auswirkungen eines Schimmelpilzbefalls betroffen. Welche Möglichkeiten Sie haben, zu erreichen, dass Ihr Anliegen als Mieter ernstgenommen wird, wollen wir Ihnen im folgenden Kapitel vorstellen.

15 Rechte und Pflichten des Mieters

Grundsätzlich empfiehlt es sich, in rechtlichen Fragen so früh wie möglich Rat einzuholen. Anlaufstellen für eine Beratung (gegen ein kleines Honorar) sind z.B. Verbraucher-Initiativen oder, wenn Sie dort Mitglied sind, auch die Mieter-Schutzbünde. Die in diesem Kapitel ausformulierten Punkte sind demzufolge auch nur unter Vorbehalt auf den Einzelfall anwendbar – eventuell liegt in ihrem Fall eine ganz andere Sachlage vor, die nur durch eine individuelle, ggf. juristische Beratung erfolgsversprechend aufgelöst werden kann.

Sie sind als Mieter dazu verpflichtet, die Wohnung „ausreichend“ zu lüften und zu heizen. Was ausreichend im Einzelfall bedeutet, ist nicht eindeutig definiert. In jedem Fall muss das geforderte Wohnverhalten in einem für den Mieter zumutbaren Rahmen bleiben. Auch über die Zumutbarkeit existieren unterschiedliche rechtliche Auffassungen. Als ungefährer Anhaltspunkt kann gelten, dass dreimaliges Querlüften (zweimal morgens, einmal abends) zumutbar, sechsmaliges Lüften hingegen jedoch nicht zumutbar ist. Bei den Ansprüchen an die Zumutbarkeit der minimal einzuhaltenen Raumtemperaturen existieren noch größere Gegensätze in der Rechtsprechung. So wird z.T. ein Halten der Raumlufttemperatur bei minimal 19°C als nicht zumutbar, ein anderes Mal das Einhalten einer Tagestemperatur von 22°C als nicht zumutbar bewertet.

In einem 4-Personen-Haushalt mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern werden durch die alltäglichen Wohnprozesse bis zu 30 Liter Wasser täglich verdunstet (s. **10**). Erhöht sich die Anzahl der Personen in einem Haushalt, so erhöht sich zwangsläufig auch die insgesamt produzierte Feuchtigkeitsmenge. Welche zusätzlichen Pflichten sich hieraus für den Mieter eventuell ergeben, ist bislang in der Rechtsprechung noch nicht ausreichend behandelt.

Welche neuen Pflichten dem Mieter auferlegt werden dürfen, die notwendig werden auf Grund einer durch den Vermieter durchgeführten baulichen Veränderung, welche Einfluss auf die passive Luftaustauschrate und die Wärmedurchflüsse durch die äußere Gebäudehülle (z.B. der Einbau von neuen, besser isolierten Fenstern) hat, wird in der Rechtsprechung ebenfalls gegensätzlich kommentiert. In jedem Fall muss der Vermieter den Mieter auf die neu definierten Notwendigkeiten ausdrücklich hinweisen (s. **16**).

Liegt ein Feuchtigkeitsmangel vor, der vom Vermieter zu vertreten ist, so ist der Mieter nach § 537 BGB berechtigt, den Mietzins zu mindern. Das Ausmaß der Tauglichkeitsbeeinträchtigung der Mietsache bestimmt das Ausmaß der Mietzinsminderung. Diese Mietminderung liegt in der Regel in einem Bereich zwischen 5 und 50 %, kann aber theoretisch bis zu einer Kürzung des Mietzinses von 100 % gehen (die Mietwohnung ist durch Feuchtigkeitsschäden an den Wänden, die dadurch entstehende hohe Luftfeuchtigkeit und den Gestank zum Wohnen „nicht geeignet“). Der Mieter muss dem Vermieter zunächst eine schriftliche Mängelanzeige machen. Zugleich kann er fordern, dass die aufgetretenen Schäden binnen einer gewissen Frist (z.B. drei Wochen) behoben werden und, falls dies nicht fristgerecht erfolgen sollte, gleichzeitig eine Mietzinsminderung ankündigen.

Wenn der Vermieter trotz schriftlicher Abmahnung durch den Mieter nicht dazu bereit ist, den Schaden zu beheben, kann der Mieter auf Mangelbeseitigung klagen. Er kann dann auch eine fristlose Kündigung aussprechen.

16 Rechte und Pflichten des Vermieters

Als Vermieter haben Sie aus § 536 BGB die Hauptpflicht, die Mietsache in dem zum Vertragszweck geeigneten Zustand zu halten. Insofern müssen Mängel an der Mietsache, die nicht durch den Mieter zu verantworten sind, durch Sie behoben werden.

Es ist sinnvoll, im Mietvertrag die vom Mieter zu erfüllenden Pflichten konkret zu bezeichnen. Sie dürfen hier dem Mieter auch untersagen, eine andere als die vorgesehene Nutzung der Räumlichkeiten vorzunehmen. Auch ein zweckwidriger Gebrauch der Räumlichkeiten (z.B. Wäschetrocknen im Wohnzimmer) kann mietvertraglich ausgeschlossen werden.

Falls der Vermieter in der Mietsache z.B. neue Fenster einbauen ließ, ist er angehalten, den Mieter darauf hinzuweisen, dass dies die Notwendigkeit zur Folge hat, die Lüftungs- und Heizgewohnheiten an die veränderten Gegebenheiten anzupassen.

Eine vom Mieter angedrohte Mietminderung auf Grund eines von diesem festgestellten Feuchtigkeits- bzw. Schimmelpilzschadens können Sie mit dem Hinweis darauf beantworten, der Mieter habe falsch geheizt und gelüftet. So können Sie die angekündigte Mietminderung zurückweisen und vom Mieter fordern, den Schaden selbst zu beheben. Gleichzeitig kann der Vermieter dem Mieter auch androhen, den Mietvertrag fristlos zu kündigen, wenn dieser das vom Vermieter behauptete vertragswidrige Verhalten fortsetzt.

17 Wer trägt die Beweislast?

Behauptet der Mieter, der Mietmangel sei vom Vermieter zu vertreten, der Vermieter hingegen, die Ursache für diesen Mietmangel liege in einer fehlerhaften Nutzung der Mietsache durch den Mieter, so muss spätestens zu dem Zeitpunkt einer Gerichtsverhandlung durch das Urteil von Sachverständigen die tatsächliche Ursache für den Schaden festgestellt werden. Die Arbeit von Sachverständigen bedeutet natürlich einen gewissen finanziellen Aufwand. Wer hat nun die Pflicht, die Ursache des Schadens durch die Arbeit eines Gutachters feststellen zu lassen (und damit auch diesen Gutachter zu bezahlen)?

Auch hier gehen die einschlägigen Gerichtsurteile in ihrer Meinung weit auseinander. Teilweise wird die Beweislast dem Vermieter, teilweise aber auch dem Mieter auferlegt. Neuerdings wird vermehrt die Auffassung einer Beweislastverteilung nach Gefahrenkreisen befürwortet. Die Pflichten sind danach folgendermaßen verteilt:

- Das Vorliegen des Mangels und die Beeinträchtigung der Mietsache zum vertragsgemäßen Gebrauch muss der Mieter beweisen. Es ist generell zu empfehlen, dass dieser Schaden von Dritten begutachtet und festgehalten wird.
- Daraufhin muss der Vermieter beweisen, dass die Schadensursache im Bereich des Mieters gesetzt wurde. Dabei ist der sogenannte „Negativbeweis“ ausreichend, dass nämlich Schadensmöglichkeiten, die im Bereich des Vermieters liegen, ausgeschlossen sind. Dies bedeutet, dass der Vermieter vortragen und beweisen muss, das Mietobjekt sei frei von Baumängeln wie z.B. zu dünne Außenwände,

-
- schadhafte Fassade, mangelhafter Zustand der Heizungen, Fenster und Türen.
- Erfolgt dieser Beweis, so muss sich fortan der Mieter „entlasten“. Er hat Angaben über sein Lüftungs- und Heizverhalten zu machen. Gleichzeitig muss er darlegen, dass sich die Möblierung der Wohnung nicht nachteilig auf die festgestellten Mängel auswirkt (z.B. zu nahes Heranrücken der Schränke an die Außenwand, ungünstig angebrachte Vorhänge u.ä.).

I Wichtige Gattungen typischer Innenraum – Schimmelpilze, deren morphologische Kennzeichen und Vorkommen

Alternaria Die Kolonien sind typischerweise schmutzig grau-grün, die Hyphen sind septiert und die Trägerhyphen der ungeschlechtlichen Fortpflanzungsorgane kurz und unverzweigt. Innerhalb der Gattung *Alternaria* existieren verbreitete Materialzerstörer und Lebensmittelverderber. Häufig anzutreffen sind u.a. *Alternaria alternata* und *A. citri*

Aspergillus Die ungeschlechtlichen Fortpflanzungsorgane sowie die gebildeten Sporen sind typischerweise braun, grün oder schwarz. Diese Gattung zählt zu den Deuteromyceten, vermehrt sich typischerweise also ungeschlechtlich. Werden Hauptfruchtformen ausgebildet, so werden die entsprechenden Arten unterschiedlichen Gattungen der Schlauchpilze, u.a. *Eurotium*, zugerechnet. Die Gattung kann in vier Untergruppen zergliedert werden: *A. glaucus* – Gruppe: Die zugehörigen Arten (z.B. *A. glaucus*, *A. amstelodami*, *A. chevalieri*, *A. repens*) sind auch bei geringer Feuchtigkeit noch wachstums- und vermehrungsfähig. *A. flavus-oryzae* – Gruppe: Vertreter dieser Gruppe (*A. flavus*, *A. parasiticus*) werden seit altersher im Fernen Osten kultiviert und dort wegen ihres Reichtums an abbauenden Enzymen in der Herstellung vieler fermentierter Lebensmittel eingesetzt. *A. fumigatus*: Diese Art wächst und vermehrt sich in einem weiten Temperaturbereich und kommt auch in Innenräumen häufig in Biomüll und Blumenerde vor. *A. niger* – Gruppe: Der Hauptvertreter dieser Gruppe, *A. niger*, gehört zu den häufigsten Lebensmittelverderbern

Cladosporium Die Kolonien sind typischerweise dick, samtig, oliv- bis graugrün. Ihre Unterseite ist häufig auffallend blauschwarz bis grünlich-schwarz schimmernd. Die ungeschlechtlichen Fortpflanzungsorgane sind ebenfalls dunkel gefärbt. *Cladosporium*-Arten gehören in unseren Breiten häufig zu den dominierenden Arten in der Außenluft, sie wachsen natürlicherweise auf abgestorbenem Pflanzenmaterial und vielen anderen organischen (pflanzlichen) Materialien. Wichtige Vertreter sind: *Cladosporium herbarum*, *C. macrocarpum*

Fusarium Mycel oft hellgelb bis rosa gefärbt, Trägerhyphen der Fortpflanzungsorgane meist kurz und häufig unregelmäßig verzweigt. *Fusarium*-Arten wachsen auf vielen Futter- und Lebensmitteln, einige sind Pflanzenparasiten.

Mucor Gehört zu den Jochpilzen. Mycel und Fortpflanzungsorgane meist nur schwach gefärbt. Vertreter der Gattung *Mucor* sind weit verbreitet auf verfaulendem Obst und Gemüse, im Erdreich sowie auf Kot. *M. hiemalis* ist einer der häufigsten das Erdreich bewohnenden Schimmelpilze. Weitere häufig auftretende Vertreter dieser Gattung sind *M. plumbeus*, *M.ucedo* („Köpfchenschimmel“) und *M. racemosus*.

Penicillium Die ungeschlechtlichen Fortpflanzungsorgane enden in dem für die Gattung typischen „Pinsel“. Die Sporen sind in der Masse meist grün gefärbt. *Penicillium* wird in die Gruppe der Deuteromyceten eingeordnet, die Hauptfruchtformen gehören zu den Schlauchpilzen. *Penicillium* weist relativ geringe Ansprüche für Wachstum

und Vermehrung gegenüber der Umgebungstemperatur auf, und ist so vor allem in den gemäßigten Klimazonen sehr weit verbreitet. Häufig sind unter den *Penicillium* – Arten auch Vertreter, welche bei der Fermentation und Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt werden, was sich zum Teil auch in ihren Artnamen widerspiegelt (s.u.). Nach dem Bau des oben angesprochenen „Pinsels“ werden die *Penicillium* – Arten in vier verschiedene „Sektionen“ eingeteilt, wovon die Sektion der „Asymmetrica“ einige der prominentesten Arten beinhaltet, so z.B. *P. brevicompactum*, *P. camembertii*, *P. chrysogenum*, *P. claviforme*, *P. expansum*, *P. roquefortii* u.a.. Viele dieser Arten werden nach LUND und FRISVAD (1994) in der Sammelart *P. aurantiogriseum* zusammengefaßt.

Rhizopus Das Mycel weist in der Regel einen vergleichsweise geringen Verzweigungsgrad auf und erscheint so locker und „flauschig“. Diese Gattung gehört zu den Jochpilzen, weist also unseptierte Hyphen auf. Typisch für dieser Gattung angehörige Arten ist das Ausbilden von wurzelartigen Ausläufern auf festen Nährböden. In Ostasien werden Vertreter dieser Gattung bei der Fermentierung von Sojabohnen eingesetzt (*Rh. microsporus*). In Mitteleuropa häufig vorkommende Arten sind *Rh. stolonifer* und *Rh. oryzae*.

Wallemia Die Kolonien sind häufig braun bis orange. Der einzige bisher bekannte Vertreter dieser Gattung ist *W. sebi*. Dieser Schimmelpilz weist eine hohe Toleranz gegenüber Trockenheit auf und ist so recht häufig auf trockenen Lebensmitteln vorzufinden. Möglicherweise ist *W. sebi* eigentlich ein Ständerpilz, welcher die sonst typischen morphologischen Kennzeichen dieser „höheren“ Pilze verloren hat.

II Einige wichtige Mykotoxine

Aflatoxine:

Aflatoxine (von *Aspergillus flavus*) sind Mykotoxine, welche ihre toxische Wirkung in erster Linie in der Leber entfalten (= **hepatotoxisch**). Sie werden in Kombination mit dem Hepatitis B Virus für die statistische Häufung von Leberkrebsbildung in bestimmten Regionen Afrikas und Chinas in Verbindung gebracht. Es existieren unterschiedliche Gruppen von Aflatoxinen, die jeweils Variationen des chemischen Grundgerüsts darstellen, so z.B. die Aflatoxine B₁, B₂, G₁ und G₂. Diese unterschiedlichen Typen können sich auch in ihrer Toxizität unterscheiden. Der Hauptvertreter ist das Aflatoxin B₁, eine der stärksten chemischen krebserzeugenden Substanzen (= **Kanzerogene**). Die Aflatoxine M₁ und M₂ stellen durch den Fremdstoffwechsel (der Kuh oder des Menschen) gebildete Abkömmlinge von B₁ und B₂ dar und werden nach ihrem Auftreten in Milch benannt. Sie stellen ein gutes Beispiel für die Relevanz von Mykotoxinen in der Nahrungskette dar: wenn Kühe mit Schimmelpilzen befallene Futtermittel fressen, werde die Gifte vom Stoffwechsel der Kuh nur teilweise vollkommen abgebaut, Abkömmlinge dieser Mykotoxine (eben die oben angesprochenen) können z.B. in die Milch gelangen, die dann vom Men-

schen verzehrt wird. **Sterigmatocystein** ist ein Zwischenprodukt in der Bildung der Aflatoxine. Es verfügt über ein vergleichbares toxisches Potential wie die eigentlichen Aflatoxine. Produzenten: Neben *Aspergillus flavus* bildet auch noch *Aspergillus parasiticus* Aflatoxine, ersterer produziert nur die Aflatoxine B₁ und B₂. In unseren Breiten können nur ca. 10 % der gefundenen Stämme Toxine bilden, in den Tropen jedoch bis zu 90 %. Die Toxine werden in einem Temperaturbereich von 9°C bis 42°C gebildet, das Temperaturoptimum liegt jedoch zwischen 22°C und 35°C. Vorkommen: Vor allem in fettreichen pflanzlichen Produkten können teilweise sehr hohe Aflatoxingehalte nachgewiesen werden, so z.B. in Nüssen, Sojabohnen und Feigen. In tropischen Ländern erzeugte Nahrungsmittel sind in Bezug auf eine mögliche Aflatoxin-Belastung insofern als problematisch anzusehen, als Isolate aus tropischen Regionen weitaus häufiger Aflatoxine bilden als es die hiesigen tun (s.o.). Zudem sind *Aspergillus*-Arten eher zu den wärmeliebenden Schimmelpilzen zu rechnen und finden so in diesen Ländern weitaus günstigere Lebensbedingungen. Verzehren Nutztiere mit Aflatoxinen kontaminierte Futtermittel, können diese Mykotoxine auch über tierische Produkte (v.a. Milch, siehe oben) in unsere Nahrungskette übergehen. Aflatoxine werden im Gegensatz zum verwandten Sterigmatocystein schon von der lebenden Pilzzelle in den sie umgebenden Nährboden abgeben, so dass auch ehemals befallene Nahrungsmittel noch mit Vorsicht „zu genießen“ sind. Akute Toxizität: Beim Menschen wird die letale Dosis von Aflatoxin B₁ auf 1-10 mg/kg geschätzt, wobei die Toxizität der Aflatoxine in der Reihenfolge B₁>G₁>B₂>G₂ abnimmt und die besondere Empfindlichkeit von Kindern zu berücksichtigen ist. Eine mittlere tägliche Aufnahme von 2,6 mg über mehrere Wochen hinweg führte in Indien 1974 zum Tode von 106 Personen bei 397 Erkrankten (Hayes et al., 1991). Akute Schädigungen durch Aflatoxine sind vor allem im Bereich der Leber zu erwarten, wobei Nekrosen im Leberparenchym und Proliferation des Gallengangepithels besonders häufig sind. Des weiteren können Blutungen (Hämorrhagien) der Nieren und des Verdauungstraktes sowie Störungen des Nervensystems auftreten. Chronische Toxizität: Die chronische Toxizität der Aflatoxine ist gegenüber der hohen akuten Toxizität nicht zu vernachlässigen, da Aflatoxine ein potentes Cancerogen darstellen. So kommen nach epidemiologischen Studien in Gegenden mit stark aflatoxinbelasteten Nahrungsmitteln überdurchschnittlich viele primäre Leberkarzinome, aber auch Leberzirrhosen vor. Zudem stehen die Aflatoxine in Verdacht, (mit)verantwortlich für das sogenannte „Reye-Syndrom“ zu sein, welche in erster Linie durch Enzephalopathie und fettige Degeneration der Leber gekennzeichnet ist. In Nutz- und Versuchstieren führte die chronische Aufnahme von Aflatoxinen zu verschiedenen immunsuppressiven Effekten, insbesondere auf die zellvermittelte Immunreaktion.

Ochratoxine:

Die Ochratoxine sind ebenfalls eine Gruppe verschiedener eng verwandter Mykotoxine. Am häufigsten und auch am stärksten toxisch ist das sogenannte **Ochratoxin A**. Im Gegensatz zu den Aflatoxinen sind die Ochratoxine sehr viel häufiger auf in gemäßigten Breiten produzierten Lebensmitteln vorzufinden. Auch Ochratoxine können nach Verfütterung verdorbener Futtermittel über tierische Produkte in die menschliche Nahrungskette ein-

treten. So kann in Deutschland Ochratoxin A in etwa der Hälfte aller Humanblutproben nachgewiesen werden. Ochratoxin A wird nach oraler, aber auch nach inhalativer Aufnahme rasch absorbiert und in beträchtlichen Mengen im Blutplasma gefunden. Angereichert wird dieses Mykotoxin dann vor allem in den Nieren, aber auch in der Leber, in den Muskeln und im Fettgewebe. Ochratoxine sind häufig mit anderen Toxinen, sogenannten „**Begleittoxinen**“ vergesellschaftet. Die prominentesten hiervon sind Citrinin, Penicillinsäure und Patulin.

Produzenten: Ochratoxin A wurde erstmals 1965 in *Aspergillus ochraceus* nachgewiesen, allgemein werden Ochratoxine aber von einer ganzen Reihe an *Aspergillus*- und *Penicillium*-Arten gebildet. In Mitteleuropa sind hierbei vor allem letztere von Bedeutung, da sie niedrigere Temperatursprüche an ihre Umwelt haben, als *Aspergillus*-Arten.

Vorkommen: Ochratoxine sind vergleichsweise häufig in landwirtschaftlichen Erzeugnissen aus unserer Klimaregion nachzuweisen, wobei die Toxine im Falle des Getreides erst nach dessen Ernte gebildet werden. Akute Toxizität: Im Tierversuch erwies sich Ochratoxin A als toxisch bis sehr toxisch. Bei Mäusen und Ratten liegt die **LD₅₀** über 10 mg pro Kilogramm Körpergewicht, bei Kaninchen, Hühnern und Schweinen darunter. Als Hauptwirkungsort hat hierbei vor allem die Niere zu gelten, wo Ochratoxin zu einer fortschreitenden Degeneration der Nierentubuli bis hin zu einer interstitiellen Fibrose führen kann. Die sogenannte „Balkan endemic nephropathy“ (BEN), eine im ehemaligen Jugoslawien und in Rumänien auftretende Erkrankung der menschlichen Nieren, ist vermutlich auf Ochratoxin A zurückzuführen. Zumindest konnte ein Zusammenhang zwischen der Belastung der Lebensmittel in den einzelnen Regionen und der Häufigkeit dieser Erkrankung hergestellt werden.

Chronische Toxizität: Auch bei Ochratoxin A sind die chronischen Schädigungen als fast gravierender anzusehen als die akuten toxischen Auswirkungen. Dies ist neben dem relativ häufigen Auftreten dieses Mykotoxins in Lebensmitteln vor allem damit zu begründen, dass Ochratoxin A in Säugetieren eine ausgesprochen hohe Halbwertszeit aufweist, also nur sehr langsam durch den Fremdstoffwechsel ausgeschieden oder abgebaut werden kann. Ochratoxin A gilt als mutagen, kanzerogen (=krebserzeugend) und teratogen. Zudem gibt es Hinweise auf eine immunsuppressive Wirkung (DIRHEIMER & CREPY, 1991, FINK-GREMELS et al., 1995). Die sogenannten Begleittoxine der Ochratoxine sind meist von geringerer akut toxischer Wirkung, können jedoch ebenfalls nierenschädigenden Einfluss haben. Zudem können sie zu synergistischen Effekten bei gleichzeitiger Ochratoxin-Belastung führen, d.h. die beiden Toxine wirken in ihrem Zusammenspiel stärker toxisch, als wenn sie einzeln auftreten. Sehr häufig auf einheimischem Getreide nachzuweisen ist das sogenannte Citrinin. Dieses kann auch von Schimmelpilzen (Arten der Gattungen *Penicillium* und *Aspergillus*) gebildet werden, welche nicht dazu in der Lage sind, Ochratoxine zu produzieren. Da es eine gute keimtötende Wirksamkeit gegenüber Protozoen, Bakterien und Pilzen aufweist, wurde es früher zu den Antibiotika gerechnet, kam aber auf Grund der erheblichen Toxizität nie als solches zum Einsatz.

Fusarientoxine:

Auch bei dieser Gruppe von Mykotoxinen weist der Sammelname „Fusarientoxine“ auf die Gattung hin, deren Vertreter diese Gifte in erster Linie bilden, nämlich die Gattung *Fusarium*. Die als „Fusarientoxine“ bezeichneten Mykotoxine bilden in Bezug

auf ihre chemische Struktur keine einheitliche Gruppe, anders als die schon angesprochenen Aflatoxine, welche alle ein einheitliches molekulares Grundgerüst aufweisen. Prominente Vertreter dieser Gruppe von Mykotoxinen sind die Trichothecene, Fumonisine, das Fusarin C und die Zerealenone.

Trichothecene: Auch das erste 1949 aus dem Pilz *Trichothecium roseum* isolierte Trichothecen war zunächst für eine Verwendung als Antibiotikum vorgesehen. Da alle Giftstoffe aus dieser wichtigen Gruppe an strukturverwandten Mykotoxinen jedoch neben den (erwünschten) antibakteriellen, antiviralen und antifungalen auch ganz allgemeine **zytostatische** (= „Zell-tötende“) Wirkungen aufweisen, wurde von einem Einsatz als Therapeutikum abgesehen. Die „Giftigkeit“ der Trichothecene ist unspezifisch sowohl Organismen als auch Organen und Geweben gegenüber. Dies liegt darin begründet, dass diese Mykotoxine die allgemeine Bildung von neuen Proteinen in den betroffenen Zellen (also die sogenannte Proteinbiosynthese) behindern. Das wahrscheinlich prominenteste aller Trichothecene ist das sogenannte T2-Toxin (s.o.). **Produzenten:** Trichothecene werden in erster Linie von *Fusarium*-Arten, aber auch von Vertretern der Gattungen *Trichoderma*, *Cephalosporium*, *Trichothecium* und *Stachybotrys* gebildet. Die von Arten der Gattung *Stachybotrys* produzierten Trichothecene werden häufig auch als **Satratoxine** (von *Stachybotrys atra*) bezeichnet. **Vorkommen:** Trichothecene werden sehr häufig auf Getreide nachgewiesen. Kaltes, niederschlagsreiches Wetter begünstigt den Befall und die Toxinbildung. Eine Kontamination von Nährböden mit Trichothecenen ist also in Ländern mit feuchtem, gemäßigttem Klima. **Akute Toxizität:** Zwar sind alle Trichothecene giftig, sie unterscheiden sich aber erheblich im Ausmaß ihrer Toxizität. Von den natürlicherweise bei uns vorkommenden Trichothecenen ist das T2-Toxin wohl am giftigsten. Der unspezifische Wirkmechanismus der Trichothecene (Hemmung der Proteinbiosynthese) führt bei Menschen und Tieren zu einer Vielzahl von akuten Symptomen, wie z.B. verringerte Nahrungs- und Wasseraufnahme, Erbrechen und Durchfall, Nekrosen von Haut und Schleimhäuten, Störungen der Bewegungskoordination, Hämaturie, schwere Leukopenie und Degeneration von Nerven- wie Herzmuskelzellen. Im Falle der Trichothecene ist von besonderem Interesse, dass nach einer Untersuchung von MILLER (1990) an Versuchstieren sich die Giftigkeit der aufgenommenen Trichothecene bei der inhalativen Aufnahme um den Faktor 20 bis 50 gegenüber der von injizierten Trichothecenen erhöhte. **Chronische Toxizität:** Die chronische Exposition gegenüber T2-Toxin führt z.B. bei Mäusen zu einer deutlichen Unterdrückung der Immunabwehr, was als **immunsuppressive Wirkung** bezeichnet wird (CORRIER & WAGNER, 1988). Zudem bestehen Hinweise darauf, dass Trichothecenen auch dermatotoxische, neurotoxische, hämorrhagische und teratogene chronische Wirkungen haben können.

Fumonisine: Das erste Fumonisin wurde erst 1988 entdeckt. Fumonisine kommen weltweit mit großer Häufigkeit auf Getreide vor und werden deshalb heute mit zu den wichtigsten Mykotoxinen gezählt. **Produzenten:** Der einzigen bisher bekannten Produzenten von Fumonisinen sind Arten der Schimmelpilzgattung *Fusarium* wie *F. moniliforme*, *F. proliferatum* und einige verwandte Arten. **Vorkommen:** Wie schon erwähnt, treten Fumonisine weltweit vor allem auf Getreide, hier vor allem auch auf Mais, auf. In einigen Gegenden Afrikas und Chinas sind massive Kontaminationen von Mais mit Fumonisinen dokumentiert worden.

Akute Toxizität: Die Giftigkeit der Fumonisine für Menschen und Tiere liegt darin begründet, dass Fumonisine eine hohe Ähnlichkeit zu einigen Bestandteilen der Zellmembran (den sogenannten Sphingosiden und Sphingolipiden) aufweisen. Hierdurch kann es zu einer Hemmung der Membransynthese in den Zellen kommen, was gravierende Auswirkungen auf Zellwachstum und –Differenzierung haben kann. Durch Fumonisine akut geschädigt wird in erster Linie die Niere, aber auch die Leber. Für einige Haus- und Nutztiere (z.B. Pferde und Schweine) sind tödlich verlaufende Erkrankungen als Folge einer Fumonisin-Vergiftung bekannt.Chronische Toxizität: Fumonisine selbst sind als nicht mutagen (=mutationsauslösend) anzusehen. In Folge der durch Fumonisine hervorgerufenen zellulären Deregulation kann es dennoch zu einem erhöhten Krebsrisiko kommen.

Patulin:

Patulin wurde bereits 1943 erstmalig beschrieben. Patulin ist ein sehr effektives Breitbandantibiotikum, welches jedoch auf Grund seiner hohen Toxizität niemals medizinisch eingesetzt wurde. Patulin weist zwei Eigenschaften auf, welche in den Verarbeitungsprozessen der Lebensmittelindustrie zu gravierenden Problemen führen können: zum einen wird es durch die Produzenten in hohem Ausmaß aktiv in den Nährboden abgegeben, wo es sich sehr gut ausbreiten kann, zum anderen weist es eine hohe Stabilität sowohl gegenüber Hitze als auch gegenüber niedrigen („saurer“) pH-Werten (<6,5) auf. Deswegen kann es durch die üblichen Aufbereitungsverfahren häufig nicht aus befallenen Lebensmitteln entfernt werden.

Produzenten: Patulin wird von einigen Arten der Gattungen *Aspergillus* (*A. terreus*, *A. clavatus*, *A. giganteus*) und *Penicillium* (*P. expansum*, *P. patulum*, *P. roquefortii*), sowie von einigen anderen Schimmelpilzarten (*Byssosclamyces fulva*, *B. nivea*, *Paecilomyces varioti*) gebildet.

Vorkommen: Einer der wichtigsten Patulin-Bildner, *Penicillium expansum*, ist ein häufiger Lagerschädling auf Obst und Gemüse. Dadurch ist Patulin häufig in Obstsaften nachweisbar, wo es auf Grund seiner hohen Stabilität auch durch die gängigen Aufbereitungsschritte der Lebensmittel nicht zerstört wird. Patulin in Säften oder auch Marmeladen ist immer ein Indiz dafür, dass verschimmelte Rohprodukte verarbeitet wurden und deswegen auch weitere Mykotoxine in diesen Lebensmitteln vorhanden sein können.

Akute Toxizität: Patulin ist ein breit wirksames Zellgift, welches in die Atmungskette der Zellen eingreift. Patulin kann bei Hautkontakt zu Irritationen führen, bei Verzehr kann es Übelkeit, Erbrechen und Durchfälle auslösen. In Versuchstieren konnten nach Verfütterung von Patulin Ödeme und Blutungen in Lunge und Hirn sowie Kapillarschäden in Leber, Milz und Nieren nachgewiesen werden.

Chronische Toxizität: Bisher wurde für Patulin keine krebserzeugende Wirkung nachgewiesen. Jedoch wurde festgestellt, dass es die Immunreaktion negativ beeinflussen kann (PESTKA & BONDY, 1994).

Weitere Mykotoxine:

Einige weitere Mykotoxine erwiesen sich im Tierversuch als **neurotoxisch**, also als schädigend für die Funktion des Nervensystems. Drei prominente Vertreter dieser Giftstoffgruppe sind das Citreoviridin, die Cyclopiazonsäure und die sogenannten tremorgenen (=Schüttelkrämpfe auslösenden) Toxine mit ihrem Hauptvertreter Penitrem A.

Citreoviridin wird von *Penicillium citriviride* und einigen anderen Schimmelpilzen gebildet. Es entsteht auch bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen bei (zu) feuchter Lagerung von verschiedenen Getreidearten und gelegentlich auch in Fleischprodukten. Citreoviridin greift in die Energieversorgung der Zellen ein. Da Muskel- wie Nervenzellen einen vergleichsweise hohen Energiebedarf haben, sind diese zumeist als erstes betroffen. Die akute letale Wirkung dieses Pilzgiftes besteht in der Lähmung des gesamten Nervensystems und dem darauffolgenden Tod durch Atemlähmung. Bei chronischer Einwirkung kann auch dieses Mykotoxin Niere und Leber schädigen.

Cyclopiazonsäure wird von *Penicillium cyclopium* und in geringerem Maße auch von *P. caseicola* und *Aspergillus oryzae* gebildet. Letztere sind Schimmelpilze, welche traditionell häufig in der Herstellung von Käse eingesetzt werden (z.B. von Camembert). Trotzdem können Sie auch weiterhin diese Käsesorten mit ruhigem Gewissen genießen, zeigte sich doch, dass die genannten Schimmelpilze auf einem solchen Nährboden nur verschwindend geringe Mengen solcher Giftstoffe bilden. Dies ist ein Beispiel dafür, dass das reine Vermögen, Mykotoxine bilden zu können, nicht automatisch bedeutet, dass dieses auch tatsächlich gebildet wird. Die Produktion ist in starkem Maße von den herrschenden äußeren Bedingungen abhängig. Cyclopiazonsäure wirkt in hohen Dosen ebenfalls neurotoxisch und führt zudem zu Leberschäden sowie zu degenerativen Veränderungen von Niere und Milz.

Tremorgene Mykotoxine wie das **Penitrem A** wird von einer Reihe von *Penicillium*-Arten in unserem Klimabereich häufig auf feucht gelagerten Getreidesorten gebildet. Penitrem A ist das stärkste der tremorgenen Mykotoxine und löst bei Versuchs- wie bei landwirtschaftlichen Nutztieren Zittern und in höheren Dosen Krämpfe aus. Der sogenannte **Ergotismus** stellt die vermutlich am längsten bekannte Mykotoxikose dar. Er wird hervorgerufen durch die sogenannten Mutterkornalkaloide, also durch Giftstoffe, die u.a. durch das sogenannte Mutterkorn (*Claviceps purpurea*) gebildet werden. Beim Mutterkorn handelt es sich um einen parasitischen Getreidepilz, dessen Sklerotien mit bloßem Auge als schwarzes Körnchen mit Durchmesser von bis zu 3 mm erkennbar sind.

Glossar

- Actinomyceten**.....Actinomyceten sind **Bakterien**, welche in Erscheinungsform, Stoffwechsel und Lebensweise den Schimmelpilzen ähneln. Insbesondere bilden auch sie häufig eine Reihe an Toxinen, mVOCs und Sporen. Eine große Gattung der Actinomyceten sind die sogenannten Streptomyceten. Sie bilden eine Reihe an potenten Antibiotika.
- aerob**.....Das Adjektiv aerob bezieht sich darauf, ob eine Zelle für die Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels auf das Vorhandensein von freiem Luftsauerstoff angewiesen ist.
- Aflatoxine**.....Eines der bekanntesten Mykotoxine. Seinen Namen erhielt es von dem Schimmelpilz *Aspergillus flavus*. Aflatoxine und ihre Abbauprodukte sind kanzerogen.
- Akkumulation**.....(lat., „Anhäufung“) Kann auch mit den Begriffen „Ansammlung“ und „Speicherung“ umschrieben werden.
- akut**.....(lat., „scharf“, „spitz“) Mit akut werden Prozesse bezeichnet, die unmittelbar ihre Auswirkungen entfalten.
- amöboid**.....„sich wie eine Amöbe fortbewegend“, „einer Amöbe ähnelnd“. Amöben sind vergleichsweise große, eukaryontische Einzeller, die über eine extrem flexible, keine starren Elemente enthaltene Zellhülle verfügen und sich durch den Fluss ihres Zellplasmas fortbewegen.
- Anabolismus**.....Jener Teil des Stoffwechsels einer jeden Zelle, der für den Aufbau und Umbau der Biomasse (das eigentliche Wachstum) verantwortlich ist. Das Pendant zu Anabolismus ist der **Katabolismus**.
- anaerob**.....Gegenteil zu **aerob**; es bezeichnet den Zustand

einer Zelle, die ohne das Vorhandensein von freiem Luftsauerstoff ihren Stoffwechsel betreibt.

Antibiotikum.....Biologischer Wirkstoff aus Stoffwechselprodukten von Kleinstlebewesen, der andere Mikroorganismen in ihrem Wachstum hemmt oder diese abtötet. Penicillin war das erste klinisch in großem Stil eingesetzte Antibiotikum und wurde das erste Mal aus *Penicillium notatum* isoliert.

Antigen Bestimmte molekulare Struktur auf der Oberfläche eines Partikels, welches von den Zellen des Immunsystems erkannt werden kann, wenn diese mit dem Antigen konfrontiert werden.

Antikörper Auch **Immunglobuline** genannt. Meistens werden mit Antikörpern jene Makromoleküle des Immunsystems bezeichnet, die mit je einer von zwei freien Bindungsstellen an Antigene ankopeln können. Sie führen in der Immunreaktion zu einem Verklumpen jener Partikel, welche die Träger der Antigene sind. Antikörper sind jedoch auch häufig auf der Oberfläche von vielen der weißen Blutkörperchen vorzufinden und spielen eine wesentliche Rolle bei der Reaktionskaskade der Immunantwort.

Atopie Im Zusammenhang mit allergischen Erkrankungen die genetisch kodierte, vererbare Veranlagung für allergische Erkrankungen.

Atopiker..... Person, die eine **Atopie** aufweist.

Bioaerosol..... Partikel biologischen Ursprungs, die so klein sind, dass sie sich lange schwebend in der Luft halten können und von dort bis tief in die Atemorgane gelangen können. Bioaerosole können aus den unterschiedlichsten Partikeln bestehen, z.B. Schimmelpilzsporen, Pflanzenpollen, Abrieb von pflanzlichem Material etc.

-
- Cellulose**.....Chemisch: Glucosepolymer in -glykosidischer Verknüpfung in 1,4-Stellung. Die Cellulose ist der Hauptbestandteil aller pflanzlichen Zellwände.
- Chitin**Chemisch: Polymer des *N*-Acetylglucosamins. Die Verknüpfung erfolgt wie bei der **Cellulose** -glykosidisch in 1,4-Stellung. Chitin bildet das Stützskelett der Zellen u.a. der Arthropoden, zu denen auch die Insekten zählen. Bei vielen Pilzen bildet Chitin den Hauptbestandteil der Zellwand.
- chronisch**(lat. „zeitlich (lang)“). Bei Gifteinwirkungen werden **akute** Vergiftungen, die unmittelbar nach Einnahme einer Dosis auftreten, von den chronischen unterschieden, welche sich häufig erst nach längerer Zeit und der Aufnahme vieler kleiner Einzeldosen ausbilden.
- Dermatophyten**(lat. „Haut-Pflanzen“). Medizinischer Begriff für Mikroorganismen, insbesondere Schimmelpilze, welche auf der menschlichen Haut wachsen bzw. dort zu Krankheitssymptomen führen können.
- Deuteromyceten**Anderer Begriff für „Fungi Imperfecti“; bezeichnet jene Schimmelpilze, die über keine sexuelle Fortpflanzung verfügen bzw. bei denen diese noch nicht nachgewiesen wurde. Die Deuteromyceten machen innerhalb der Schimmelpilze eine große Gruppe aus.
- dimorph**(lat. „zwei-förmig“)
- endogen**(gr. Innen, im Hause geboren): innen entstehend, nicht von außen verursacht
- Epitop**Molekulare Struktur am Antigen, an der ein **Antikörper** koppelt.
- Eukaryoten**.....Die Welt aller Lebewesen kann grundlegend unterteilt werden in zwei Grundformen der Zellorganisation: in jene der Prokaryoten (= Bakterien) und in jene der Eukaryoten (alle „übrigen“)

- einzelligen und mehrzelligen Organismen, also sowohl Schimmelpilze als auch Menschen).
- Expositionshöhe**.....Stärke der Belastung, der eine Person ausgesetzt ist.
- extramural** = „Außerhalb der Mauern“; nicht im Innenraum, sondern „unter freiem Himmel“.
- fakultativ**.....Freigestellt, wahlfrei, Gegensatz zu **obligatorisch**
- Fermentation**.....Chemische Umwandlung von Stoffen durch Mikroorganismen bzw. durch die von diesen gebildeten Enzyme.
- Fungi Imperfecti**.....Siehe **Deuteromyceten**
- Gameten** = Geschlechtszellen. Bei Menschen sind dies z.B. Eizellen und Spermien
- Generative Phase**Bei Mikroorganismen jener Lebensabschnitt, in dem die Geschlechtszellen gebildet werden und in der die Keimzellenverschmelzung stattfindet.
- Hauptfruchtformen**Morphologisches Erscheinungsbild eines Schimmelpilzes, der geschlechtliche Fortpflanzungsorgane ausbildet.
- Hautmykosen**Pilzkrankungen auf/in der Haut
- Hefen**.....Werden den Schlauchpilzen zugeordnet, obwohl sie keine Mycel ausbilden. Diese Mikroorganismen zeigen sexuelle Fortpflanzung, bilden Sporen und sind häufig dazu in der Lage, unter aearoben Bedingungen zu wachsen. Ihre Feuchtigkeitsansprüche sind in der Regel höher als die der Schimmelpilze, Hefen können auch in Flüssigkeiten gedeihen. Bekannt sind die Hefen auch wegen ihrer Eigenschaft, Zucker in Alkohole vergären zu können, eine Eigenschaft die in der Herstellung von alkoholischen Getränken ausgenutzt wird.

hepatotoxisch	„Giftig für die Leber“
hygroskopisch	„Wasseranziehend“; bezeichnet die Eigenschaft eines Stoffes (z.B. Salze), Wasserdampf aus der Luft in flüssiger Form zu binden.
Hyphen	Zellschlauch, der von Schimmelpilzen ausgebildet wird. Hyphen sind durch Querwände untergliedert oder durchgehend. Die Hyphen einer Schimmelpilzkolonie werden auch als Mycel bezeichnet.
immunsuppressiv	= „Die körpereigene Immunabwehr unterdrückend“
Inhalation	Aufnahme über die Atemwege
Inkorporation	Aufnahme in den Körper
intramural	(lat. „innerhalb der Mauern“): im Innenraum, Gegensatz zu extramural .
Kanzerogene	Substanzen, die die Entstehung von Tumoren auslösen oder fördern.
Katabolismus	Jener Teil des Stoffwechsels einer jeden Zelle, welcher für die Energieversorgung der Zelle verantwortlich ist. Das Pendant zu Katabolismus ist der Anabolismus .
Kolonie	Zusammenhängender Zellhaufen von Mikroorganismen, die alle aus der selben Ursprungszelle hervorgegangen sind. Alle Zellen einer Kolonie sind genetisch gleich, sind Klone voneinander.
Kolonie-bildende Einheiten (KBE)	Jener Teil der Sporen, der keimfähig ist und unter den herrschenden Bedingungen auch tatsächlich auskeimt.
Konidiosporen	Auch „Konidien“; bestimmte Form der nicht sexuell gebildeten Sporen, z.B. von <i>Aspergillus</i> spp. und <i>Penicillium</i> spp..

lag-Phase	Verzögerungsphase zu Beginn einer mikrobiellen Zellvermehrung selbst bei optimalen äußeren Bedingungen.
LD	„Lethal Dose“, tödliche Dosis. LD ₅₀ steht für jene Toxinkonzentration, bei der in 50 % der untersuchten Fälle der Tod eintritt.
Lignin	Polymer mit sehr komplexer Struktur, z.T. bestehend aus aromatischen Aminosäuren. Nach Zellulose ist Lignin der zweithäufigste Bestandteil der pflanzlichen Zellen.
Luftaustauschrate	Gibt das Verhältnis an zwischen dem Volumen an ausgetauschter Luft und dem gesamten Raumluftvolumen, bezogen auf eine Stunde.
Meridianwert	Mittelwert
mesophil	bei „gemäßigten“ Temperaturen wachsen
Metabolismus	Stoffwechsel
Mikroorganismen	Mikroskopisch kleine, einzellige Organismen
morphologisch	Die äußerliche Gestalt betreffend
mVOC	= „Microbial Volatile Compounds“, durch Mikroorganismen gebildete, leicht flüchtige Verbindungen.
Mycel	Die Gesamtheit der Hyphen einer Schimmelpilzkolonie, welche meist stark ineinander verflochten sind.
Mykotoxikose	Vergiftung durch Schimmelpilztoxine
Mykotoxine	Giftstoffe die von Schimmelpilzen gebildet werden
Mykosen	Infektionen durch Schimmelpilze
Nebenfruchtformen	Morphologisches Erscheinungsbild eines Schim-

	melpilzes, der ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane ausbildet im Gegensatz zu Hauptfruchtformen .
Nekrosen	Bereiche abgestorbenen oder absterbenden Gewebes
neurotoxisch	= „Giftig für die Nerven“
Oberflächenmycel	Jener Teil des Mycels, der sich oberhalb des Nährbodens befindet.
obligat	= Verpflichtend, unbedingt. Gegensatz zu fakultativ
Ökologie	Lehre, welche die Gesetzmäßigkeiten des Zusammenlebens der Organismen beschreibt.
Parameter	(Physikalische) Größe, Einflussfaktor
parasitär	Schmarotzend
pathogen	Krankmachend
Pathogenität	Das krankmachende Potential eines Keims
pH-Wert	Definition: „Der negative Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration einer wässrigen Lösung“. Der pH-Bereich reicht von 1-14. Der pH-Wert gibt an, wie sauer oder wie alkalisch eine wässrige Lösung ist. Ein niedriger pH-Wert (<7) bedeutet sauer, ein pH-Wert von 7 neutral, ein hoher pH-Wert (>7) bedeutet alkalisch.
physiologisch	Den Stoffwechsel eines Organismus' betreffend
pigmentiert	= „Pigmente enthaltend“. Pigmente sind stark lichtabsorbierende Partikel
Prokaryoten	Reich der Bakterien, siehe auch Eukaryoten
Saprobionten	= Verrottungsorganismen. Mikroorganismen, die sich von absterbendem oder abgestorbenem

organischen Material ernähren.

- Schlauchpilze**auch Ascomyceten genannt. Der Begriff Schlauchpilz bezieht sich auf die Gestalt der sexuellen Fortpflanzungsorgane
- Sklerotien**Dickwandige Strukturen, welche von Hyphen ausgebildet werden und auch ungünstige Umweltbedingungen wie z.B. extreme Trockenheit lange überdauern können. Spielen bei einigen Schimmelpilzen eine nicht unerhebliche Rolle bei der nicht-sexuellen Verbreitung.
- Sporangiosporen**.....Bestimmte Form der nicht sexuell gebildeten Sporen, andere Entstehungsweise als bei den **Konidiosporen**.
- Sporulation**.....(Aktive) Freisetzung von Sporen durch die Fruchtkörper des Schimmelpilzes
- Substrat**.....Nährboden
- Substratmycel**.....Jener Teil des Mycels, welcher sich innerhalb des Substrats befindet.
- Taupunkttemperatur**.....Jene Temperatur, bei deren Unterschreitung sich Kondenswasser bildet. Die Taupunkttemperatur ist abhängig von der Luftfeuchtigkeit.
- teratogen**.....schädigende Wirkung auf die Entwicklung des Embryos
- ubiquitär**.....überall (weltweit) verbreitet
- UV-Strahlung**.....Kurzwellige, sehr energiereiche Strahlung aus dem Spektrum des Sonnenlichts. „UV“ steht für „Ultraviolett“. UV-Strahlung kann in der DNA zu Schädigungen führen und so auch Tumore auslösen. Für Mikroorganismen, zumal für solche, die sich in der Luft befinden, stellt die UV-Strahlung eine sehr gefährliche Umweltgröße dar.
- Vegetative Phase**.....Bei Mikroorganismen jener Lebensabschnitt,

in dem der Hauptteil des Wachstums der Kolonie stattfindet. Während der vegetativen Phase können auch ungeschlechtliche Fortpflanzungsorgane gebildet werden. Die vegetative Phase bildet zusammen mit der **generativen Phase** den Generationszyklus eines Mikroorganismus'.

VOCs..... = „Volatile Organic Compounds“ (flüchtige organische Verbindungen).

xerophil..... trockenheitsliebend

zytostatisch..... zelltötend

Literaturverzeichnis

- ARNEBURG, 2002: Juristische Wertung der Schimmelpilzbildung. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 6. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene
- BAUDISCH et al., 2001: Erste Ergebnisse eines modifizierten Hausstaubmehrsverfahrens zur quantitativen und qualitativen Bewertung von Schimmelpilzen. *Umweltmed. Forsch. Prax.*, 6(5):265-274..
- BEAUMONT et al., 1985: Volumetric aerobiological survey of conidial fungi in the North-East Netherlands. II. Comparison of aerobiological data and skin tests with mould extracts in an asthmatic population. *Allergy* 40:181-186.
- Becker & Fegeler 1996: Grundlagen der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) und ihre Einsatzmöglichkeiten in der medizinischen Mykologie. *Pilzdialog* 4: 65-66.
- BECKER & GROß, 1974: Über die Widerstandsfähigkeit makromolekularer Werkstoffe gegen mikrobiellen Angriff (ein Übersichtsbericht). *Mater. Org.* 9: 81-131
- BITTIGHOFER et al., 1999: Belastung und Beanspruchung von Wertstoffsortierern und Deponiearbeitern. Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- CLARK et al., 1984: Airborne bacteria, endotoxin and fungi in dust in poultry and swine confinement buildings. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.* 44: 537-541.
- COOMBS & GELL, 1975: Classification of allergic reactions responsible for clinical hypersensitivity and disease. In: Gell et. al. (Hrsg) „Clinical aspects of immunology“, Blackwell Sc. Publ., Oxford, 761-782.
- CORRIER & WAGNER, 1988: Comparison of the effect of T-2 Toxin with that of dexamethason or cyclophosphamide on resistance to babesia microti infection in mice. *Am. J. Vet. Res.* 49: 2000-2003.
- DAVIS, 2001: Molds, Toxic Moulds and Indoor Air Quality. California Research Bureau, California State Library, CRB Note., 8, (1): 1-17.
- DELITSCH, 1943: Systematik der Schimmelpilze. In: Lemke (Hrsg.) „Ergebnisse der theoretischen und angewandten Mikrobiologie, Bd. I Neumann, Neudamm
- DIEHL & HOFMANN, 1996: Literaturstudie zu Hygieneproblemen von Kompostierungsanlagen unter Berücksichtigung der möglichen Gesundheitsgefahren in der Nähe lebender Einwohner. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes, Berlin, 1-99.
- DIRHEIMER & CREPY, 1991: Mechanisms of action of ochratoxin A. IARC Scientific Publications 115: 171-186.
- DOUWES et al., 1997: Work related acute and (sub-)chronic airways inflammation assessed by nasal lavage in compost workers. *Ann. Agric. Environ. Med.*, 4: 149-151
- EDUARD et al., 1993: Serum IgG antibodies to mold spores in two Norwegian sawmill populations: relationship to respiratory and other work-related symptoms. *Am. J. Ind. Med.* 24: 207-222.
- FIEDLER & SCHUETZ, 2001: Einfluss der Wachstumsbedingungen (klimatische Faktoren, Materialien) und des Alters der Schimmelpilzkulturen auf die Produktion von organischen Stoffwechselprodukten (mVOC). In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene

- FINK-GREMMELS et al., 1995: Toxicity and Metabolism of Ochratoxin A. *Nat. Tox.* 3: 214-220.
- FLANNIGAN et al. 1991: Allergenic and toxigenic micro-organisms in houses. *J. Appl. Bacteriol.* 70 (Suppl.): 61-73.
- FRITSCHKE, 1990: Mikrobiologie. Gustav-Fischer-Verlag, Jena
- GAREIS et al., 1999: In: Johanning (Hrsg.), „Bioaerosols, Fungi and Mycotoxins: Health Effects, Assessment, Prevention and Control. Eastern New York Occupational and Environmental Health Center, Albany, pp 202-213.
- GRANT et al. ,1989: The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwelling. *Int Biodeter.* 25: 259-284
- GRAVESEN et al., 2000: Microfungal contamination in water damaged buildings – A neglected health problem. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 4. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene
- GRÜNER et al., 1998: Gesundheitliche Belastung, Beanspruchung und Beschwerden bei Wertstoffsortierern und Deponiebeschäftigten durch Mikroorganismen. Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin e.V., 38. Jahrestagung in Wiesbaden, 213-217.
- HELBLING et al. 1994: Aktuelles zur Pilzsporen-Allergie. *Schweiz. Med. Wochenschr.* 124,885-892.
- HERR et al. 1999: Wirkung von mikrobiellen Aerosolen auf den Menschen. Statuspapier der Arbeitsgruppe KRdL 3/7/05, Eikmann & Hofmann (Hrsg.): „Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und –verwertung“, Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 104: 403-481.
- INDOOR AIR QUALITY & Its Impact On Men, Report No. 12, 1993: Biological Particles in Indoor Environments, pp 22-34
- JOVANOVIC, 1997: Neuer Schwerpunkt in der Umwelthygiene: Biogene Innenraumbelastungen. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, Jahresbericht, pp. 61, Stuttgart
- JOVANOVIC et al., 1998, Belastungen mit Schimmelpilzen und Milben in Wohnräumen in Baden-Württemberg, . Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, Jahresbericht, pp. 61, Stuttgart
- KELLER 2001: Möglichkeiten und Grenzen der mVOC-Analytik. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene
- KOCH et al., 1999: Indoor viable mould spores in two german cities. *Indoor Air*, 5: 396-401.
- KREISEL, 1988: Zur Bestimmung des Begriffs „Schimmelpilze“. *Zbl Mikrobiol* 143: 263 - 267
- KREJA & SEIDEL, 2001: Toxische Wirkung von flüchtigen Sekundärmetaboliten. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg.), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene. .
- LGA (Landesgesundheitsamt) Baden-Württemberg, 2001, Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. Abgestimmtes Arbeitsergebnis des Arbeitskreises „Qualitätssicherung – Schimmelpilze in Innenräumen“ am Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg

- Lacey & Crook, 1988: Fungal and actinomycete spores as pollutants of the workplace and occupational allergens. *Ann. Occ. Hygiene* 32, (4): 515-533
- LARSEN & FRISVAD, 1995: Characterization of volatile metabolites from 47 penicillium taxa. *Mycol. Res.* 99: 1153-1166.
- LIEBETRAU & BERGMANN 1994: Morbiditätszahlen für die exogen-allergische Alveolitis (EAA). *Allergologie* 17: 61-64.
- LORENZ, 2001: MVOC-Bestimmung zur Erkennung mikrobieller Schäden in Gebäuden. In: Moriske & Turowski (Hrsg.) "Handbuch für Bioklima und Lüftungshygiene, Verlag ecomed, Landsberg.
- MALMBERG, et al. 1985: Exposure to microorganisms, febrile and airway-obstructive symptoms, immune status and lung function of Swedish farmers. *Scand. J. Work Environ. Health* 11: 287-293
- MALMBERG, et al. 1988: Incidence of organic dust toxic syndrome and allergic alveolitis in Swedish farmers. *Int. Arch. Allergy Appl. Immunol.* 87: 47-54
- MALMBERG, et al. 1993: Exposure to microorganisms associated with allergic alveolitis and febrile reactions to mold dust in farmers. *Chest.*, 103: 1202-1209
- MEUNIER, 1987: Prevention of mycoses in immunocompromised patients. *Rev. Inf. Dis.* 9/1987/408-416
- MEUNIER, 1990: Infections in patients with acute leukemia and lymphoma. In: Mandell et al. (Hrsg.) "Principles and practice of infectious diseases" 3: 2265-2275.
- MIERAU, 2001: Stellenwert von MVOC-Untersuchungen in der Baubiologie. Vortrag zum Seminar „Baubiologische Messtechnik“, Fulda-Loheland. Baubiologie MAES, Büro Aachen.
- MILLER, 1990: Fungi as contaminants in indoor air. In *Indoor Air '90* (Hrsg.), "Proc. 5th Int. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Ottawa, 5: 51-64
- MÖLLE et al. 1996: Disseminierte Aspergillose und Mucormykose. Ein Fallbericht. *Mycoses*, 39 (Suppl. 1): 59-64
- MÜLLER, 2002: In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene.
- MORSCHHÄUSER et al. 1995: Gibt es Pathogenitätsfaktoren bei Pilzen? *Mycoses* 39 (Suppl. 1): 51-54.
- MÜCKE, 2001: Wirkungsspektrum der Mykotoxine. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene.
- MÜCKE & LEMMEN, 2000: Schimmelpilze: Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen. Landsberg: ecomed.
- MYGIND, 1989: Grundriss der Allergologie. Steinkopff, Darmstadt.
- Nielsen, 2001: Mycotoxins produced in damp and water damaged buildings – ecology, analytical techniques and exposure. In: Medizinische Universität zu Lübeck, Keller & Senkpiel (Hrsg), Tagungsband der 5. Lübecker Fachtagung für Umwelthygiene.
- PANASENKO, 1967: The ecology of microfungi. *Bot Rev* 33: 189-215.
- PESTKA & BONDY, 1994: Mycotoxin-Induced Immune Modulation. In: Dean et al. (Hrsg.): „Immunotoxicology and Immunopharmacology“. Raven Press, New York.

- PITT, 1994: The current role of *Aspergillus* and *Penicillium* in human and animal health. *J. Med. Vet. Myc.* 32 (Suppl. 1): 17-32.
- POHLAND, 1993: Mycotoxins in review. *Food Add. Containm.* 10: 17-28.
- REINHARDT 1987: Asthma bronchiale. In: Wahn, Seger, Wahn (Hrsg.): „Pädiatrische Allergologie und Immunologie in Klinik und Praxis“. Gustav Fischer Verlag Stuttgart – New York, 205-228
- REIß, 1998: Schimmelpilze – Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. Springer, Berlin – Heidelberg – New York
- SAGUNSKI, 1997: Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen: Expositions-Indikatoren bei Schimmelpilzbefall in Innenräumen? *Umweltmed. Forsch. Prax.* 2: 95-100
- SAMWER, 2001: Untersuchung und Vergleich von chemisch-analytischen und mikrobiologischen Indikatoren für einen Schimmelpilzbefall in Privathaushalten. Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, Fakultät III (Prozesswissenschaften).
- SCHATA & SCHUMACHER, 1995: Schimmelpilze: relevante Innenraum-Allergene. *Allergologie* 18: 531-538.
- SCHLEIBINGER et al. 1997: MVOC produced by microorganisms growing on different air filter media under different climatic conditions. In: "Proceedings of Healthy Buildings", Washington, 3: 575-580.
- SCHROEDER & BOLLER, 1971: The aflatoxin problem in the Southwest in 1969-70. In "Proceedings of Joint Meeting U.S.-Jap. Toxic Microorganisms Panel, 6th, Tokyo, Japan.
- SCHUCHARDT et al., 2001: Von Schimmelpilzen in Innenräumen gebildete leicht flüchtige organische Verbindungen – Bewertung der gesundheitlichen Risiken. Schriftenreihe des Instituts für Toxikologie, Universitätsklinikum Kiel, Heft 46.
- SCOTT, 1957: Water relations of food spoiling microorganisms. *Adv. Food Res.* 7: 189-215.
- SENKPIEL & OHGKE, 1992: Beurteilung der „Schimmelpilz“-Sporenkonzentration in der Innenraumluft und ihre gesundheitlichen Auswirkungen. Festlegung eines Erfahrungsrichtwertes. *Ges. Ing* 113:42-45.
- SIGSGAARD et al., 1994: Respiratory disorders and atopy in Danish refuse workers. *Am. H. Resp. Crit. Care Med.* 149: 1407-1412.
- STAIB 1992: Bioabfall aus medizinisch-mykologischer Sicht. *Bundesgesundhbl.* 21-26
- STRÖM et al., 1994: Quantitative analysis of microbial volatiles in damp Swedish houses. In Samson et al. (Hrsg.) "Health implications in indoor environments", Air quality monographs, pp. 291-305. Elsevier Science BV, Amsterdam
- SUNESSON et al., 1995: Identification of volatile metabolites from five fungal species cultivated on two media. *Appl. Environ. Microbiol.* 61: 2911-2918.
- TABAK & COOKE, 1968: The effects of gaseous environments on the growth and metabolism of fungi. *Bot Rev* 34:126-252.
- TILKES et al. 1999: Mikrobielle Luftverunreinigungen – Verfahren zur Erfassung und Diagnose von Endotoxinen, Mykotoxinen und mVOC. Eikmann & Hofmann (Hrsg.): „Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und –verwertung“. Schriftenreihe des

Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 104, 211-244.

TOBIN et al., 1987: Significance of fungi in indoor air: report of a working group. Can. J. Public Health 78(Suppl.)1-14.

UMWELTBUNDESAMT, 2002: Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen.



Das **BREMER UMWELTINSTITUT** arbeitet seit über 20 Jahren...

- ...überregional auf dem Gebiet der Umweltforschung, insbesondere dem der Spurenanalytik von Umweltschadstoffen, wie z.B. Holzschutzmittelwirkstoffe, Luftschadstoffe, Schwermetalle und halogenierten Kohlenwasserstoffen.
- ... mit MitarbeiterInnen aus den Bereichen Chemie, Biologie und Umwelttechnik.
- ... schwerpunktmäßig an folgenden Problembereichen:
 - Luftschadstoffe in Innenräumen** wie Holzschutzmittel, Formaldehyd, Lösemittel, Pyrethroide, PCB, PAK, Asbest u.v.m., aber auch Schadstoffe biologischen Ursprungs wie z.B. Schimmelpilze.
 - Schadstoffe in Textilien und Lebensmitteln** wie z.B. Organochlor- und Phosphorpestizide, Schwermetalle, aromatische Amine u.v.m.

Das **BREMER UMWELTINSTITUT** führt chemische Analysen für den Verbraucher durch und berät bei Problemen mit Umweltschadstoffen. Ferner werden Vorträge u.a. auch im Rahmen der Erwachsenenbildung angeboten.

Das **BREMER UMWELTINSTITUT** ist akkreditiertes Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF), im Bundesverband der Bürgerinitiativen Umweltschutz (BBU) und im Deutschen Verbraucherschutzverband (DVS).

Die Untersuchungen des **BREMER UMWELTINSTITUTES** werden nicht nur in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, sondern auch in der Tagespresse veröffentlicht. Wir halten dies für eine Möglichkeit, das Bewusstsein der Öffentlichkeit für die zunehmende Belastung von Mensch und Umwelt durch Schadstoffe zu vertiefen.

Das **BREMER UMWELTINSTITUT** ist ein staatlich und parteilich unabhängiges Institut und als gemeinnützig und besonders förderungswürdig anerkannt.

WIR HELFEN IHNEN – SIE HELFEN UNS!

Unsere kostenlose Beratung wird tagtäglich von vielen Menschen genutzt. Wir freuen uns, auf diesem wichtigen Gebiet von allgemeinem öffentlichen Interesse unabhängige und objektive Hilfe anbieten zu können. Doch um diese Leistungen auf Dauer auch weiterhin finanzieren zu können, benötigen wir Hilfe – von Ihnen.

Wir möchten Sie dazu einladen, **FÖRDERMITGLIED** des **BREMER UMWELTINSTITUTES** zu werden.

Bremer Umweltinstitut e.V.
Fahrenheitstr. 1 28359 Bremen
Telefon: 04 21/ 7 60 78 oder 7 80 12
Fax: 04 21 / 7 14 04

Bankverbindung: Sparkasse in Bremen
BLZ: 290 501 01
Konto-Nr.: 17 03 77 6

Danksagung

Dem Senator für Bau und Umwelt,
Ansgaritorstr. 2 in 26195 Bremen,

für die finanzielle Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre

Dem Labor Dr. Schöffner,
Talstraße 3 in 42697 Solingen,

für die Überlassung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen.

Kurzinformationen zu Actinomyceten

Die Actinomyceten gehören zu den Bakterien, dem Organisationstyp der sogenannten Prokaryoten, während z.B. die Schimmelpilze, Pflanzen und Tiere sämtlich zu den sogenannten Eukaryoten gerechnet werden.

A. sind „gram-positiv“ und zählen zur Gruppe der Mycobakterien (von denen ein bekannter pathogener Vertreter das Tuberkelbakterium *Mycobacterium tuberculosis* ist). Die Mycobakterien weisen in ihrem Wachstum häufig die Eigenschaft auf, Verzweigungen zu bilden.

Diese Eigenschaft der Bildung von verzweigten Zellgeflechten findet sich auch im Namen „Aktinomyceten“ wieder. Bei einem Mycel handelt es sich nämlich um das Geflecht einer einzelnen, querwandlosen, oft reich verzweigten Zelle (das Schimmelpilzmycel weist allerdings im Gegensatz zu dem der A. Querwände auf). Die Erscheinungsform und der Begriff des Mycels entstammen der Morphologie der Schimmelpilze, und so werden die A. auch als „Strahlenpilze“ bezeichnet. Das Mycel der A. kann in künstlicher Kultur einen Radius von wenigen Zentimetern erreichen, während der Durchmesser des einzelnen, äußerst zarten, chitin- wie cellulosefreien Zellfadens nur 0,5 bis 1 µm beträgt.

A. und Schimmelpilze gehören zwar, wie einleitend angeführt, grundsätzlich vollkommen eigenständigen Organisationsformen (A. sind Prokaryoten, Schimmelpilze Eukaryoten) an, dennoch teilen A. und Schimmelpilze eine Reihe anderer morphologischer wie ökologischer Merkmale (man spricht hier in der Evolutionsforschung von „konvergenter Entwicklung“). So leben auch die A. bevorzugt im Erdreich, wo sie als sauerstoffatmende Destruenten (= „Zersetzer“) organischer Materie zusammen mit den Schimmelpilzen eine essentielle Bedeutung für die Recyclisierung (= „Wiederverwertung“) der organischen Materie im Erdreich besitzen. Viele A. sind dabei in der Lage, auch komplexe organische Nährstoffe wie Cellulose und Chitin abzubauen. In künstlicher Kultur bevorzugen sie in der Regel weniger reichhaltige Nährböden als andere Bakterien.

Wiederum vergleichbar zu den Schimmelpilzen bilden viele A. sowohl ein im Nährboden verborgenes Substratmycel als auch ein sich über den Nährboden erhebendes Luftmycel aus. Ersteres ist in der Regel mit bloßem Auge unsichtbar, letzteres kann hingegen, vor allem wenn Fruchtkörper und Sporen gebildet werden, auch ohne optische Hilfsmittel als Ganzes wahrgenommen werden. In alternden Kolonien der sogenannten „Proactinomyceten“ (Gattung *Nocardia*) zerfällt das Mycel in stäbchenförmige einzelne Zellen. Zwar kann es über solche einzelnen Zellen auch zu einer Verbreitung dieser A. über den Luftweg kommen, um die Bildung spezieller Verbreitungseinheiten wie sie z.B. die Sporen der Schimmelpilze darstellen handelt es sich jedoch hierbei nicht.

Im Gegensatz zu den Proactinomyceten bleibt das Mycel bei den Angehörigen der großen Gattung *Streptomyces* erhalten. Hier ist das Luftmycel häufig stark entwickelt, von dessen Zellfäden der Verbreitung (auch über den Luftweg) dienende Exosporen (sogenannte „Konidien“, vgl. Schimmelpilze) abgeschnürt werden. Bei den sogenannten „Actinoplanaceae“ (Gattungen *Actinoplanes*, *Streptosporangium*, *Ampullariella*) schließlich werden in den häufig sackförmigen Ausstülpungen der Fäden des Luftmycels (den sogenannten Sporangien) auch Endosporen gebildet. Diese Endosporen können auch beweglich sein.

Einige A. bilden – wiederum ähnlich den Schimmelpilzen – in ihrem natürlichem Lebensraum, dem Erdreich, sowohl Antibiotika wie auch mVOCs (microbial volatile organic compounds, = mikrobiell gebildete flüchtige organische Verbindungen). Dies trifft vor allem auf Vertreter der Gattung *Streptomyces* zu, von denen die medizinisch wichtigen Antibiotika Streptomycin wie auch die Tetracycline isoliert wurden. Bei den angesprochenen mVOCs handelt es sich um z.T. sehr geruchsintensive Substanzen, wie z.B. das von Streptomyceten gebildete sogenannte Geosmin (1,10-Dimethyl-9-decalol). Das Geosmin trägt in hohem Maße zu jenem „typischen“ Geruch nach Erde bei. Das Wachstum von A. ist aus diesem Grunde oft „riechbar“, bevor es überhaupt mit bloßem Auge zu erkennen ist.

Einige A. (Arten der Gattungen *Thermomonospora* und *Thermoactinomyces*) sind thermophil, d.h. sie sind dazu in der Lage, bei sehr hohen Temperaturen zu wachsen. *Thermoactinomyces vulgaris* z.B. gehört zu der Bakterienflora, die in feuchtem, gestapeltem Heu und organischen Abfällen zur Selbsterhitzung führt. Diese Art ist der einzige Actinomycet, der hitzeresistente Sporen bildet. Die thermophilen A. treten sehr häufig in den Rotten von Müllverwertungs- und Kompostierungsanlagen auf und können an den entsprechenden Arbeitsplätzen, aber auch im Außenbereich in unmittelbarer Nähe zu der Anlage in erheblichen Keimkonzentrationen in der Atemluft auftreten.

Das Auftreten von A. und der allermeisten anderen Bakterien im Innenraum ist wie bei Schimmelpilzen stets an das Vorhandensein durchfeuchteter organischer Baumaterialien gebunden. In ihren Ansprüchen an die Materialfeuchte liegen sie jedoch noch über denen der meisten Schimmelpilze. Das bedeutet, dass sie erst bei sehr starker Durchfeuchtung bzw. erst bei auf dem Nährboden stehender Nässe wachsen können. Demzufolge werden A. auch sehr häufig in stehendem Wasserlachen oder tropfnassen, verschmutzten Filtern von (schlecht gewarteten) Klimaanlage gefunden.

Welche Relevanz A. als Bestandteil der in Innenräumen auftretenden Bioaerosole für die menschliche Gesundheit haben, ist bislang noch nicht belegt, wird aber derzeit als „möglich“ diskutiert. Als mögliche Folgen einer erhöhten Exposition werden Schwächungen der Immunabwehr bis hin zu rheumatischen Erkrankungen beschrieben, ein klarer kausaler Dosis-Wirkungs-Zusammenhang ist jedoch bislang nicht belegt. In der Regel treten A. in der Raumluft wohl in sehr viel geringeren Konzentrationen auf als dies für Schimmelpilzsporen der Fall ist.

5.1 Nachweis der lebenden, fortpflanzungsfähigen Schimmelpilzzellen in der Raumluft

Ausgehend von neuen Untersuchungen zu Hintergrundbelastungen modifizierte das Umweltbundesamt die 2003 im „Schimmelpilzleitfaden“ veröffentlichten Bewertungsgrundlagen für Schimmelpilzbelastungen in der Raumluft u.B. in dem 2005 vom UBA veröffentlichten „Schimmelpilzsarierungs-Leitfaden“ in der folgenden Weise (Änderungen bzw. Erweiterungen sind *kursiv* gesetzt):

Arten- bzw. Gattungsspektrum	Hintergrundbelastung	Übergangsbereich	Innenraumquelle wahrscheinlich
Eine der typischen Außenluftgattungen	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung geringer ist als <i>das 0,7- bis 1-fache</i> der entsprechenden Konzentration in der Außenluft	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung geringer ist als das 1,0- bis 2,0-fache der entsprechenden Konzentration in der Außenluft	Wenn die Konzentration der KBE einer Gattung höher ist als das 2-fache der entsprechenden Konzentration in der Außenluft
Summe der untypischen Außenluftarten bzw. -gattungen	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 150 KBE/m³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 500 KBE/m³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft höher ist als 500 KBE/m³
<i>Eine Gattung (Summe der KBE aller zugehörigen Arten) der untypischen Außenluftschimmelpilze</i>	<i>Wenn die Diff. zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 100 KBE/m³</i>	<i>Wenn die Diff. zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft geringer ist als 300 KBE/m³</i>	<i>Wenn die Diff. zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft höher ist als 300 KBE/m³</i>
Eine Art der untypischen Außenluftschimmelpilze mit gut flugfähigen Sporen	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 50 KBE/m³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 100 KBE/m³	Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten höher ist als 100 KBE/m³
Eine Art der untypischen Außenluftschimmelpilze mit geringer Sporenfreisetzungsrates (z.B. <i>Phialophora sp. Stachybotris chartarum</i>)	<i>Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 30 KBE/m³</i>	<i>Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten geringer ist als 50 KBE/m³</i>	<i>Wenn die Differenz zwischen der Konzentration der KBE in der Innenraumluft minus der in der Außenluft einer der untypischen Außenluftarten höher ist als 50 KBE/m³</i>

TABELLE 6: Bewertungshilfe für die Ergebnisse aus Beprobungen der Luft auf die **Konz. der Koloniebildenden Einheiten (KBE)**. Es sollten stets alle 5 Zeilen der unterschiedlichen Kategorien im bewerteten Arten- bzw. Gattungsspektrum gemeinsam betrachtet werden (soweit möglich).

In der Thematik der sogenannten „Settle Plates“, Fangschalen oder auch Sedimentationplatten (Seite 67/68) bleibt das Bremer Umweltinstitut bei seiner kritischen Haltung bezüglich der Aussagekraft und der Trennschärfe des Verfahrens. In der jüngeren Zeit wurden Untersuchungen publiziert, welche diesem Verfahren im Nachweis von Innenraumluftbelastungen eine gute Verlässlichkeit bescheinigen (SCHLEIBINGER et al. 2004). Unserer Meinung nach bestehen hier jedoch noch zu viele Fragen und Unklarheiten, als dass die in Kapitel 5.1 dargestellten grundsätzlichen Überlegungen als gegenstandslos angesehen werden könnten. Auch der derzeit noch in Arbeit befindliche (Stand 01/06) Entwurf der VDI 4300-10, welche die Definition der Probenahmeverfahren bezüglich Schimmelpilzbelastungen im Innenraum zum Inhalt haben wird, schließt dieses Verfahren zur Erhebung von Raumluftbelastungen aus.

Unbedingt abzulehnen ist unseres Erachtens nach die Durchführung eines solchen Nachweises über Sedimentationsplatten *durch den Laien und Betroffenen selbst*, wie er in jüngster Zeit von einigen Firmen aus dem Bereich der Baustoffbranche bzw. von einigen Umweltlabors oder auch der Stiftung Warentest angeboten wird; zu vielfältig sind hierbei die Fehlermöglichkeiten. Sicherlich mögen die sehr viel geringeren Kosten im Vergleich zur herkömmlichen Untersuchungsmethodik ein gewichtiges Argument in der Entscheidung des betroffenen Verbrauchers sein, doch auch die geringsten Ausgaben sind wertlos, wenn den resultierenden Ergebnissen aus wissenschaftlicher Sicht eine Reproduzierbarkeit und relevante Aussagekraft zu weiten Teilen abgesprochen werden muss. Bedenklich ist zudem ein Probenahmekonzept, bei dem der Versand einer bebrüteten Nährbodenplatte zum Prüflabor erfolgen soll; ein solches Verschicken von aufkonzentrierten und evtl. besonders pathogenen Schimmelpilzen mit der normalen „Post“ ist nicht zulässig. Schließlich möchten einige Anbieter gar dem Laien selbst die Auswertung der Proben an die Hand geben; abgesehen davon, dass sich dieser evtl. erheblichen Gefährdungen im Umgang mit aufkonzentrierten Keimen aussetzt, ist ein gültiges und aussagekräftiges Ergebnis bei einer solchen Vorgehensweise wohl kaum zu erwarten.

Neben der kritischen Diskussion über die Verlässlichkeit verschiedener Nachweisverfahren bzw. die Reproduzierbarkeit der hieraus generierten Ergebnisse sollte nach Ansicht des Bremer Umweltinstitutes vor allem eines bedacht werden: **ohne den fachmännischen Eindruck, welcher bei einer Begehung des fraglichen Objektes gewonnen wurde, ist die Aussagekraft des isoliert betrachteten „nackten“ Untersuchungsergebnisses - wenn überhaupt vorhanden - nur eingeschränkt gegeben. Die Bewertung eines jeden Messergebnisses in bezug auf Schimmelpilzbelastungen setzt einen hohen Sachverstand voraus und kann nicht in bloßen „ja – nein“ Entscheidungskriterien wiedergegeben werden.**

Die auf Seite 72 unten bzw. 73 oben getroffenen Aussagen sind nicht richtig. Statt dessen lautet der korrekte Sachverhalt:

Die Richtlinie des Rates 90 / 679 / EWG wurde am 01.04.1999 als „Verordnung bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen“, umgangssprachlich auch „Biostoffverordnung“, in deutsches Recht umgesetzt.

5.2 Nachweis der Gesamtzahl toter und lebender Schimmelpilzzellen in der Raumluft („Total Count“)

Analog zu den Bewertungsgrundlagen zum Nachweis keimfähiger Schimmelpilzsporen in der Raumluft veränderte das Umweltbundesamt ebenso die 2003 im „Schimmelpilzleitfaden“ veröffentlichten Bewertungsgrundlagen für die Gesamtzahl toter und lebender Schimmelpilzzellen in der Raumluft in dem 2005 vom UBA veröffentlichten „Schimmelpilzsanierungs-Leitfaden“ in der folgenden Weise (Änderungen bzw. Erweiterungen sind *kursiv* gesetzt):

Gesamtpilzsporen	Innenraumquelle unwahrscheinlich	Innenraumquelle nicht auszuschließen	Innenraumquelle wahrscheinlich
Sporentypen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen ¹⁾	Wenn die Konzentration eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft unter dem ein- bis 1,2-fachen der entsprechenden Konzentration in der Außenluft liegt	Wenn die Konz. eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft unter dem 1,6-fachen ($\pm 0,4$) der entsprechenden K. in der Außenluft liegt	Wenn die Konzentration eines dieser Sporentypen in der Innenraumluft über dem 2-fachen der entsprechenden Konzentration in der Außenluft liegt
Sporen vom Typ <i>Aspergillus/Penicillium</i>	Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft nicht über 300 liegt	Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft nicht über 800 liegt	Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft über 800 liegt
Sporen vom Typ <i>Chaetomium</i> spp.	Wenn die Konzentration dieses Sporentyps in der Innenraumluft gleich hoch oder niedriger ist wie die in der Außenluft	<i>Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft nicht über 20 liegt</i>	<i>Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft über 20 liegt</i>
Sporen vom Typ <i>Stachybotrys chartarum</i>	Wenn die Konz. dieses Sporentyps in der Innenraumluft gleich hoch ist wie die in der Außenluft	<i>Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innen- und Außenluft nicht über 10 liegt</i>	<i>Wenn die Differenz dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft über 10 liegt</i>
Unterschiedliche Pilzsporen, welche nicht dem Typ der Basidiosporen oder Ascosporen angehören	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zw. Innenraum- und Außenluft nicht über 400 liegt	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zw. Innenraum- und Außenluft nicht über 800 liegt	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft über 800 liegt
Mycelstücke	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zw. Innenraum- und Außenluft nicht über 400 liegt	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zw. Innenraum- und Außenluft nicht über 300 liegt	Wenn die Diff. dieses Sporentyps zwischen Innenraum- und Außenluft über 300 liegt

TABELLE 7: Bewertungshilfe für die Ergebnisse aus Beprobungen der Luft auf die Konzentration der lebenden und toten Schimmelpilz-Partikel. Es sollten stets die sechs Zeilen der unterschiedlichen Kategorien im bewerteten Arten- bzw. Gattungsspektrum zusammen bewertet werden (soweit möglich).

¹⁾ Unter den Sporentypen, welche in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen, finden sich z.B. Sporen vom Typ der Ascosporen sowie der Basidiosporen, vom Typ *Alternaria/Ulocladium* und vom Typ *Cladosporium* spp.

6.1 Nachweis fortpflanzungsfähiger Schimmelpilzzellen im Hausstaub

Die in den Bewertungsgrundlagen von den Seiten 82 bis 84 getroffenen Aussagen über die Schwierigkeiten der Definition von „durchschnittlichen“ oder „auffällig erhöhten“ Schimmelpilzbelastungen im Hausstaub werden durch neuere Studien, z.B. jene von Gabrio et al. 2005 in „Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft“ veröffentlichte, noch weiter bekräftigt. Die sehr gut aufgeschlüsselten Einzelergebnisse würden den Umfang dieser an Verbraucher und Laien gerichteten Veröffentlichung sprengen. Aus diesem Grunde ist die Beurteilung einer Hausstaubuntersuchung die Kenntnis der Gegebenheiten vor Ort noch wichtiger als dies bei der Bewertung z.B. von Luftproben ohnehin schon der Fall ist.

8.1 Probenahmeverfahren des Bremer Umweltinstitutes

8.1.1 Luftproben

Die auf den Seiten 92 und 93 angeführten Argumente für die Durchführung einer Nutzungssimulation hält das Bremer Umweltinstitut nach wie vor für bedenkenswert vor allem dann, wenn die konkrete Exposition von Innenraumnutzern gegenüber Schimmelpilzbelastungen unter Bedingungen, wie sie bei der durchschnittlichen Nutzung herrschen, ermittelt werden soll.

Das Für und Wider eine Nutzungssimulation wird in den einschlägigen Veröffentlichungen seit geraumer Zeit kontrovers diskutiert. Für die Reproduzierbarkeit der entstehenden Ergebnisse wäre eine Vereinheitlichung diesbezüglich wünschenswert. In der vermutlich Mitte des Jahres 2006 im Gründruck erscheinenden Fassung der VDI 4300 Blatt 10 wird die Möglichkeit einer Nutzungssimulation für Kurzzeitmessungen (≤ 1 h) eingeräumt, für Langzeitmessungen unter bestimmten Voraussetzungen sogar vorgeschrieben werden.