

**Materialien zur Umweltmedizin**  
**Aktuelle umweltmedizinische Probleme**  
**in Innenräumen, Teil 2**

Band 15 der Schriftenreihe

**Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 2**  
**Band 15 der Schriftenreihe**

Beim vorliegenden Band handelt es sich um die Zusammenfassung von Beiträgen einer Fortbildungsveranstaltung für den öffentlichen Gesundheitsdienst in Bayern, die von der Bayerischen Akademie für Gesundheit und Verbraucherschutz in Oberschleißheim und Erlangen organisiert wurde.

**Herausgeber:**

Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit  
Eggenreuther Weg 43  
91058 Erlangen

Telefon: 09131/764-0  
Telefax: 09131/764-102

E-Mail: [poststelle@lgl.bayern.de](mailto:poststelle@lgl.bayern.de)  
Internet: [www.lgl.bayern.de](http://www.lgl.bayern.de)

**Koordinierung und fachliche Betreuung:**

PD Dr. Hermann Fromme, Dr. Ursula Schwegler  
Sachgebiet Umweltmedizin  
E-Mail: [hermann.fromme@lgl.bayern.de](mailto:hermann.fromme@lgl.bayern.de)

**Stand:**

Februar 2007

ISSN 1862-8052 (Print Ausgabe), ISSN 1862-9601 (Online Ausgabe)  
ISBN 978-3-939652-09-0 (Print Ausgabe)  
ISBN 978-3-939652-10-6 (Online Ausgabe)

Ä  
Ä



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Ä  
Ä  
Ä

*Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – werden Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Publikation wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden.*

## Inhaltsverzeichnis

1	Gesundheitliche Bedeutung von biologischen Faktoren in der Innenraumluft .....	3
1.1	Gründe für eine verstärkte Aufmerksamkeit für biologische Innenraumverunreinigungen und ihre Auswirkung auf die menschliche Gesundheit .....	4
1.2	Biologische Innenraumverunreinigungen.....	7
1.3	Durch biologische Faktoren verursachte Krankheiten und gesundheitliche Beeinträchtigungen.....	7
1.4	Maßnahmen zur Therapie und zur Prävention von Gesundheitsbeeinträchtigungen durch biologische Faktoren in Innenräumen.....	8
1.5	Zusammenfassung: Maßnahmen zur Verhinderung einer Innenraumproblematik durch biologische Faktoren.....	9
2	Allergien und Asthma bei Kindern in Baden-Württemberg 1992-2003 .....	10
2.1	Datengrundlage .....	10
2.2	Allergien .....	12
2.3	Asthma.....	17
3	Schimmelpilz-Exposition: Pathomechanismus und Krankheitsbilder .....	25
3.1	Erkrankungen durch Schimmelpilze (Überblick) .....	25
3.2	Mykosen – Infektionen durch Schimmelpilze .....	26
3.3	Allergien durch Schimmelpilze.....	27
3.4	Nicht-allergische (toxische) Atemwegserkrankungen .....	34
3.5	Literaturverzeichnis.....	39
4	Endotoxine und Atemwegserkrankungen – zwei Seiten derselben Münze? .....	43
4.1	Zusammenfassung .....	43
4.2	Was versteht man unter Endotoxinen? .....	44
4.3	Expositionsabschätzung .....	44
4.4	Bekanntes zelluläres Effekte .....	45
4.5	Endotoxine und Atemwegserkrankungen - Ergebnisse arbeitsepidemiologischer Untersuchungen .....	45
4.6	Endotoxine und Atemwegserkrankungen - Ergebnisse umweltepidemiologischer Untersuchungen .....	49
4.7	Mögliche Mechanismen .....	51
4.8	Literatur.....	52
5	Schimmelpilze - Nachweis und Bewertung .....	58
5.1	Vorkommen und Lebensansprüche von Schimmelpilzen .....	58
5.2	Ursachen für Feuchteschäden.....	59
5.3	Mikrobiologische Untersuchungen im Innenraum .....	65
5.4	Nachweismethoden .....	67
5.5	Allgemeine Angaben zu Kultivierungsmethoden .....	68
5.6	Materialuntersuchungen .....	68
5.7	Luftproben.....	69
5.8	Staubuntersuchungen.....	71
5.9	Bewertung von mikrobiellen Schäden.....	71
5.10	Bewertung von Materialproben .....	72
5.11	Bewertung von Luftproben .....	76
5.12	Bewertung von Staubproben.....	79
5.13	Literaturverzeichnis .....	81
6	Sanierung von Schimmelpilzbelastungen in Innenräumen .....	83
6.1	Allgemein .....	83
6.2	Gesundheitliche Gefährdung durch Schimmelpilze .....	87
6.3	Weitere gesundheitliche Gefährdungen im Zusammenhang mit Schimmelpilzschäden .....	90

6.4	Abwasser/Oberflächenwasser .....	90
6.5	Beurteilung der Gefährdung der Bewohner/Nutzer durch die in Innenräumen vorliegenden Schimmelpilzbelastungen .....	91
6.6	Gefährdungsbeurteilung anhand von mit Schimmelpilzen befallenen Material .....	91
6.7	Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzschadens anhand der Schimmelpilzkonzentration in der Innenraumluft .....	93
6.8	Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzschadens anhand der Schimmelpilzkonzentration im Hausstaub .....	96
6.9	Beurteilung der Dringlichkeit der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen .....	98
6.10	Beurteilung der Gefährdung bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen - Gefährdungsbeurteilung für die Arbeitnehmer bei Sanierungsarbeiten .....	98
6.11	Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe .....	99
6.12	Gefährdung durch eingesetzte Chemikalien .....	102
6.13	Arbeitsschutz und Schutzmaßnahmen bei der Durchführung der Sanierungen von mit Schimmelpilzen belasteten Innenräumen .....	102
6.14	Arbeitsschutzmaßnahmen bezüglich der Belastung mit mikrobiologischen Schadstoffen .....	102
6.15	Arbeitsschutzmaßnahmen bezüglich der Belastung mit chemischen Schadstoffen	104
6.16	Gefährdungseinschätzung für die/den Gebäudenutzer im Rahmen der Sanierung	105
6.17	Sanierung und Beseitigung der schimmelbefallenen Teile .....	106
6.18	Bauschäden und Baumängel .....	112
6.19	Entfernung des mit Schimmelpilzen befallenen Materials und Reinigung der Oberflächen .....	114
6.20	Reinigung .....	116
6.21	Desinfizierende Reinigung im Zusammenhang mit einer Bautrocknung .....	117
6.22	Trocknung feuchter Bausubstanz .....	117
6.23	Trocknen durch Lüftung bei Kleinstschäden .....	119
6.24	Technische Trocknung .....	120
6.25	Oberflächen/Gegenstände ohne Befall .....	121
6.26	Wiederaufbau .....	122
6.27	Feinreinigung des Objektes .....	123
6.28	Abnahme des Bauwerks .....	124
6.29	Reinheitskontrolle .....	124
6.30	Ursachenbeseitigungskontrolle .....	125
6.31	Literatur .....	125
7	Verzeichnis der Referenten .....	127

# 1 Gesundheitliche Bedeutung von biologischen Faktoren in der Innenraumluft

Heribert Bischoff

Seit einigen Jahren wird biologischen Faktoren in Innenräumen eine verstärkte Aufmerksamkeit entgegengebracht. An erster Stelle steht zurzeit zweifellos die Belastung mit Schimmelpilzen; mittlerweile bietet eine Vielzahl von - teilweise selbsternannten - Experten und Sachverständigen Messungen von Schimmelpilzen in Innenräumen an; das Thema scheint außerordentlich verbraucherrelevant zu sein; auch die Stiftung Warentest bietet unter dem Stichwort „Schimmel im Haus – Gefährliche Mikroben“ (siehe Abbildung 1) einen Test zur orientierenden Untersuchung auf Schimmelpilze in Innenräumen an, wahlweise als Abklatschtest oder als Sedimentationsplatte; es fehlt nicht der Hinweis darauf, dass Schimmel in der Wohnung krank macht und Schimmelpilze zu den bedeutendsten Innenraumallergenen gehören.

**STIFTUNG WARENTEST**  
online

ANALYSE aus UMWELT + ENERGIE 19.10.2005

**Schimmel im Haus**  
**Gefährliche Mikroben**

Schimmel in der Wohnung macht krank. Doch viele Menschen sind sich der Problematik von Schimmelpilzen oft nicht bewusst. Denn die Sporen der Schimmelpilze zählen zu den bedeutendsten Innenraumallergenen. Wir analysieren Ihre Probe auf eine mögliche Schimmelpilzbelastung Ihrer Wohnräume und geben Tipps und Handlungsempfehlungen.

Preis: 47 Euro

**Abb. 1:** Angebot der Stiftung Warentest zur Untersuchung auf Schimmelpilze ([www.stiftung-warentest.de](http://www.stiftung-warentest.de))

## 1.1 Gründe für eine verstärkte Aufmerksamkeit für biologische Innenraum-verunreinigungen und ihre Auswirkung auf die menschliche Gesundheit

Innenraumverunreinigungen und ihr Einfluss auf die menschliche Gesundheit stehen schon seit mehreren Jahrzehnten verstärkt im Fokus der Wissenschaft, unter anderem bedingt durch den Aufschwung des Fachgebiets Umweltmedizin in den 60er und 70er Jahren. Dabei wurden zunächst chemische Substanzen nachgewiesen und bewertet; zwei markante Beispiele, die auch öffentlich eine große Bedeutung erlangten, waren Formaldehyd und Holzschutzmittel (PCP/Lindan). Die Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, die 1984 im damaligen Bundesgesundheitsamt eingerichtet und nach Auflösung des BGA 1994 als UBA-Kommission fortgeführt wurde, hatte zum Ziel, physikalische, chemische und biologische Innenraumverunreinigungen zu erfassen und zu bewerten sowie Richt- bzw. Grenzwerte für diese Verunreinigungen festzulegen. Die Kommission befasste sich zunächst ebenfalls mit der gesundheitlichen Bewertung von chemischen Substanzen; so wurden in den Jahren 1996 bis 1998 Toluol, Dichlormethan, Kohlenmonoxid, Pentachlorphenol, Stickstoffdioxid und Styrol bearbeitet. Biologische Innenraumverunreinigungen spielten zunächst eine untergeordnete Rolle. In den letzten Jahren jedoch wurde den biologischen Innenraumverunreinigungen – und hier insbesondere den Schimmelpilzen – sehr viel mehr Aufmerksamkeit geschenkt, was sich auch in mehreren Publikationen in den letzten Jahren niederschlug (siehe Abbildung 2).



Abb. 2: Broschüre und Leitfaden des UBA im Internet ([www.uba.de](http://www.uba.de))

Auch auf Länderebene wurden – vorzugsweise über die Landesgesundheitsämter – Informationsschriften zur Schimmelpilzproblematik in Innenräumen erstellt, von denen die Arbeiten des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg (siehe Abbildung 3) besondere Beachtung fanden, da hier Probenahmeverfahren, Probenaufbereitung und Nachweisverfahren von Schimmelpilzen und deren Stoffwechselprodukten in Innenräumen detailliert erklärt und auch im Sinne einer dringend notwendigen Standardisierung und Qualitätssicherung fachlich fundiert dargestellt werden. Lesenswert sind auch die Seiten 92a bis 92f mit der Überschrift „Schimmelpilze im Innenraum zwischen Ethik und Monetik“, in denen das Geschäft mit der Angst der Verbraucher vor den gesundheitlichen Schäden durch Schimmelpilze thematisiert wird.



**Abb. 3:** Informationsschriften des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg im Internet ([www.gesundheitsamt-bw.de](http://www.gesundheitsamt-bw.de))

Womit ist nun die zunehmende Aufmerksamkeit für das Problem der biologischen Innenraumverunreinigungen – und hier insbesondere die Schimmelpilzproblematik - zu erklären? Möglicherweise steht dies in Zusammenhang mit dem – zumindest in der Öffentlichkeit so dargestellten - Zunahme von allergischen Erkrankungen in der Allgemeinbevölkerung („Allergien sind die Volkskrankheit Nr. 1“, siehe Abbildung 4); entsprechend häufig wird natürlich

nach Auslösern für allergische Erkrankungen gefahndet. Tatsache ist, dass bei durch biologische Innenraumverunreinigungen verursachten Gesundheitsstörungen allergische Erkrankungen an erster Stelle stehen. Sicherlich spielt für diese Entwicklung auch eine große Rolle, dass sich die Mehrzahl der Bevölkerung die weitaus überwiegende Zeit in Innenräumen aufhält und somit Innenraumschadstoffen allgemein eine höhere Bedeutung zugemessen wird. Speziell was die Schimmelpilze angeht, dürfte aber auch die weitverbreitete Anwendung von energiesparenden Wärmedämm- bzw. Isoliermaßnahmen eine wichtige Rolle spielen. Einige dieser Maßnahmen provozieren nämlich einen verminderten Luftaustausch zwischen Innenraum und Außenwelt, sodass - bei fehlender oder unzureichender Lüftung - Feuchtelasten nicht abgeführt werden können, was wiederum das Wachstum von Schimmelpilzen entscheidend fördern kann. Bauliche Mängel (Feuchteschäden, Wärmebrücken) können das Ihrige zur Entstehung einer Schimmelpilzproblematik beitragen.

**Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz**



**PRESSEMITTEILUNG**  
Nr. 048 13. Februar 2006

**Bernhard: Allergien sind Volkskrankheit Nr. 1**  
"Bundesweit sind 20 Millionen Menschen allergiekrank"

+++ Immer mehr Menschen leiden unter Allergien. Dies erklärte **Bayerns Gesundheits-Staatssekretär Otmar Bernhard** heute in München zur Allergie-Prävention zusammen mit **Johannes Ring** (Klinik für Allergologie der TU München), **Heidrun Behrendt** (Zentrum Allergie und Umwelt) sowie **Erika von Mutius** (Hauersches Kinderspital der LMU München). Bernhard: "Allergien haben sich zur Volkskrankheit Nr. 1 entwickelt. Ein Viertel der Bundesbürger, also mehr als 20 Millionen Deutsche sind Allergiker. Die Hälfte davon leidet an Pollenallergie. Aber auch bereits jedes fünfte Schulkind leidet

**Abb. 4:** Pressemitteilung des Bayerischen Umweltministeriums vom 13.02.2006  
([www.stmugv.bayern.de](http://www.stmugv.bayern.de))

Es folgt eine Zusammenfassung über innenraumrelevante biologische Faktoren und die möglichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen, die durch sie verursacht werden können. Abschließend wird stichwortartig auf Möglichkeiten zur Vermeidung von solchen Gesund-

heitsstörungen eingegangen, insbesondere auf die Vermeidung einer Schimmelpilzproblematik.

## **1.2 Biologische Innenraumverunreinigungen**

Wenn man von biologischen Faktoren in Innenräumen spricht, denkt man zunächst an vermehrungsfähige Mikroorganismen, in erster Linie an Schimmelpilze, aber auch an Bakterien. Das sind aber nicht die einzigen innenraumrelevanten Faktoren; denn auch Zellbestandteile von Schimmelpilzen und Bakterien, die nicht lebensfähig und damit auch nicht anzüchtbar sind, können gesundheitliche Störungen verursachen, wenn sie inhaliert werden. Dies gilt ebenso für sekundäre Stoffwechselprodukte insbesondere von Schimmelpilzen, zum Beispiel sogenannte Mykotoxine und flüchtige organische Verbindungen (MVOC), deren oft als unangenehm empfundener Geruch schon in extrem geringer Konzentration wahrgenommen wird. Tiere oder besser gesagt Tierprodukte wie Haare, Speichel- und Tränenflüssigkeit von Säugetieren sowie Milbenkot sind als potente Allergene bekannt und können bei sensibilisierten Personen massive Gesundheitsstörungen bewirken. Die Palette von biologischen Innenraumverunreinigungen ist also sehr breit gestreut, wobei – wie schon oben erwähnt – die Schimmelpilze momentan im Mittelpunkt des Interesses stehen.

## **1.3 Durch biologische Faktoren verursachte Krankheiten und gesundheitliche Beeinträchtigungen**

Es gibt eine ganze Reihe von Gesundheitstörungen, die durch biologische Faktoren verursacht werden können. Zunächst sind Infektionen der Atemwege zu nennen, die durch in der Innenraumluft befindliche Mikroorganismen ausgelöst werden können (Beispiele: Legionellen, Aspergillen). Am geläufigsten sind aber allergische Erkrankungen wie etwa die allergische Rhinitis, die allergische Konjunktivitis oder das allergische Asthma bronchiale. Auch die exogen-allergische Alveolitis, als Krankheitsbild vor allem in der Arbeitsmedizin bestens bekannt, zählt zu den durch biologische Faktoren verursachten Erkrankungen. Sowohl das allergische Asthma bronchiale als auch die allergische Alveolitis können bei fortbestehendem Kontakt mit dem Allergen zu schwerwiegenden, irreversiblen Folgeschäden führen. Eine weitere Gruppe von Erkrankungen, die vom Krankheitsbild manchmal den allergischen Erkrankungen ähneln, aber nicht auf Überreaktionen des Immunsystems zurückzuführen sind, sind entzündlich-toxische Erkrankungen, wie zum Beispiel Schleimhautreizungen oder das ODTS (organic dust toxic syndrome).

Immer wieder werden bei bestehender oder vermuteter Belastung mit biologischen Faktoren in Innenräumen – hier werden zurzeit die Schimmelpilze mit Abstand am häufigsten angeschuldigt – unspezifische Gesundheitsstörungen angegeben; beispielhaft seien hier Müdigkeit, Abgeschlagenheit, Konzentrationsschwäche, Leistungsminderung, Kopfschmerzen, Reizbarkeit sowie Abwehrschwäche genannt. Es braucht nicht eigens betont zu werden, dass die Zuordnung solcher unspezifischer Symptome zu einem auslösenden Agens ausgesprochen schwierig ist. Unzweifelhaft werden diese Symptome aber - neben vielen anderen - besonders häufig im Rahmen eines SBS (sick building syndrome) angegeben, dessen Ursache auch auf das Vorhandensein von Schimmelpilzsporen bzw. in der Raumluft zurückgeführt wird. In der untenstehenden Tabelle werden biologische Faktoren und die von ihnen ausgelösten gesundheitlichen Beeinträchtigungen bzw. Erkrankungen zugeordnet.

**Tab. 1:** Zuordnung von biologischen Faktoren und gesundheitlichen Beeinträchtigungen bzw. Erkrankungen

Infektionen	Bakterien, Schimmelpilze
allergische Erkrankungen	Milben, Tierprodukte, Schimmelpilze
entzündlich-toxische Erkrankungen	Endotoxine, Mykotoxine
unspezifische Beschwerden	MVOC, Mykotoxine, Schimmelpilze

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass Schimmelpilze gelegentlich für alle möglichen Gesundheitsstörungen verantwortlich gemacht werden, wobei die Palette von „Immunerkrankungen“ aller Art einschließlich rheumatischer Erkrankungen über Krankheitsbilder aus dem psychiatrischen Formenkreis wie z. B. endogene Depressionen bis hin zu bösartigen Tumoren reicht. Eine Internet-Recherche mit den Stichworten Schimmelpilze und Krankheiten eröffnet mitunter erstaunliche Ausführungen, die geeignet sind, einen durchschnittlichen Verbraucher intensiv zu verunsichern.

#### **1.4 Maßnahmen zur Therapie und zur Prävention von Gesundheits-beinträchtigungen durch biologische Faktoren in Innenräumen**

Eine zunächst recht banal klingende, aber einleuchtende Behandlung bzw. Prävention von durch biologische Faktoren verursachten Erkrankungen besteht darin, die auslösenden Agentien zu beseitigen bzw. erst gar nicht entstehen zu lassen. Dazu zählen in erster Linie

ausreichendes Lüften vor allem bei sehr dicht schließenden Fenstern, eine effektive Sanierung offensichtlicher Feuchteschäden und eine Beseitigung von kondenswasserfördernden • mit Schimmelpilzen bzw. mit deren Zellwandbestandteilen oder Produkten (Mykotoxine, MVOC) sicher verhindert. Weiterhin sind Klimaanlage und Luftbefeuchter regelmäßig zu warten. Räume, bei denen eine Schimmelpilzbelastung bekannt ist oder auf Grund von baulichen Mängeln angenommen werden muss, sollten auf keinen Fall für den dauernden Aufenthalt von Personen genutzt werden, wenn nicht eine fachgerechte Sanierung erfolgt. Diese ganz selbstverständliche Forderung wird nicht selten auch bei besonders problematischen Personengruppen (Kindergarten- oder Grundschulkinder) missachtet.

### **1.5 Zusammenfassung: Maßnahmen zur Verhinderung einer Innenraum-problematik durch biologische Faktoren**

- ausreichende Belüftung von Räumen
- Sanierung von feuchtebelastetem Mauerwerk
- fachmännische Wartung von Klimaanlage und Luftbefeuchtern
- Verwendung von milbendichten Matratzenbezüge
- sparsame Verwendung von Teppichböden
- Anhebung der Temperatur in Warmwasserversorgungssystemen auf mind. 55°C

## **2 Allergien und Asthma bei Kindern in Baden-Württemberg 1992-2003**

Iris Zöllner

Dieser Beitrag hat das Ziel, einige Ergebnisse aus einem umweltepidemiologischen Projekt zur Häufigkeit von Allergien und Atemwegserkrankungen kurz vorzustellen. Die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung steht dabei im Vordergrund, die Abbildungen erlauben aber auch einen Vergleich zwischen den vier Untersuchungsgebieten in Mannheim, Kehl, Stuttgart und Aulendorf/Bad Waldsee. Im Text sind jeweils die beobachteten Häufigkeiten aus der Untersuchung im Winterhalbjahr 2002/03 angegeben. Für eine weiterreichende Beschreibung der Daten aus früheren Jahren sei auf die Berichte des Landesgesundheitsamtes zum Projekt Beobachtungsgesundheitsämter verwiesen, die im Internet auf der Seite [www.gesundheitsamt-bw.de](http://www.gesundheitsamt-bw.de) unter den Fachpublikationen zu finden sind.

### **2.1 Datengrundlage**

Von mehreren Beobachtungsgesundheitsämtern in Baden-Württemberg werden seit 1992 Daten zur Häufigkeit von Atemwegserkrankungen und Allergien bei Viertklässlern über einen Elternfragebogen erhoben. In Anlehnung an die ISAAC-Studie wurden die Eltern zur Häufigkeit von Asthma, Allergien und entsprechenden Symptomen befragt. Das Durchschnittsalter der untersuchten Kinder lag bei 10,2 Jahren. An den Untersuchungen nahmen von 1992/93 bis 2002/03 insgesamt 10 595 Kinder teil. Die Teilnahmequote lag bei 78 Prozent. In die Auswertung wurden die Daten von den Kindern aufgenommen, die mindestens zwei Jahre am jeweiligen Untersuchungsort wohnten, um mögliche Umwelteinflüsse erfassen zu können. Hauptziele der Untersuchung waren die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Häufigkeit von Allergien und Atemwegserkrankungen sowie der Vergleich der Ergebnisse zwischen mehreren Untersuchungsgebieten. Als Untersuchungsorte wurden Mannheim, Kehl, Aulendorf/Bad Waldsee (und seit 1995 auch Stuttgart) ausgewählt. Mannheim und Stuttgart stellen die größten Verdichtungsräume Baden-Württembergs dar, die durch eine hohe Industrie- und Verkehrsdichte gekennzeichnet sind. Der Raum Kehl im Ortenaukreis gilt als Bereich mit hoher industrieller Dichte in ländlicher Umgebung. Als Vergleichsgebiet

für die Untersuchung wurden die Orte Aulendorf und Bad Waldsee im Landkreis Ravensburg ausgewählt, die benachbart und im ländlichen Raum ohne industrielle Verdichtung angesiedelt sind.

Die folgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse aus der Befragung der Eltern der untersuchten Kinder und aus Allergietests. Dabei beziehen sich die verwendeten Bezeichnungen jeweils auf die in Tabelle 1 zitierten Fragen aus dem Elternfragebogen bzw einen Allergietest.

**Tab. 1:** Fragen zu Allergien und Asthma und im Text verwendete Kurzformulierungen

<b>Kurzformulierung</b>	<b>Frage an die Eltern</b>
Allergie jemals (Lebenszeitprävalenz)	„Hat oder hatte Ihr Kind irgend einmal in seinem Leben eine Allergie?“
Allergie (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt)	„Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals eine Allergie festgestellt?“
Atopische Dermatitis (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt)	„Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals eine der folgenden Krankheiten festgestellt: Neurodermitis, endogenes Ekzem, atopische Dermatitis?“
Heuschnupfen (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt)	„Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals Heuschnupfen festgestellt?“
Asthma (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt)	„Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals ein Asthma bronchiale festgestellt?“
Pfeifende Atemgeräusche jemals	„Hatte Ihr Kind irgend einmal in seinem Leben beim Atmen pfeifende oder keuchende Geräusche im Brustkorb?“
Pfeifende Atemgeräusche (in den letzten 12 Monaten)	„Hatte Ihr Kind in den letzten 12 Monaten beim Atmen irgendwann pfeifende oder keuchende Atemgeräusche?“
Allergietest (SX1, Pharmacia) Sensibilisierung gegenüber Inhalationsallergenen	Sensibilisierung gegenüber Lieschgras, Roggen, Birke, Beifuß, Hausstaubmilbe (Der p1), Katzenschuppen, Hundeschuppen und Cladosporium herbarum

## 2.2 Allergien

Die Lebenszeitprävalenz für 'Allergie jemals' lag nach Elternangaben in der Untersuchung 2002/03 insgesamt zwischen 28 % in Mannheim und 35 % in Kehl und bei deutschen Kindern zwischen 32 % (Aulendorf/Bad Waldsee) und 38 % (Stuttgart).

Die von den Eltern angegebene Lebenszeitprävalenz für 'Allergie vom Arzt bestätigt' lag in der Untersuchung 2002/03 insgesamt zwischen 19 % in Mannheim und 25 % in Kehl und bei deutschen Kindern zwischen 24 % (Aulendorf/Bad Waldsee) und 25 % (Kehl).

Bei den Lebenszeitprävalenzen von ‚Allergie jemals‘ und ‚Allergie vom Arzt bestätigt‘ ist in den vier Untersuchungsorten über den Zeitraum von 1993 bis 2003 kein ansteigender zeitlicher Trend erkennbar. (Siehe Abbildungen 1 und 2.)

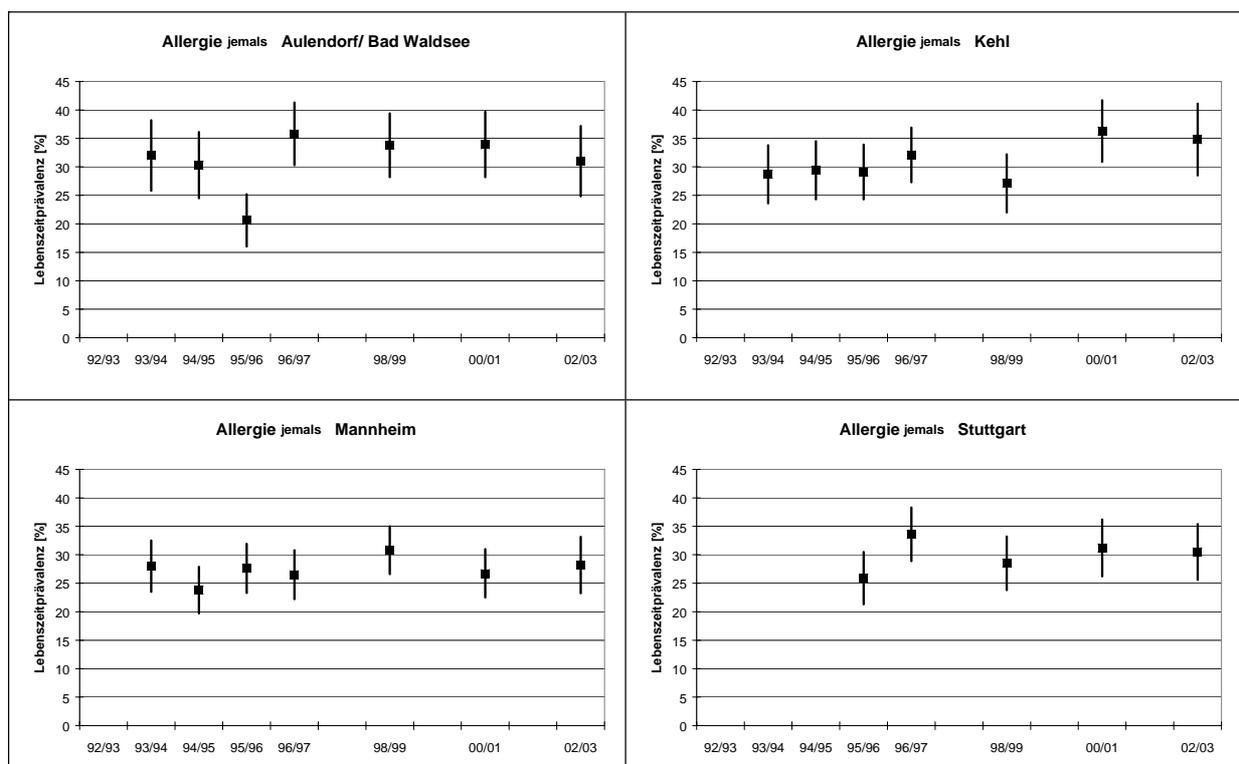
Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei den Lebenszeitprävalenzen von Heuschnupfen und atopischer Dermatitis (vgl. Abbildungen 3 und 4).

Vom Arzt festgestellte Erkrankungen an Heuschnupfen hatten nach den Angaben der Eltern in der Untersuchung 2002/03 zwischen 7 % (Stuttgart) und 11 % (Mannheim) der untersuchten Kinder. Bei deutschen Kindern lagen die berichteten Häufigkeiten zwischen 7% (Kehl) und 13 % (Mannheim).

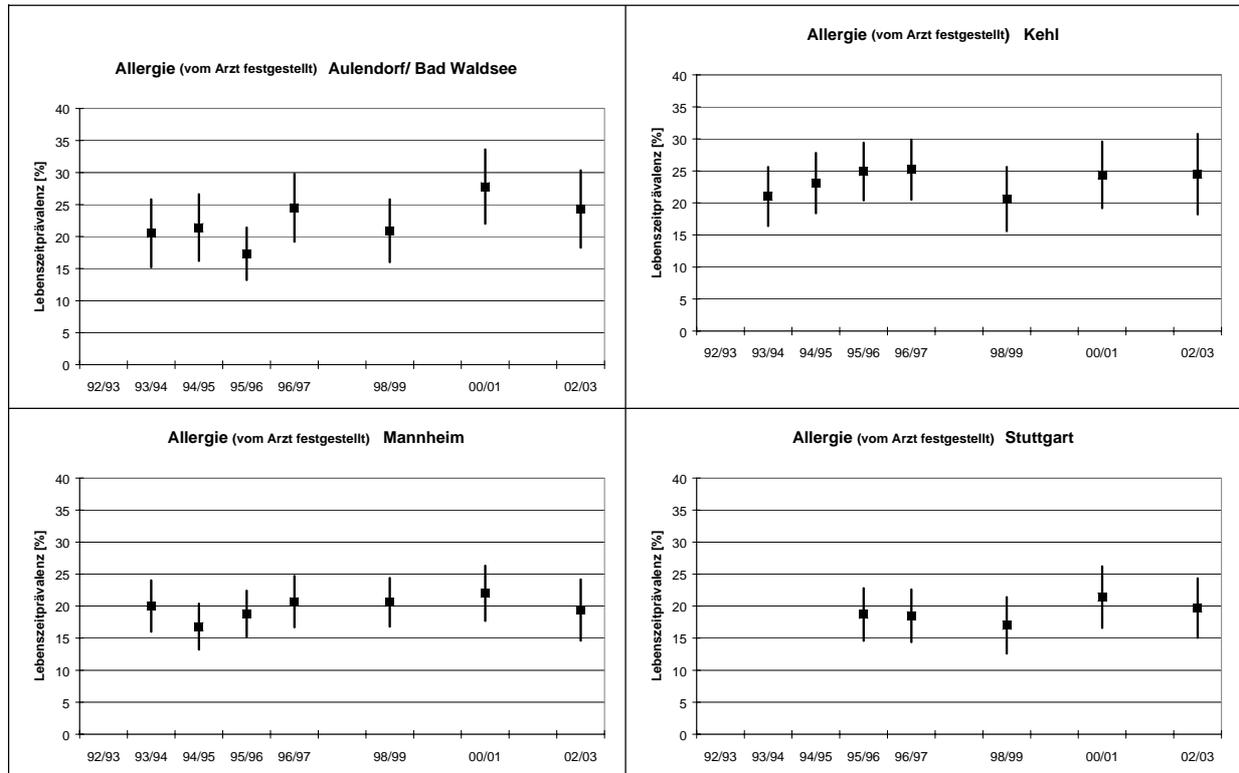
Die Lebenszeitprävalenz von atopischer Dermatitis (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt) schwankte in der Untersuchung 2002/03 zwischen 8 % (Mannheim) und 17 % (Stuttgart). Bei deutschen Kindern lagen die Lebenszeitprävalenzen zwischen 14 % (Mannheim) und 20 % (Stuttgart).

Der Anteil positiver Ergebnisse im Allergie-Screening auf Inhalationsallergene (SX1-Test) lag in der Untersuchung 2002/03 zwischen 28 % in Mannheim und 33 % in Aulendorf/Bad Waldsee. Bei deutschen Kindern: 31 % (Kehl) bis 36 % (Stuttgart). Bei Betrachtung der Untersuchungen von 1995/96 bis 2002/03 ergibt sich für Kinder aus Mannheim und Stuttgart ein niedrigerer Anteil positiver Testergebnisse (SX1, deutsche Kinder). Auch beim Allergiescreening war kein ansteigender Trend zu beobachten (siehe Abbildung 5)

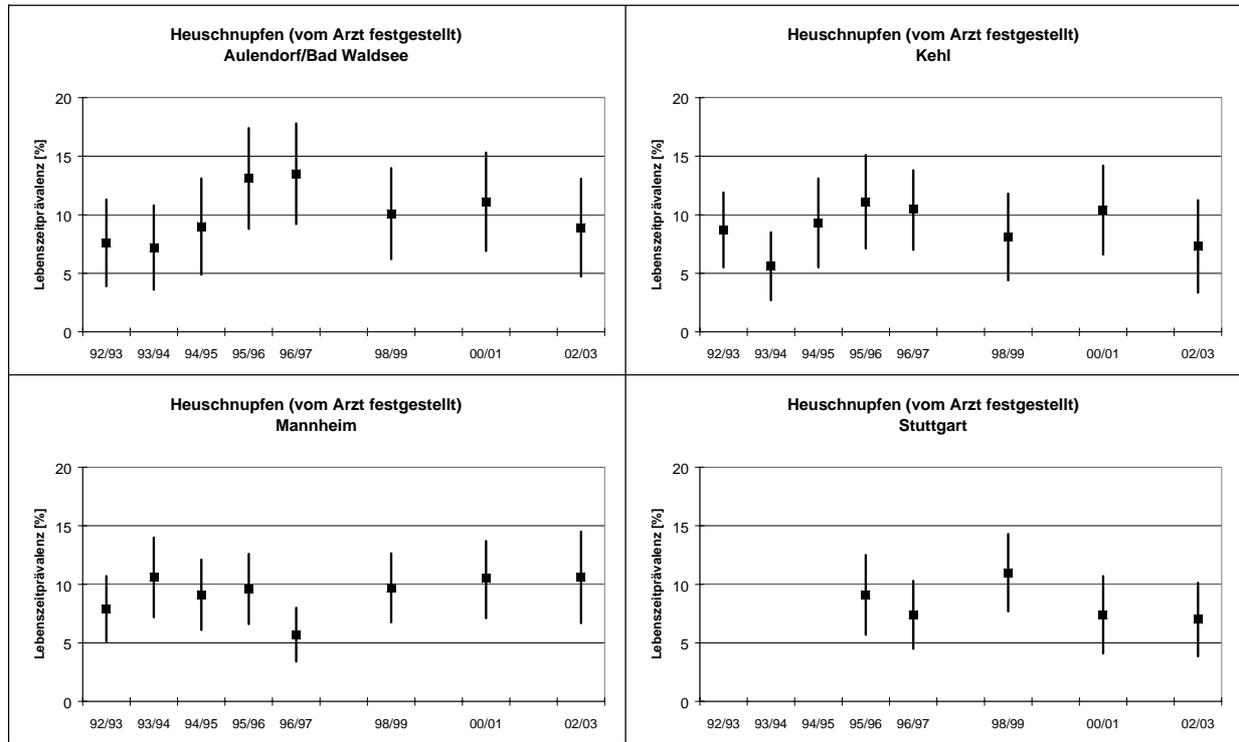
Neben der Nationalität hatten folgende Faktoren einen Einfluss auf die Allergieprävalenz: Bei familiärer Disposition, d.h. einer atopischen Erkrankung bei Eltern oder Geschwistern, war das Risiko für eine vom Arzt festgestellte Allergie etwa doppelt so hoch wie bei Kindern, in deren Familie bis zum Zeitpunkt der Untersuchung keine atopische Erkrankung aufgetreten war. Bei Kinder mit mehr als einem Geschwisterkind war das Allergierisiko geringer (OR 0,7, KI 0,6-0,8) als bei Einzelkindern oder Kindern mit einem Geschwisterkind. Deutsche Kinder hatten häufiger Allergien als Kinder anderer Nationalität.



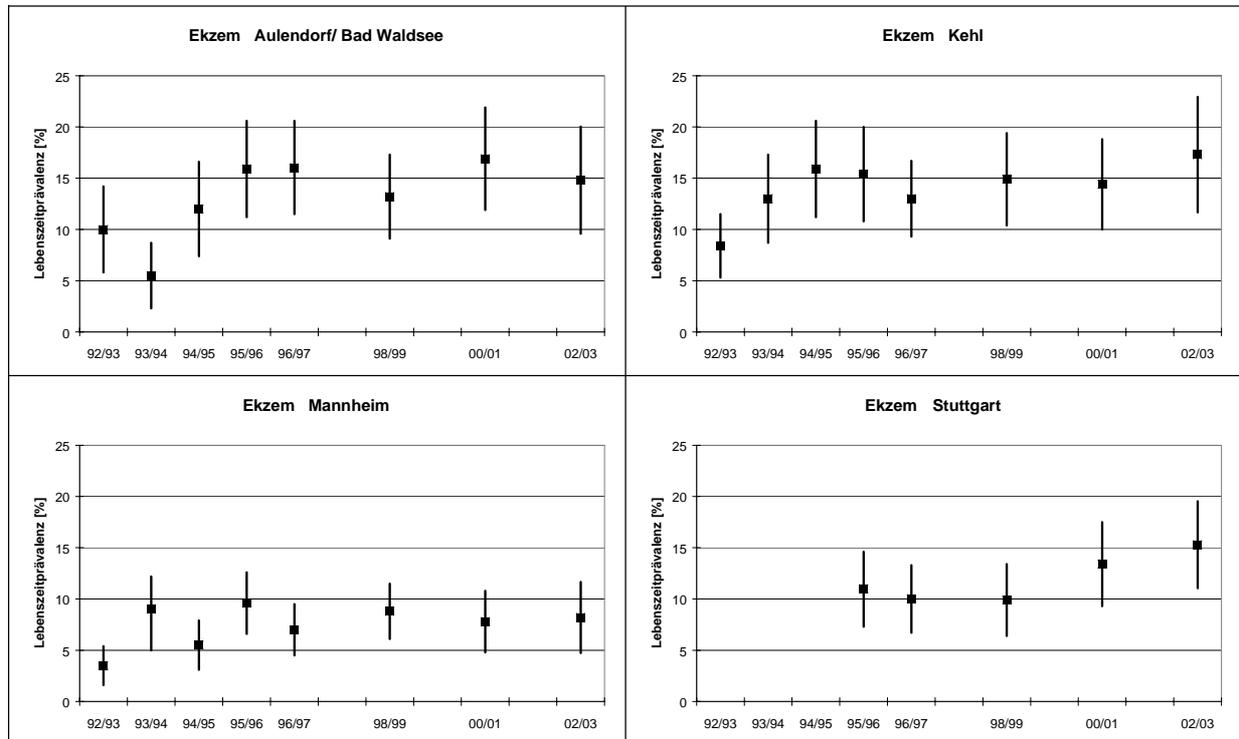
**Abb. 1:** ‚Allergie jemals‘ bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1993/94 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv



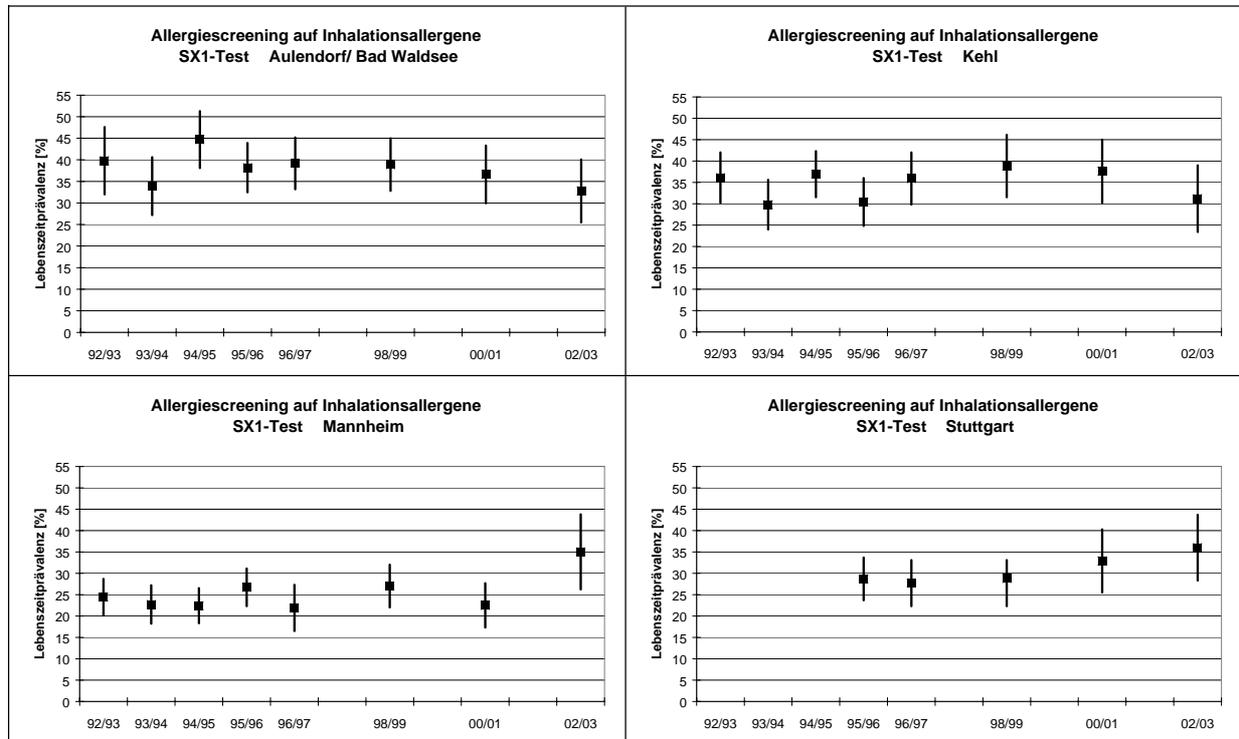
**Abb. 2:** Allergie (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1993/94 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv



**Abb. 3:** Heuschnupfen (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv



**Abb. 4:** Atopische Dermatitis (nach Elternangaben vom Arzt bestätigt) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle



**Abb. 5:** Prävalenz positiver Ergebnisse im SX1-Test (Allergiescreening auf Inhalationsallergene) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03 mit 95 %-Konfidenzintervallen; Gesamtkollektiv

### 2.3 Asthma

Von einer Erkrankung an Asthma bronchiale wird im Folgenden ausgegangen, wenn bei der Frage: „Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals eine der folgenden Krankheiten festgestellt?“ von den Eltern die Diagnose ‚Asthma bronchiale‘ (A) bejaht wurde.

Die Lebenszeitprävalenzen des Asthma bronchiale lagen 2002/03 zwischen 4 % (Aulendorf/Bad Waldsee) und 6 % (Stuttgart). Bei den deutschen Kindern schwankten die Prävalenzen zwischen 3 % und 8 %.

Von einer asthmatischen Erkrankung im weiteren Sinne wird ausgegangen, wenn bei der Frage: „Hat ein Arzt bei Ihrem Kind jemals eine der folgenden Krankheiten festgestellt?“ von den Eltern wenigstens eine der Diagnosen ‚Asthma bronchiale‘ (A) oder ‚asthmoide, spasti-

sche oder obstruktive Bronchitis' (B) bejaht wurde. Die positiven Antworten zu ‚asthmoider, spastischer oder obstruktiver Bronchitis‘ wurden berücksichtigt, um evtl. in der klinischen Praxis als Synonyme für Asthma verwendete Diagnosen zu erfassen.

Die von den Eltern berichtete Lebenszeitprävalenz von Asthma im weiteren Sinne lag 2002/03 zwischen 9 % (Mannheim) und 11,5 % (Kehl). Bei deutschen Kindern schwankte die Prävalenz zwischen 11 % (Aulendorf/Bad Waldsee) und 14 % (Mannheim).

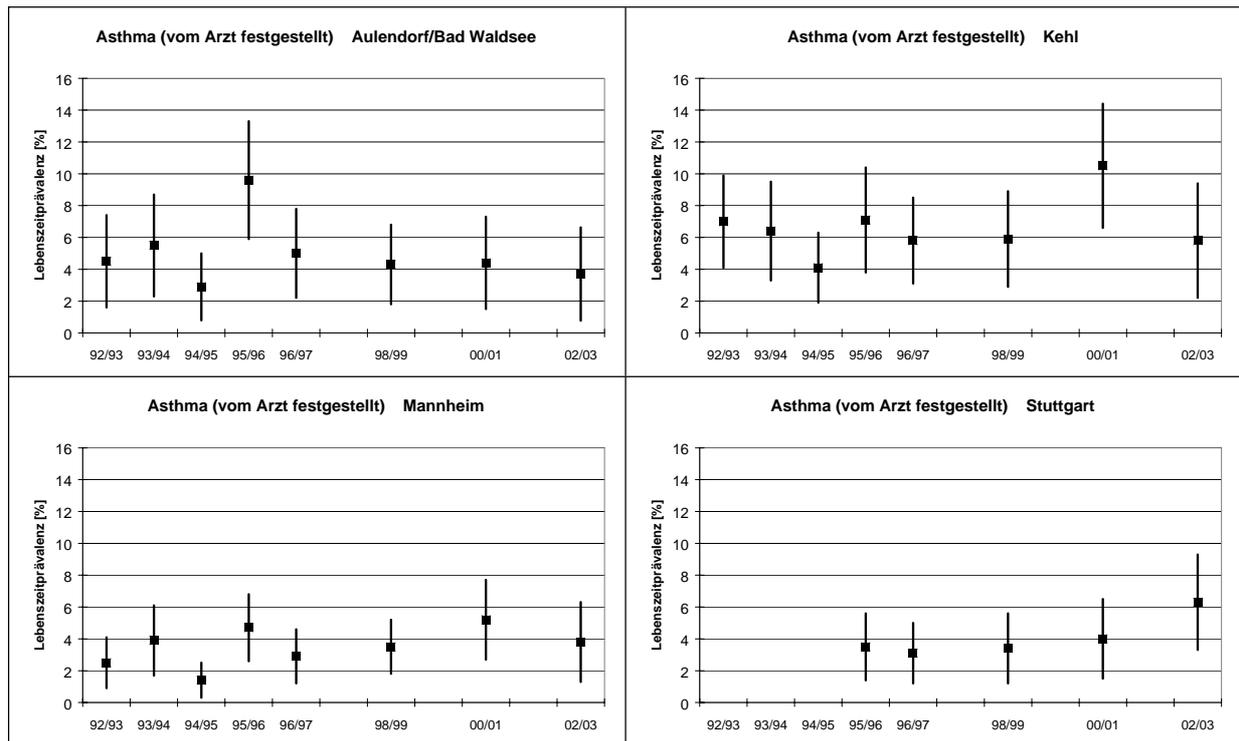
In den Untersuchungen von 1992/93 bis 2002/03 zeigte die Prävalenz von Asthma bronchiale und Asthma im weiteren Sinne bisher keine einheitliche Tendenz (siehe Abb. 6 und 7.) Ein Anstieg der Asthmahäufigkeiten lässt sich anhand der Daten bisher nicht erkennen.

Dies wird auch gestützt durch die Prävalenzen spezifischer Asthmasymptome. Die von den Eltern angegebene Lebenszeitprävalenz pfeifender oder keuchender Atemgeräusche im Brustkorb bei zehnjährigen Schulkindern schwankte zwischen 22 % (Mannheim) und 24 % (Kehl). Bei deutschen Kindern lagen die Prävalenzen zwischen 25 % (Kehl) und 32 % (Mannheim). Die Jahresprävalenz pfeifender oder keuchender Atemgeräusche im Brustkorb lag nach Angaben der Eltern zwischen 5 % (Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl) und 10 % (Stuttgart). Bei den deutschen Kindern schwankten die Prävalenzen im Bereich von 5% (Aulendorf/Bad Waldsee) und 11 % (Mannheim).

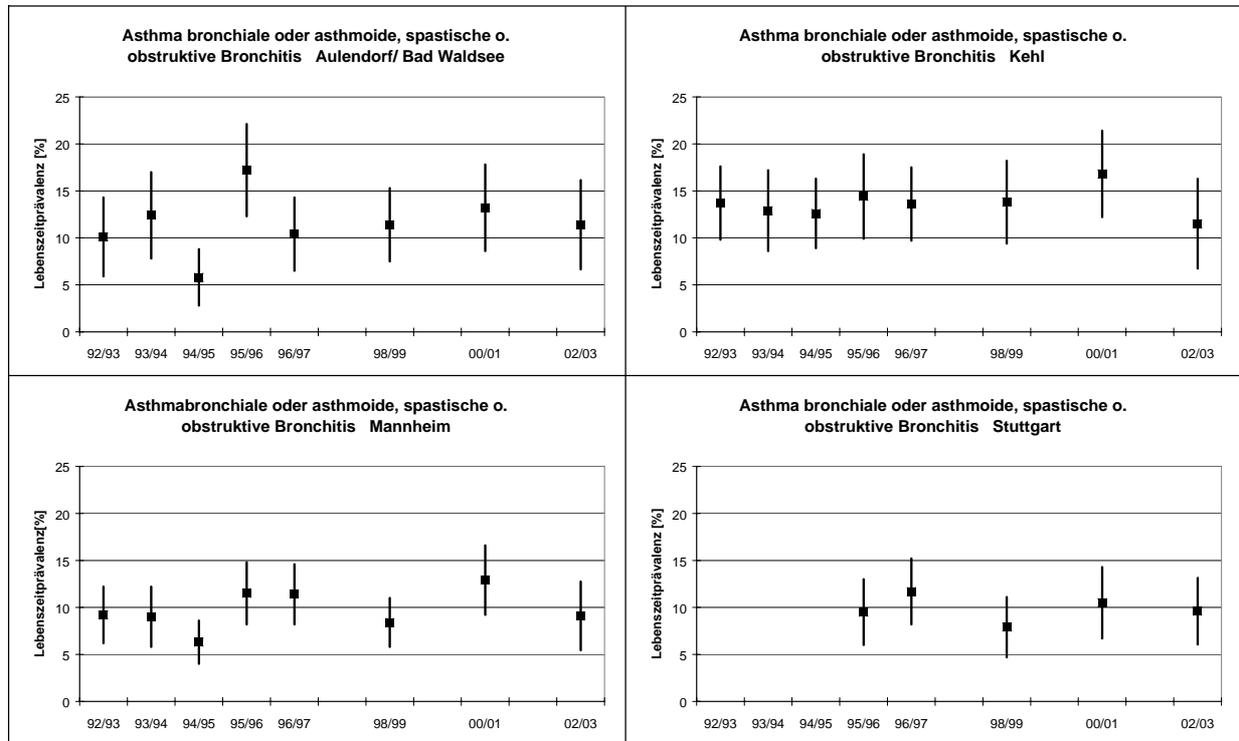
In den Untersuchungen von 1992/93 bis 2002/03 weist weder die Lebenszeitprävalenz noch die Jahresprävalenz pfeifender oder keuchender Atemgeräusche im Brustkorb eine deutliche Tendenz auf (siehe Abb. 8 und 9.) Insbesondere lässt sich auch bei Berücksichtigung möglicher Confounder kein Anstieg der Häufigkeit in dem beobachteten Zeitraum erkennen.

Bei 4 % bis 10 % der untersuchten Kinder wurde nach Elternangaben von einem Arzt Asthma bronchiale diagnostiziert. Verwendet man die Definition von Asthma im weiteren Sinne, d.h. unter zusätzlicher Berücksichtigung positiver Antworten zu ‚asthmoider, spastischer oder obstruktiver Bronchitis und unter Berücksichtigung möglicher "falsch positiver" Angaben, kann man von einer tatsächlichen Asthmaprävalenz von ca. 6 % bis 11% ausgehen. Wesentlichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung haben die familiäre Disposition

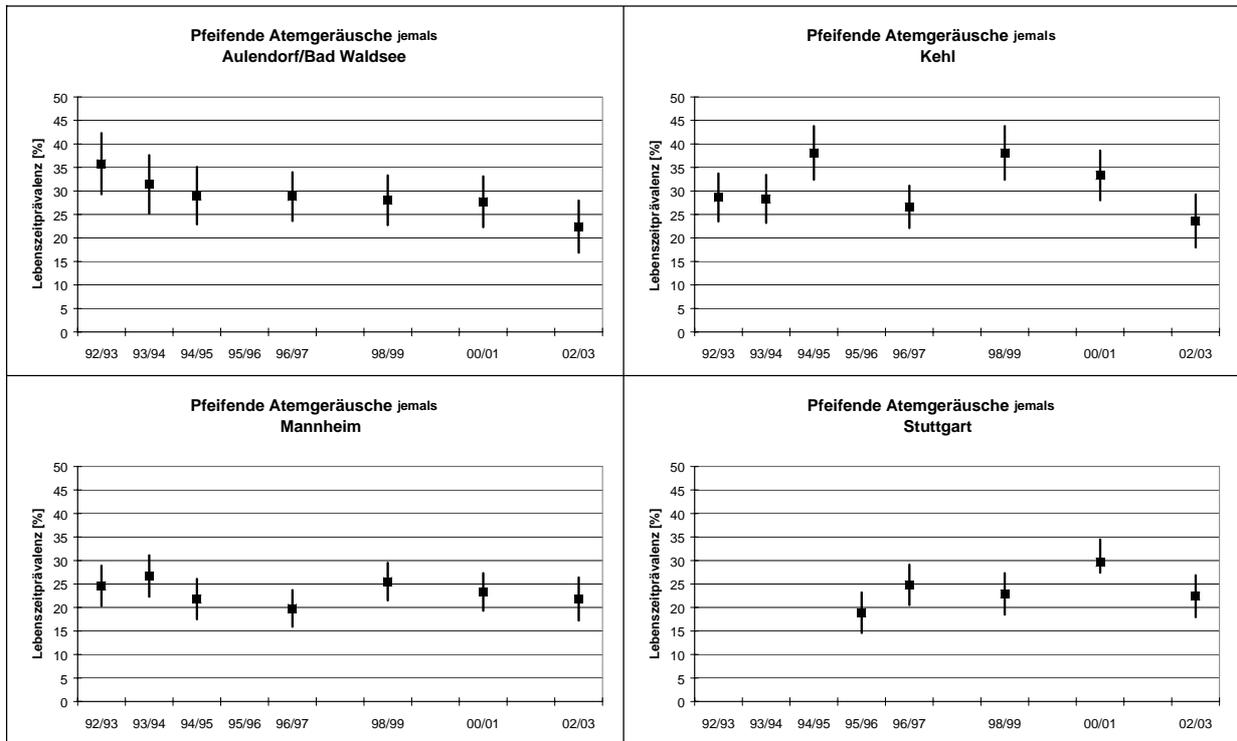
zu atopischen Erkrankungen und das Geschlecht, wobei Jungen häufiger erkranken als Mädchen. Es gibt Hinweise aus anderen Studien, dass Kinder, die auf Bauernhöfen aufwachsen, seltener erkranken. Da an der vorliegenden Untersuchung nur sehr wenige Kinder aus Familien mit Landwirtschaftsbetrieben teilgenommen hatten, konnte dieser Zusammenhang nicht näher untersucht werden.



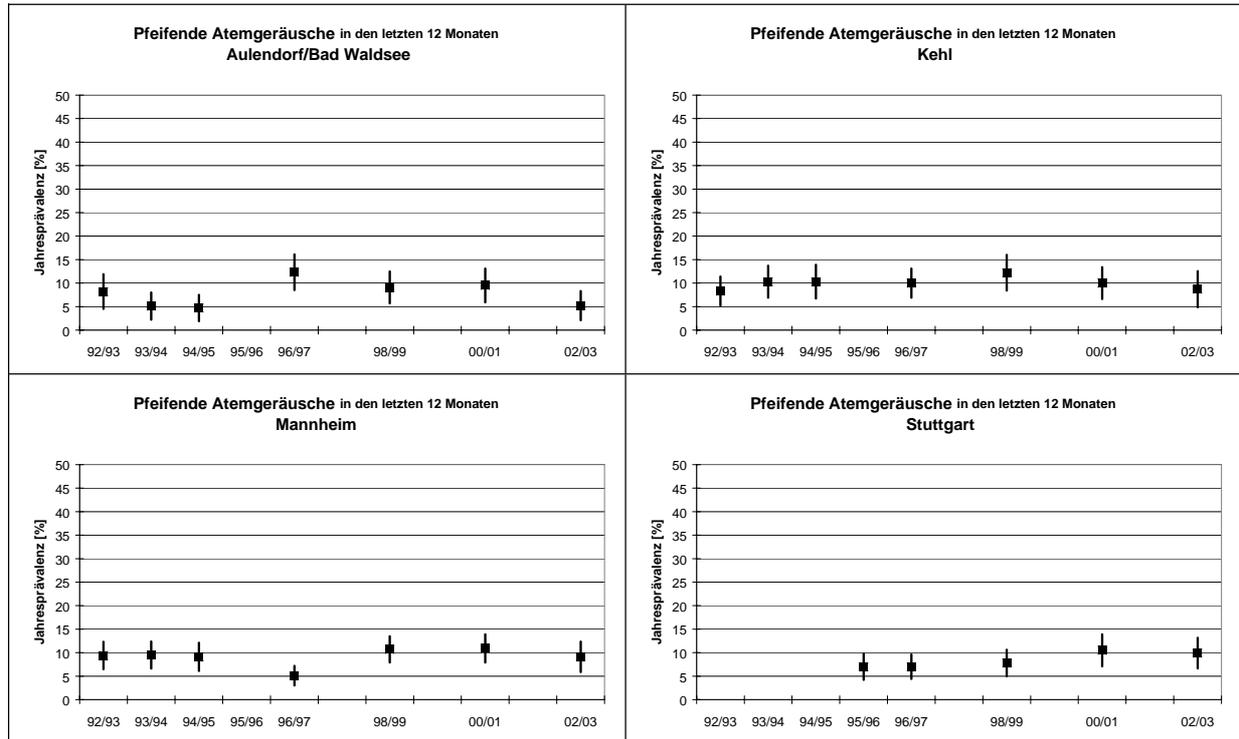
**Abb. 6:** Asthma bronchiale (A) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv



**Abb. 7:** Asthma im weiteren Sinne (A oder B) bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv

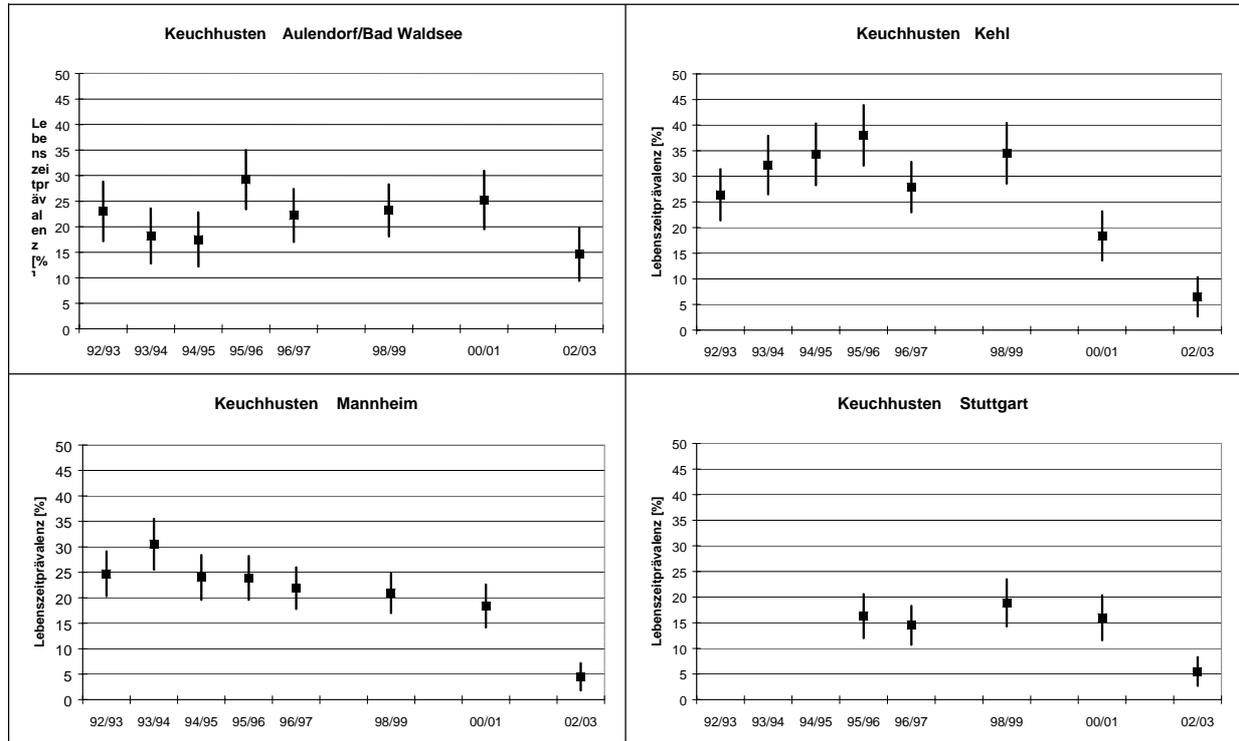


**Abb. 8:** Pfeifende Atemgeräusche jemals bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv

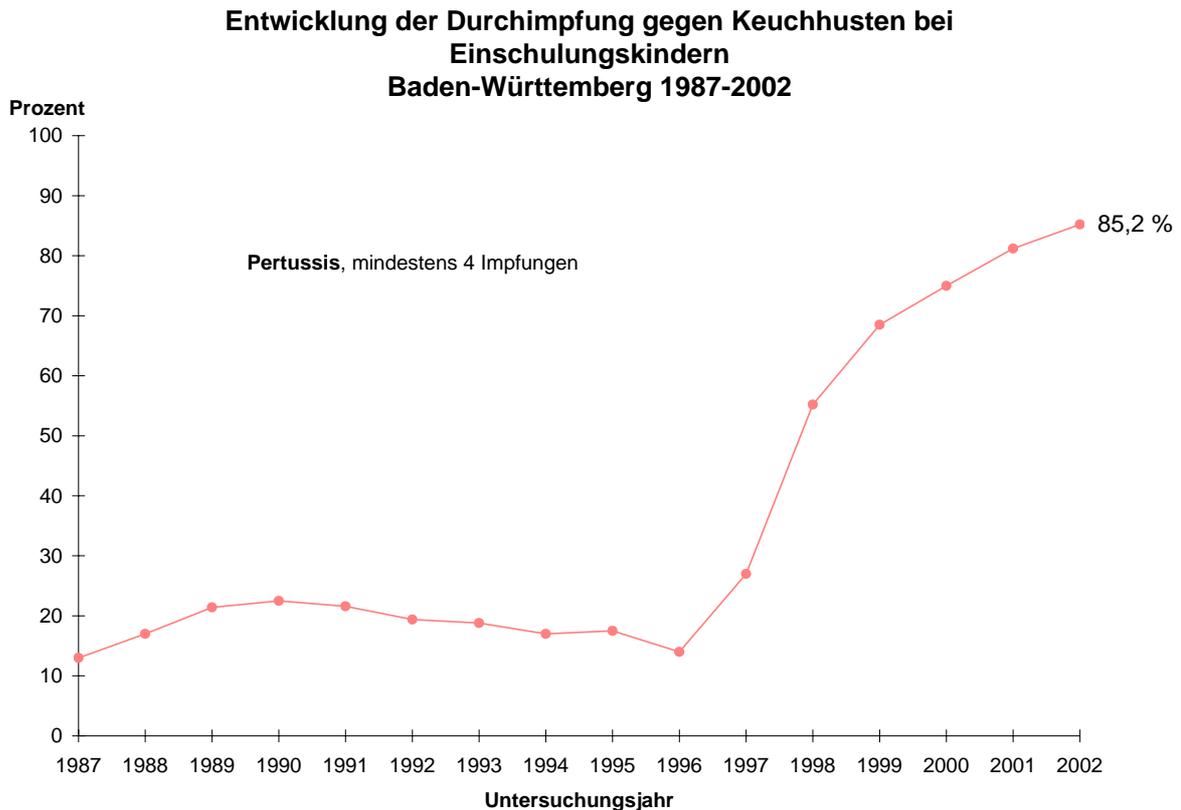


**Abb. 9:** Pfeifende Atemgeräusche in den letzten zwölf Monaten bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Jahresprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv

Bei der Untersuchung der Atemwegserkrankungen fiel noch auf, dass die Lebenszeitprävalenz von Keuchhusten in den letzten Querschnittsuntersuchungen deutlich abgenommen hatte. In den Untersuchungen des Projektes zeigte die Prävalenz des Keuchhustens in den Jahren 2000 bis 2003 einen deutlichen Rückgang in allen Untersuchungsorten (siehe Abb. 10). Die berichtete Häufigkeit lag 2002/03 nur noch bei einem Viertel der 1995/96 berichteten Raten (OR = 0,24; 95%-KI: 0,17 - 0,33). Dieser Rückgang steht im Zusammenhang mit einer Zunahme der Impfungen gegen Keuchhusten. In Abbildung 11 sind die seit 1987 bei Schulanfängern erhobenen Durchimpfungsraten gegen Keuchhusten dargestellt. Für die meisten der im Winterhalbjahr 2002/03 untersuchten Viertklässler wurde der Impfstatus 1998 in der Einschulungsuntersuchung erhoben. Der geringere Rückgang des Keuchhustens in Aulendorf/Bad Waldsee erklärt sich wahrscheinlich durch eine niedrigere Durchimpfungsrate. Von den Schulanfängern im Jahr 1998 waren im Landkreis Ravensburg, in dem Aulendorf und Bad Waldsee liegen, 41 % gegen Pertussis geimpft im Vergleich zu 65 % in Stuttgart und Mannheim und 60 % im Ortenaukreis (Quelle: Landesgesundheitsamt, Einschulungsuntersuchungen).



**Abb. 10:** Keuchhusten bei zehnjährigen Schulkindern in Aulendorf/Bad Waldsee, Kehl, Mannheim und Stuttgart 1992/93 bis 2002/03; Lebenszeitprävalenzen und 95 %-Konfidenzintervalle; Gesamtkollektiv



**Abb. 11:** Durchimpfungsraten gegen Keuchhusten bei Schulanfängern in Baden-Württemberg

Eine weiterführende Beschreibung der aktuellen Ergebnisse gibt der Bericht zum Projekt Beobachtungsgesundheitsämter (2005): „Belastungs- und Wirkungsmonitoring, Untersuchung 2002/03 - Ergebnisse und Bewertung-“. Eine herunterladbare Berichtsversion ist zu finden unter dem Link: [www.gesundheitsamt-bw.de/servlet/PB/show/1182617/beobgä.bericht02-03.050608.pdf](http://www.gesundheitsamt-bw.de/servlet/PB/show/1182617/beobgä.bericht02-03.050608.pdf).

Die Untersuchung, aus der die vorgestellten Ergebnisse stammen, wäre nicht möglich gewesen ohne das außergewöhnliche Engagement der Kolleginnen und Kollegen:

A. Felder-Kennel, P. Eickhoff, T. Gabrio, G. Horras-Hun, B. Kouros, H. Knebel,  
M. Kirsch, G. Korbl, D. Krämer, B. Link, V. Maisner, I. Piechotowski, U. Weidner,  
D. Rzonca, E. Schindler und M. Schrimpf.

### 3 Schimmelpilz-Exposition: Pathomechanismus und Krankheitsbilder

Heidrun Behrendt, Bernadette Eberlein-König, Christa Lemmen

#### 3.1 Erkrankungen durch Schimmelpilze (Überblick)

Schimmelpilze können - wie Pollen, Tierhaare und Milben – bei entsprechend sensibilisierten Personen zu allergischen Atemwegserkrankungen führen. Ansonsten sind Schimmelpilzaerosole bei üblicher Exposition nicht pathogen. Barrieremechanismen von Haut und Schleimhäuten und Phagozytose durch neutrophile Granulozyten und Makrophagen führen zu einer erheblichen Resistenz des Menschen gegenüber Schimmelpilzen in der Atemluft (Tabelle 1).

**Tab. 1:** Abwehrmechanismen gegen Schimmelpilzaerosole

Barrierefunktion von Haut und Schleimhäuten Haut : saurer pH-Wert; antifungische Aktivität ungesättigter Fettsäuren Schleimhaut: Zilienaktivität im oberen Respirationstrakt; IgA-Sekretion; Mukusbildung
Phagozytose durch PMN und Makrophagen
Aktivierung des alternativen Komplementweges
Spezifische zelluläre Immunität (eher schwach)

Infektionen durch fakultativ pathogene Arten werden nur bei Patienten mit ausgeprägter Immunschwäche beobachtet. Massive berufliche Exposition (z. B. in der Landwirtschaft oder in der Lebensmittelindustrie) kann in seltenen Fällen zu allergischer oder toxischer Alveolitis führen. Typisch für Schimmelpilz-Exposition in Innenräumen sind (neben den Allergien) unspezifische Beschwerden, vergleichbar dem Sick-Building-Syndrom (SBS). Man geht davon aus, dass die Inhalation von toxischen Stoffwechselprodukten und Pilzbestandteilen zu dem Beschwerdekomples führt oder dazu beiträgt, da in feuchten Wohnräumen neben Schimmelpilzen in der Regel auch Bakterien vermehrt auftreten. Insbesondere für Kinder ist der Zusammenhang zwischen Erkrankungen der oberen und unteren Atemwege und feuchten Wohnungen durch etwa 40 Studien aus verschiedenen Ländern gut belegt [Rylander & Etzel 1999]. Erkrankungen durch Schimmelpilze lassen sich somit in drei große Bereiche gliedern:

- opportunistische Infektionen,
- Allergien
- toxische Erkrankungen

Bei den toxischen Erkrankungen ist zu unterscheiden zwischen toxisch-entzündlichen Atemwegserkrankungen einerseits und den eigentlichen Mykotoxikosen, deren Quelle kontaminierte Lebensmittel sind.

### 3.2 Mykosen – Infektionen durch Schimmelpilze

Mykosen durch Schimmelpilze entstehen meist durch Inhalation fakultativ pathogener Arten. Sie sind opportunistischer Natur und setzen eine stark ausgeprägte Abwehrschwäche des Wirtes voraus. Der primäre Infektionsherd ist meist die Lunge, seltener die Nebenhöhlen, das Ohr oder die traumatisierte Haut. Vom Respirationstrakt aus können die Erreger hämatogen und/oder lymphogen disseminieren und andere innere Organe befallen. Mykosen durch Schimmelpilze führen zu schweren Krankheitsbildern mit schlechter Prognose. Bei Transplantationen (Lunge, Leber, Knochenmark) lassen sich 9 bis 17% der Todesfälle auf eine Aspergillose zurückführen [Pattersen 1999]. Im Klinikbereich erfolgen die Infektionen häufig nosokomial durch kontaminiertes Material (Implantate, Katheter), auch Baumaßnahmen in Kliniken sind mit Infektionen assoziiert. Bei hoher beruflicher Exposition kann eine unbenmerkte Kolonisation vor intensivmedizinischen Maßnahmen vorliegen und in der Folge zu Komplikationen führen. Am bedeutendsten sind die Aspergillosen und die Mucormykosen. Schwärzepilze (Dematiaceae) und hyaline Pilze (Fusarien u. a.) gehören nicht zu den klassischen Opportunisten, treten in den letzten Jahren aber verstärkt als Erreger von Mykosen auf [Walsh & Groll 1999]. Generell sind die Krankheitsbilder wenig charakteristisch.

Mykosen durch Schimmelpilze können sich nur unter bestimmten Voraussetzungen entwickeln. Der prädisponierende Faktor von Seiten des Wirtes ist eine ausgeprägte Abwehrschwäche, im einzelnen gehören hierzu: immunsuppressive Therapien bei Organ- und Knochenmarkstransplantationen, Leukämie und andere Hämoblastosen, Neutropenie, zytostatische Therapien oder Therapien mit hochdosierten Cortikosteroiden, Lungenerkrankungen (Tuberkulose, chronische Bronchitis, Bronchiektasen), diabetische Ketoazidose, Autoimmunerkrankungen, AIDS (manifeste Erkrankung), Mukoviscidose, Leberdysfunktionen (chronischer Alkoholismus, chronische Hepatitis B und C), traumatisierte Haut (Verbrennungen) [Mücke & Lemmen 1999].

Zu den Voraussetzungen für eine Infektion mit Schimmelpilzen gehören von Seiten des Erregers zunächst die Fähigkeit bei 37°C zu wachsen und eine alveolengängige Sporengroße. So sind fast alle Aspergillusarten thermotolerant und haben kleine Sporen (2-3 µm). Penicillien haben ebenfalls kleine Sporen, weisen aber kaum thermotolerante Vertreter auf und spielen somit als Erreger von Mykosen keine Rolle.

Pathogenitäts- oder gar Virulenzfaktoren sind bei Schimmelpilzen kaum bekannt. Vor allem *Aspergillus fumigatus* weist eine Reihe von Voraussetzungen für parasitäres Wachstum auf. Neben der Thermotoleranz und den alveolengängigen Konidien sind dies Adhäsionsfaktoren, Proteasen und Toxine: Adhäsionsfaktoren verhindern, dass der keimentfernende Sekretstrom wirksam wird; Proteasen wie Elastase und Kollagenase wirken als Invasine und schädigen, wie auch Toxine, den Wirt durch Gewebnekrose. Bei *Aspergillus fumigatus* ist die Fähigkeit zur Produktion von Elastase korreliert mit der Virulenz in Mäusen (das Lungengewebe besteht zu 30% aus Elastin). Tabelle 2 gibt einen Überblick über bisher bekannte Pathogenitätsfaktoren bei Schimmelpilzen.

**Tab.2:** Pathogenitätsfaktoren bei Schimmelpilzen [*Behrendt & Lemmen 2002*]

Adhäsionsfaktoren	<i>Aspergillus</i> sp. bindet an Fibrinogen und Laminin
Komplementinhibierender Faktor	nachgewiesen bei <i>A. fumigatus</i> und <i>A. flavus</i>
Enzyme	Proteasen (Kollagenase, Elastase), Katalase, Phospholipase; nachgewiesen bei <i>Aspergillus</i> sp.
Toxine	Gliotoxin (zytotoxisch, immunsuppressiv), LPS-Protein-Komplex (Endotoxin-ähnlich); nachgewiesen bei <i>A. fumigatus</i>
Melanin	Schutz vor Phagozytose bei Schwärzepilzen

### 3.3 Allergien durch Schimmelpilze

#### Allergieformen

Inhalation von Schimmelpilzsporen aber auch von allergenhaltigen Fragmenten kann Rhinokonjunktivitis, Sinusitis, Asthma bronchiale, in seltenen Fällen eine exogen-allergische Alveolitis (EAA) oder eine allergische bronchopulmonale Aspergillose (ABPA) auslösen. Am häufigsten führen Schimmelpilze zu allergischer Rhinitis (Heuschnupfen) und allergischem Asthma, beides Typ I Allergien nach der Einteilung von Coombs und Gell (Tabelle 3).

Typ I-Reaktionen umfassen die charakteristischen Antikörper-vermittelten Sofortreaktionen. Hierbei handelt es sich um eine immunologische Reaktion des Körpers auf einen Fremdstoff (Allergen). Typ-1-Allergene sind Proteine oder Glykoproteine mit einem Molekulargewicht >10 Kilodalton. Sie werden von speziellen Zellen des Immunsystems aufgenommen, verarbeitet und auf der Zelloberfläche präsentiert, so dass über die Vermittlung von T-Helfer-2-Zellen (Th-2-Zellen) die Bildung von allergenspezifischen Immunglobulin E (IgE) angeregt wird. Diese führen in Verbindung mit dem spezifischen Allergen im weiteren Verlauf zu den für diese Allergien typischen entzündlichen Reaktionen.

Typ III-Reaktionen liegen den Symptomen der allergischen Alveolitis, einer grippeähnlichen Lungenerkrankung, zugrunde. Hierbei kommt es zur Bildung von Immunglobulin G und Immunglobulin M und zur Bildung von Immunkomplexen. Die EAA trägt aber auch Züge einer Typ-IV-Reaktion. Bei dieser Allergieform handelt es sich um zellvermittelte, verzögerte Reaktionen.

Der exogen allergischen bronchopulmonalen Aspergillose (ABPA) liegen drei pathogenetische Mechanismen zugrunde: eine Typ-I-Reaktion auf Aspergillus-Antigene (Asthma), eine Spätreaktion auf Aspergillus-Antigene (EAA) und die Absiedlung von Aspergillen in den Bronchien und im Lungengewebe.

**Tab. 3:** Typen der Allergie nach Coombs und Gell

Typ I	Soforttyp IgE-vermittelt Th2-dominierte Immunantwort	allerg. Rhinitis, Asthma, Urticaria (atopisches Ekzem) u.a.
Typ II	zytotoxisch	hämolytische Anämie, Thrombozytopenie, Purpura u.a.
Typ III	IgG-Immunkomplex-vermittelt	allerg. Vaskulitis, Immunkomplex-Alveolitis, Immunkomplex-Arthritis
Typ IV	verzögerte Reaktion Zell-vermittelt Th1-dominierte Immunantwort	allerg. Kontaktekzem Arzneimittel-Exanthem (atopisches Ekzem)

Exogen-allergische Alveolitis: Kombination aus Typ III und Typ IV

Exogen allergische bronchopulmonale Aspergillose: Kombination aus Typ I und Typ III

### Allergene von Schimmelpilzen

Bisher sind etwa 100 Pilzarten als Auslöser von Allergien dingfest gemacht. Am häufigsten werden Sensibilisierungen gegenüber *Alternaria alternata*, *Aspergillus fumigatus*, *Cladosporium herbarum* und *Penicillium chrysogenum* (notatum) festgestellt. Die üblichen Allergiescreening-Methoden beruhen weitgehend auf einer Testung dieser vier Arten. Die Sporen und in seltenen Fällen auch Myzelteile fungieren als Träger von Allergenen. Obwohl die allergene Wirkung von Pilzsporen schon seit langem bekannt ist, ist die Charakterisierung der Pilzallergene noch nicht sehr fortgeschritten. Dies hängt mit der Komplexität der Pilze und ihren unterschiedlichen Wachstumsphasen zusammen, die zu einer ausgeprägten Allergenvielfalt führen. So sind (bisher) von *Aspergillus fumigatus* ca. 40 Allergene bekannt [Jäger 2001]. Von *Aspergillus fumigatus* [Crameri 2002], *Alternaria alternata* und *Cladosporium herbarum* [Breitenbach & Simon-Nobbe 2002] sind in den letzten Jahren zahlreiche Allergene kloniert und hinsichtlich ihrer biologischen Funktion aufgeklärt worden (Tabelle 4). Wie aus der Tabelle hervorgeht, sind viele Allergene abbauende Enzyme des intrazellulären Stoffwechsels. Die Majorallergene von *A. alternata* (Alt a 1), *C. herbarum* (Cla h 1) und *A. fumigatus* (Asp f 1) werden (vermutlich bei der Reifung der Sporen) sezerniert. Einige Allergene sind spezies-übergreifend, so ist die Enolase (ein glykolytisches Enzym) auch ein Allergen von *Candida albicans* sowie von *Hevea brasiliensis*. Die Kenntnis der einzelnen Allergene und ihre Verfügbarkeit als rekombinante Proteine dürften in Zukunft wesentlich zum Verständnis von Pilzallergien und den zugrunde liegenden pathogenetischen Mechanismen beitragen.

**Tab. 4:** Relevante Schimmelpilz-Allergene: cloniert und rekombinant verfügbar (Auswahl \* nach [Cramer 2002, Breitenbach & Simon-Nobbe 2002])

Spezies	Allergen	Biologische Funktion	MW (kD)
<b>Aspergillus fumigatus</b>			
	Asp f 1	Ribotoxin	17
	Asp f 2	Fibrinogen-bindendes Protein ?	37
	Asp f 3	Peroxisomales Protein	19
	Asp f 5	Metalloprotease	42
	Asp f 6	Mn-Superoxiddismutase	23
	Asp f 8	Ribosomales Protein P2	11
	Asp f 10	Aspartatprotease	34
	Asp f 11	Cyclophylin	19
	Asp f 12	Hitze-Schock-Protein 70	65
	Asp f 13	Alkalische Serinprotease	34
	Asp f 15	Serinprotease	20
	Asp f 18	Vakuoläre Serinprotease	34
<b>Alternaria alternata</b>			
	Alt a 1	unbekannt	28
	Alt a 3	Hitze-Schock-Protein 70	–
	Alt a 4	Proteindisulfid-Isomerase	57
	Alt a 5	Enolase	45
	Alt a 6	Saures ribosomales Protein	11
	Alt a 7	YCP4 homologes Protein	22
	Alt a 10	Aldehyddehydrogenase	53
	Alt a 12	Saures ribosomales Protein	11
<b>Cladosporium herbarum</b>			
	Cla h 1	unbekannt	13
	Cla h 3	Aldehyddehydrogenase	53
	Cla h 4	Saures ribosomales Protein P2	11
	Cla h 5	YCP4 homologes Protein	22
	Cla h 6	Enolase	46
	Cla h 12	Saures ribosomales Protein P1	11

\* Es wurden überwiegend Allergene aufgeführt mit bekannter biochemischer Funktion

### Prävalenz von Schimmelpilzallergien

Nach Schätzungen dürften etwa 3-5% der Gesamtbevölkerung in der Allergietestung positiv auf Schimmelpilze reagieren, in der Gruppe der Atopiker sind es vermutlich 20%, in der Gruppe der Asthmatiker bis zu 30% [Helbling & Reimers 2003]. Patienten mit Schimmelpilzallergien reagieren meist auf mehrere ubiquitäre Inhalationsallergene und auf verschiedene

Pilzextrakte; das Auftreten einer Monosensibilisierung wird auf <1% geschätzt [Horner et al. 1995]. Schimmelpilze sind somit keine dominanten Allergenträger. Extramurale Schimmelpilze (*Cladosporium*, *Alternaria*, *Epicoccum*, *Fusarium*) sind in Bezug auf Sensibilisierung und Auslösung von allergischen Symptomen bedeutender als die typischen Schimmelpilze des Innenraums. Allerdings finden sich in den Sommermonaten die Konidien der Aussenluftpilze regelmäßig auch in Innenräumen (Tabelle 5). Zusätzlich zu den Schimmelpilzen sind auch die Sporen der Ständerpilze (Basidiomyceten) bedeutende Allergene, diese werden in der Allergietestung im Allgemeinen nicht berücksichtigt, die Datenlage hierzu ist sehr spärlich.

**Tab. 5:** Jahreszeitliches Auftreten von Symptomen auf Schimmelpilze

Spezies	Typisches Vorkommen	Jahreszeitl. Auftreten	Überlagerung mit anderen Allergenträgern
<i>Alternaria</i> <i>Cladosporium</i> <i>Epicoccum</i> <i>Fusarium</i>	extramural	saisonal (Mai-Okt)	Gräserpollen, Beifusspollen
<i>Aspergillus</i> <i>Penicillium</i>	extra- /intramural	perennial	Hausstaubmilben
Basidiomyceten	extramural	saisonal	Gräserpollen, Beifusspollen

Asthma ist die Hauptmanifestation IgE-vermittelter Allergien durch Schimmelpilze. Dies gilt nicht nur für kleine Sporen, sondern auch für die relativ großen Sporen von *Alternaria*, *Cladosporium* und anderen Feldpilzen. Offensichtlich lösen sich viele Allergene leicht von den Trägern ab und gelangen so bis in die Alveolen. Asthma bronchiale ist eine chronisch entzündliche Erkrankung der Atemwege, charakteristische Merkmale sind eine anfallsweise auftretende Atemnot und eine Überempfindlichkeit der Atemwege gegen Reize unterschiedlicher Art. Unter allergischem Asthma versteht man ein durch immunologische Mechanismen mediertes Asthma, im Gegensatz zu dem nicht-allergischem Asthma. Kindliches Asthma ist zu über 90% allergisch bedingt und beruht auf einer Sensibilisierung gegen luftgetragene Allergene.

### **Epidemiologische Untersuchungen**

Sensibilisierung auf *Alternaria alternata* scheint ein besonderer Risikofaktor für Asthma zu sein; dies konnte gezeigt werden für Entwicklung und Persistenz, Schweregrad und für lebensbedrohliche Attacken [O`Hollaren et al. 1991, Targonski et al. 1995, Black et al. 2000, Lin & Williams 2003, Dales et al. 2003, Bush & Prochnau 2004]. Für den Zusammenhang zwischen schweren Asthmaattacken und Sensibilisierung gegen Schimmelpilze, insbesondere *Alternaria*, gibt es zahlreiche Belege, der Zusammenhang zwischen generellem Schweregrad und Sensibilisierung wurde erstmals in einer multizentrischen europäischen Querschnittstudie (European Community Respiratory Health Survey) an erwachsenen Asthmatikern gezeigt [Zureik et al. 2002]. Hierbei ergab sich für die Häufigkeit der Sensibilisierung gegen *Alternaria* oder *Cladosporium* und zunehmendem Schweregrad eine signifikante Assoziation mit einem Odds Ratio (OR) von 2,34 für schweres vs. mildes Asthma (Tabelle 6). Ebenfalls signifikant war die Assoziation für Hausstaubmilbe (*Der p1*), nicht aber für Pollen oder Katze. Wurden alle Allergene in das Berechnungsmodell eingeschlossen, ergaben sich für die beiden getesteten Pilze die folgenden signifikanten Assoziationen: OR 1,48 für mäßiges vs. mildes Asthma und OR 2,16 für schweres vs. mildes Asthma.

In Bezug auf Rhinokonjunktivitis konnten Andersson et al. [Andersson et al. 2003] erstmals zeigen, dass bei Kindern mit Sensibilisierung gegen *Alternaria* die Symptome im Jahresverlauf mit Änderungen in den Luftkonzentrationen gegen *Alternaria* korrelierten. Dieser Effekt blieb auch nach Ausschluss von Graspollen-positiven Kindern bestehen.

**Tab. 6:** European Community Respiratory Health Survey: Sensitisation to airborne moulds and severity of asthma [Zureik *et al.* 2002]. (Odds Ratio mit 95% Konfidenzintervall für mäßiges vs. mildes Asthma und für schweres vs. mildes Asthma)

	aktuelles Asthma			p-Wert (für den Trend)
	mild (n = 564)	mäßig (n = 333)	schwer (n = 235)	
<b>Alternaria alternata</b>				
% sensibilisiert	8,9	13,8	16,6	< 0,001
rohe OR	1	1,64 (1,08-2,52)	2,05 (1,31-3,21)	< 0,001
adjustierte OR	1	1,61 (1,04-2,50)	2,03 (1,26-3,27)	< 0,001
<b>Cladosporium herbarum</b>				
% sensibilisiert	3,9	5,4	11,1	< 0,001
rohe OR	1	1,41 (0,74-2,66)	3,07 (1,70-5,50)	< 0,001
adjustierte OR	1	1,21 (0,62-2,36)	3,20 (1,72-5,94)	< 0,001
<b>Beide Pilze</b>				
% sensibilisiert	10,8	15,9	22,1	< 0,001
rohe OR	1	1,56 (1,05-2,32)	2,34 (1,56-3,52)	< 0,001
adjustierte OR	1	1,48 (0,98-2,24)	2,34 (1,52-3,60)	< 0,001

Auch für den Zusammenhang zwischen Schimmelpilzbelastung im Wohnbereich und allergischen Erkrankungen bei Kindern gibt es epidemiologische Belege. So konnten Garrett *et al.* [Garrett *et al.* 1998] zeigen, dass erhöhte Raumlufkonzentrationen von *Penicillium* spp. mit kindlichem Asthma korrelierten und erhöhte Konzentration von *Aspergillus* spp. mit Atopien. Querschnittstudien in Deutschland zeigten ebenfalls, dass erhöhte Innenraumkonzentrationen von Cladosporien und Aspergillen im Winter das Risiko für Sensibilisierungen (auch gegen andere Allergene) bei Kindern erhöhten [Garrett *et al.* 1998]. Hohe Konzentrationen (>90th Perzentile) waren zudem mit mehr Atemwegssymptomen sowohl bei sensibilisierten wie auch bei nicht-sensibilisierten Kindern verknüpft.

### 3.4 Nicht-allergische (toxische) Atemwegserkrankungen

Inhalation von Sporen, Pilzfragmenten oder staubgebundenen toxischen Stoffwechselprodukten kann auch bei nicht atopisch disponierten Personen zu (Atemwegs)-Erkrankungen führen. Bei erhöhter Exposition im häuslichen Umfeld werden unspezifische Beschwerden und Reizwirkungen beobachtet, aber auch häufigeres Auftreten von Bronchitis und eine Verschlechterung von Asthma.

In Berufszweigen wie Landwirtschaft, Getreideverarbeitung, Tierhaltung, Lebensmittelproduktion, Abfallwirtschaft und Holzverarbeitung kann es zu einer massiven Exposition gegenüber Schimmelpilzen kommen. Die Sporenkonzentrationen liegen dabei um mehrere Zehnerpotenzen über den in belasteten Haushalten gemessenen Konzentrationen und treten meistens in Verbindung mit weiteren problematischen Staubkomponenten auf (Bakterien, Pilze, Milben, Epithelien, Pollen, Endotoxine, Glucane, Mykotoxine). Chronische Bronchitis, Asthma, exogen-allergische Alveolitis bzw. toxische Alveolitis (organic dust toxic syndrome, ODTs) sind Krankheitsbilder, die bei diesen Berufen gehäuft auftreten, ODTs wird nur hier beobachtet [Mücke & Lemmen 1999].

Die gesundheitlich relevanten Komponenten des Pilzaerosols können nach derzeitigem Kenntnisstand in vier Stoffgruppen zusammengefasst werden:

- Allergene
- 1,3- $\beta$ -Glucan
- mikrobielle flüchtige Verbindungen (MVOC)
- Mykotoxine

Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der Rolle die dem 1,3- $\beta$ -Glucan, den MVOC und den Mykotoxinen in der Pathogenese nicht-allergischer Atemwegserkrankungen zukommt bzw. zukommen könnte, da auf diesem Gebiet noch erheblicher Klärungsbedarf besteht.

#### 1,3- $\beta$ -Glucan

1,3- $\beta$ -Glucan, ein Polymer der D-Glucopyranose, kommt in den Zellwänden von Pilzen vor (aber auch in einigen Bakterien sowie in Pflanzen und Pollen) und wird in Untersuchungen als Marker für die Biomasse von Schimmelpilzen herangezogen. 1,3- $\beta$ -Glucan hat, wie andere  $\beta$ -Glucane auch, immunmodulatorische Effekte und inflammatorische Eigenschaften. Es bindet an spezifische Rezeptoren von Makrophagen und wird, nach Aufnahme, von diesen

langsam über Wochen bis Monate oxydativ abgebaut [Nono et al. 1991]. Diese Aktivierung von Makrophagen liegt auch der antibakteriellen Wirkung von 1,3- $\beta$ -Glucan zugrunde.

Aus Skandinavien, aber auch aus anderen Ländern liegen eine Reihe von Feldstudien vor, die den Zusammenhang zwischen 1,3- $\beta$ -Glucan in Wohnräumen und gesundheitlichen Beschwerden der Bewohner untersuchen [Rylander et al. 1994, Rylander 1997, Thorn & Rylander 1998, Rylander et al. 1992, Douwes et al. 2000]. Danach war 1,3- $\beta$ -Glucan assoziiert mit

- Reizwirkungen an den Schleimhäuten
- entzündlichen Atemwegserkrankungen
- erhöhter Atemwegsreagibilität
- allgemeinen Symptomen (Müdigkeit, Kopfschmerzen)
- mehr Allergien

Die Untersuchungen zeigen, dass 1,3- $\beta$ -Glucan ein Risikomarker für SBS-ähnliche Beschwerden ist. Ein Kausalzusammenhang zwischen erhöhten Konzentrationen von 1,3- $\beta$ -Glucan in feuchten oder verschimmelten Wohnungen und gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Bewohner lässt sich aus den Felduntersuchungen aber nicht ableiten.

In Inhalationsstudien an Meerschweinchen führte 1,3- $\beta$ -Glucan zu einem Anstieg der Eosinophilen im Lungenepithel, in der Lavage und im Interstitium, im Interstitium auch zu einem Anstieg der Lymphocyten. Endotoxin führte dagegen zu einem Anstieg der Neutrophilen und Makrophagen, nicht aber zu einem Anstieg der Eosinophilen. Bei gleichzeitiger Gabe von Endotoxin und 1,3- $\beta$ -Glucan war der Glucan-induzierte Eosinophilenanstieg nicht mehr zu beobachten. Die Ergebnisse weisen auf eine komplexe Interaktion zwischen den beiden mikrobiellen Zellwandkomponenten hin [Fogelmark et al. 2001]. In Mäusen verstärkte Inhalation von 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  1,3- $\beta$ -Glucan für 40 Minuten den Allergen(Ovalbumin)-induzierten Eosinophilen-Einstrom in die Lunge und unterdrückte die übliche Down-Regulation von IgE nach wiederholter Ovalbumin-Gabe (*Wiederholte Inhalation eines Allergens führt zur Down-Regulation der allergen-spezifischen IgE-Antwort in nicht-atopischen Individuen. Dieses Phänomen bezeichnet man als IgE-Isotyp-spezifische Toleranz. Im Gegensatz dazu kommt es bei Atopikern zu einer deutlichen IgE-Antwort*). Des Weiteren stimulierte 1,3- $\beta$ -Glucan die Bildung der Cytokine IL-6 und IL-10. Die beiden Interleukine werden bei der für Allergien charakteristischen Th-2-Antwort exprimiert [Keller 2002]. Nach diesen Ergebnissen hat 1,3- $\beta$ -Glucan eine adjuvante Wirkung auf allergische Reaktionen in den Atemwegen.

Die experimentellen Untersuchungen stützen die Befunde der Feld-Untersuchungen. Allerdings lassen die vorliegenden Ergebnisse noch keine konsistenten Aussagen zur Rolle von

1,3- $\beta$ -Glucan in der Pathogenese toxischer und allergischer Atemwegserkrankungen durch Schimmelpilze zu. Hier herrscht noch erheblicher Forschungsbedarf.

### **Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen (MVOC)**

Die Toxikologie der MVOC ist bisher kaum untersucht. Unklar ist, inwieweit sie beteiligt sind an Reizwirkungen, Atemwegserkrankungen und SBS-Symptomatik. Verglichen mit nicht-biogenen VOC sind die Raumluftkonzentrationen in der Regel deutlich niedriger ( $<1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bei Einzelsubstanzen,  $< 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Summe der MVOC). Allerdings haben einzelne MVOC sehr niedrige Geruchsschwellen (z. B. Geosmin 0,1 ppb) und können somit zur Belästigung beitragen. Zudem hat sich die Messung der MVOC als Indikatormessung zur Erkennung eines nicht sichtbaren intramuralen Schimmelbefalls in der Praxis bewährt [Wan et al. 1999].

Für 12 häufig in Innenräumen vorkommende MVOC liegen *in vitro* Untersuchungen an Säugertierzellen zu allgemeintoxischen Wirkungen vor [Kreja & Seidel 2001]. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die zytotoxischen Wirkungen um mehrere Zehnerpotenzen unter der Zytotoxizität der Vergleichssubstanz Gliotoxin (ein Mycotoxin) lagen. Genotoxische Effekte und Mutagenität konnten bei den hier geprüften Einzelsubstanzen nicht nachgewiesen werden.

Eine Sichtung von Literaturdaten zu ausgewählten MVOC (ohne Geosmin) ergab, dass in verschimmelten Innenräumen die Raumluftkonzentrationen einzelner MVOC häufig um 2 bis 4 Zehnerpotenzen unterhalb der bislang bekannten Geruchsschwellenwerte bzw. 4 bis 6 Zehnerpotenzen unterhalb der Reizschwellenwerte für Irritationen der Augen- und Nasenschleimhäute liegen [Böck 2001]. Auch unter Berücksichtigung von additiven Wirkeffekten scheint ein relevanter Beitrag von MVOC zu Innenraumbeschwerden und Symptomen eher unwahrscheinlich. Ähnliche Ergebnisse erbrachten auch die Messungen des sensorischen Potentials von 3 MVOC (1-Octen-3-ol, 3-Octanol, 3-Octanon) und einer Kombination von 5 MVOC [Korpi et al. 1999]. Als Messparameter für sensorische Irritationen wurde der RD50-Wert gewählt (die Konzentration, die die Atemfrequenz in Mäusen um 50% senkt). Die RD<sub>50</sub>-Werte lagen um Größenordnungen über Innenraumkonzentrationen. Ein Beitrag der MVOC zu sensorischen Beeinträchtigungen in verschimmelten Häusern scheint auch nach Korpi et al. (1999) gering, selbst unter Annahme synergistischer Effekte.

Nach den wenigen bisher vorliegenden toxikologischen Untersuchungen dürften MVOC keinen nennenswerten Beitrag zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen in schimmelbelasteten

Wohnungen leisten. Eine Belästigung durch geruchsintensive Komponenten (unterhalb der Schwelle für Reizwirkungen) kann allerdings auch die (subjektive) Wahrnehmung von Beeinträchtigungen verstärken.

### Mykotoxine

Orale Aufnahme von Mykotoxinen kann zu einem breiten Spektrum von Erkrankungen und zu (z. T. historischen) Krankheitsbildern führen. Akute Mykotoxikosen sind in Europa selten geworden, bedeutender ist die chronische Aufnahme geringer Mengen, die zu Immunsuppression und zu Krebs führen kann. Zu Mykotoxingehalt in Lebensmitteln und Mykotoxikosen durch orale Aufnahme gibt es weltweit eine enorme Anzahl von Untersuchungen [Mücke & Lemmen 1999]. Verglichen hierzu ist die Datenlage zu Mykotoxikosen durch Inhalation von belastetem Material sehr gering. Einige Studien und Fallberichte belegen Erkrankungen bei extremer beruflicher Exposition (Arbeiten mit Getreidestaub) [Di Paolo et al. 1993]. Inzwischen mehren sich die Belege für das Vorkommen von Mykotoxinen in Sporen und Hausstaub, so dass ihre Beteiligung an gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Schimmelbefall in Betracht gezogen werden muss. Tabelle 7 gibt einen Überblick über Mykotoxine, die in Sporen nachgewiesen wurden. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei zunehmender Wahrnehmung der Problematik die Liste länger wird. Einige der aufgeführten Mykotoxine haben immunsuppressive oder irritative Eigenschaften und könnten durchaus zu dem Beschwerdekomples beitragen.

**Tab. 7:** In Sporen nachgewiesene Mykotoxine [Sorensen 1999]

Sporen	Toxin	Wirkung
<i>Alternaria alternata</i>	Alternariol	–
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Fumitremorgene Verrucologen Trypacidin Gliotoxin	neurotoxisch neurotoxisch - immunsuppressiv
<i>A. flavus</i> , <i>A. parasiticus</i>	Aflatoxin	hepatotoxisch, kanzerogen
<i>Fusarium gramineum</i> , <i>F. sporotrichoides</i>	Trichothecene: Deoxynivalenol, T-2 Toxin	viele Symptome u.a. immunsuppressiv, irritativ
<i>Penicillium aurantiogriseum</i>	Auranthine	nephrotoxisch
<i>Stachybotrys chartarum</i> (=atra)	Satratoxin G u. H (Trichothecene)	u. a. immunsuppressiv

Einige Mykotoxine konnten inzwischen auch in Hausstaub nachgewiesen werden. So war Ochratoxin A in 18 von 47 Hausstaubproben nachweisbar, die Konzentrationen lagen zwischen 0,1 und 4,0 µg/kg [Kasel et al. 1999]. Ochratoxin A hat nephrotoxische und IgE-adjuvante Wirkungen und wird von *Aspergillus ochraceus* und *Penicillium viridicatum* gebildet. In einem Pilotversuch zu Hausstaubuntersuchungen in belasteten Wohnungen war die untersuchte Probe positiv für Sterigmatocystin, Citrinin und Gliotoxin, negativ für Patulin [Rolle-Kampczyk et al. 2001]. Sterigmatocystin (gebildet von *Aspergillus versicolor*), Citrinin (gebildet von *Penicillium expansum* und *P. chrysogenum*) und Gliotoxin (gebildet von *Aspergillus fumigatus*) wirken immunsuppressiv, Citrinin auch schleimhautreizend. Sterigmatocystin wurde auch auf einer natürlich besiedelten Tapete nachgewiesen [Nielsen et al. 1999].

Unter feuchten Bedingungen kam es auf Cellulose-Filtern von Atemschutzmasken zur Bildung des Trichothecens Satratoxin H [Pasanen et al. 1994]. Die Trichothecene umfassen etwa 150 strukturverwandte Sesquiterpene und werden hauptsächlich von *Fusarium*-Arten gebildet. Sie hemmen die Proteinsynthese und haben daher eine erhebliche Toxizität gegenüber metabolisch aktiven Zellen. Sie sind dermatotoxisch, neurotoxisch, hämorrhagisch, teratogen, immunsuppressiv und schleimhautreizend. T2-Toxin und andere Trichothecene wurden in Bürogebäuden im Staub der Ventilationssysteme gefunden [Smoragiewicz et al. 1993].

Adverse gesundheitliche Wirkungen durch Inhalation von Mykotoxinen im Wohnbereich sind bisher nicht beschrieben. Die einzige epidemiologische Untersuchung, die eine kausale Beteiligung von *Stachybotrys chartarum* (als Bildner von Trichothecenen) und schweren Erkrankungen bei Kindern (idiopathische Lungenblutungen) nahelegte, wurde 1993-1998 vom Center für Disease Control in Cleveland, Ohio durchgeführt und hielt einer neueren Reanalyse nicht stand [Burge 2000].

Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass einige Mykotoxine direkt auf alveoläre Makrophagen wirken. Trichothecene (T2-Toxin, Deoxynivalenol, Diacetoxyscirpenol), Patulin und Penicillinäure hemmen Makrophagenfunktionen wie Phagozytose und mikrobizide Aktivität [Sorenson 1999]. In Mäusen war T2-Toxin bei inhalativer Aufnahme 10mal so toxisch wie bei systemischer Gabe [Creasia et al. 1987].

Die derzeitige Datenlage erlaubt noch keine Aussagen inwieweit die Inhalation von Mykotoxinen in Sporen oder Hausstaub zu den Symptomen und Beschwerden in feuchten, schimmelbelasteten Wohnungen beiträgt. Die toxischen Wirkungen der Mykotoxine, insbesondere die immunsuppressiven Wirkungen, könnten aber bei chronischer Exposition ein gesundheitliches Risiko darstellen.

### 3.5 Literaturverzeichnis

- Andersson, M., Downs, S., Mitakakis, T., Leuppi, J., Marks, G.: Natural exposure to *Alternaria* spores induces allergic rhinitis symptoms in sensitized children. *Pediatr Allergy Immunol* 14, 100-105 (2003)
- Behrendt, H., Lemmen, C.: Schimmelpilz-Exposition: Pathomechanismus und Krankheitsbilder. In: Mücke W. (Hrsg.): *Schimmelpilze im Wohnbereich*. Institut für Toxikologie und Umwelthygiene der Technischen Universität München, ISBN 3-932-108-16-7, 85-108 (2002)
- Black, P. N., Udy, A. A., Brodie, S. M.: Sensitivity to fungal allergens is a risk factor for life-threatening asthma. *Allergy* 55, 501-504 (2000)
- Böck, R.: Sensorische Wirkung von flüchtigen Mtaboliten (MVOC) in verschimmelten Innenräumen. *Umweltmed Forsch Prax* 6, 137-142 (2001)
- Breitenbach, M., Simon-Nobbe, B.: The Allergens of *Cladosporium herbarum* and *Alternaria alternata*. In: Breitenbach, Cramer, Lehrer (eds.): *Fungal Allergy and Pathogenicity*, Karger Verlag, Basel, ISBN 3-8055-7391-X, 48-72 (2002)
- Burge, H. A.: The Fungi. In: *Handbook Indoor Air Quality*, Elsevier, 45.1-45.32 (2000)
- Bush, R. K., Prochnau, J.J.: *Alternaria* induced asthma. *J Allergy Clin Immunol* 113(2), 227-234 (2004)
- Cramer, R.: Molecular Cloning of *Aspergillus fumigatus* Allergens and their Role in Allergic Bronchopulmonary Aspergillosis. In: Breitenbach, Cramer, Lehrer (eds.): *Fungal Allergy and Pathogenicity*, Karger Verlag, Basel, ISBN 3-8055-7391-X, 74-93 (2002)
- Creasia, D. A., Thurman, J. D., Jones, L. J., Nealley, M. L., York, C. G., Wannemacher, R. W. jr., Bunner, D. L.: Acute inhalation toxicology of T-2 mycotoxin in mice. *Fundam Appl Toxicol* 8, 230-235 (1987)
- Dales, R. E., Cakmak, S., Judek, S., Coates, F., Brook, J. R., Burnett, R. T.: The role of fungal spores in thunderstorm asthma. *Chest* 123(3), 745-750 (2003)
- Di Paolo, N., Guarnieri, A., Loi, F., Sacchi, G., Mangiarotti, A. M., Di Paolo, M.: Acute renal failure from inhalation of mycotoxins. *Nephron* 64, 621-625 (1993)
- Douwes, J., Zuidhof, A., Doekes, G., van der Zee, S. C., Wouters, I., Boezen, M. h., Brunekreef, B.: 1,3- $\beta$ -D-glucan and endotoxin in house dust and peak flow variability in children. *Am J Respir Crit Care Med* 162, 1348-54 (2000)

- Fogelmark, B., Thorn, J., Rylander, R.: Inhalation of 1,3- $\beta$ -D-glucan causes airway eosinophilia. *Mediators Inflamm* 10, 13-19 (2001)
- Garrett, M. H., Rayment, P. R., Hooper, M. A., Abramson, M. J. Hooper, B. M.: Indoor airborne fungal spores, house dampness and association with environmental factors and respiratory health in children. *Clin Exp Allergy* 28, 459-467 (1998)
- Helbling, A., Reimers, A.: Immunotherapy in fungal allergy. *Curr Allergy Asthma Rep* 3(5), 447-453 (2003)
- Horner, W. E., Helbling, A., Salvaggio, J. E., Lehrer, S. B.: Fungal allergens. *Clin Microbiol Rev* 8(2), 161-179 (1995)
- Jäger, L.: Rekombinante Allergene – Möglichkeiten und Grenzen ihrer Anwendung. *Allergologie* 24(12), 563-568 (2001)
- Kasel, U., Wichmann, G., Bleck, M.: Ochratoxin A im Hausstaub. *Umweltmed Forsch Prax* 4, 301-303 (1999)
- Keller, R.: Mikrobielle Sekundärmetabolite aus Schimmelpilzen – Nachweis und Bewertung. In: Mücke W. (Hrsg.): *Schimmelpilze im Wohnbereich*. Institut für Toxikologie und Umwelthygiene der Technischen Universität München, ISBN 3-932-108-16-7, 181-220 (2002)
- Korpi, A., Kasanen, J.-P., Alarie, Y., Kosma, V.-M., Pasanen, A.-L.: Sensory Irritating Potency of Some Microbial Volatile Organic Compounds (MVOC) and a Mixture of Five MVOCs. *Arch Environ Health* 54, 347-352 (1999)
- Kreja, L., Seidel, H.-S.: Toxikologische Untersuchungen einiger häufig nachgewiesener flüchtiger organischer Metabolite der Schimmelpilze (MVOC). *Umweltmed Forsch Prax* 6, 159-163 (2001)
- Lin, R. Y., Williams, K. D.: Hypersensitivity to molds in New York City in adults who have asthma. *Allergy Asthma Proc* 24(1), 13-18 (2003)
- Mücke, W., Lemmen, C.: *Schimmelpilze – Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen*. Ecomed Verlag, Landsberg, ISBN 3-609-68000-9 (1999)
- Nielsen, K. F., Gravesen, S., Nielsen, P. A., Andersen, B., Thrane, U., Frisvad, J. C.: Production of mycotoxins on artificially and naturally infested building materials. *Mycopathologia* 145, 43-56 (1999)

- Nono, I., Ohno, N., Masuda, A., Oikawa, S., Yadomae, T.: Oxidative degradation of an anti-tumor (1-3)- $\beta$ -D-glucan, grifolan. *J Pharmacobiodyn* 14, 9-19 (1991)
- O`Hollaren, M. T., Yunginger, J. W., Offord, K. P., Somers, M. J., O`Connell, E. J., Ballard, D. J., et al.: Exposure to an aeroallergen as a possible precipitating factor in respiratory arrest in young patients with asthma. *N Engl J Med* 324, 359-363 (1991)
- Pasanen, A.-L., Nikulin, M., Berg, S., Hintikka, E.-L.: *Stachybotrys atra* corda may produce mycotoxins in respirator filters in humid environments. *Am Ind Hyg Assoc* 55, 62-65(1994)
- Pattersen, J. E.: Epidemiology of fungal infections in solid organ transplant patients. *Transpl Infect Disease* 1, 229-236 (1999)
- Rolle-Kampczyk, U., Müller, A., Diez, U., Rehwagen, M., Schwenke, A., Metzner, G., Herbart, O.: Hausstaub als Quelle für eine potenzielle Belastung mit Mykotoxinen – ein Fallbeispiel. *Umweltmed Forsch Prax* 6, 42-46 (2001)
- Rylander R.: Airborne 1,3- $\beta$ -D-glucan and airway effects in a day care center before and after renovation. *Arch Environ Health* 52, 281-285 (1997)
- Rylander, R., Etzel, R.: Introduction and Summary: Workshop on Children`s Health and Indoor Mold Exposure. *Environ Health Perspect* 107 (S3), 465-468 (1999)
- Rylander, R., Hsieh, V., Courteheuse, C.: The first case of sick building syndrome in Switzerland. *Indoor Environ* 3, 159-162 (1994)
- Rylander, R., Persson, K., Goto, H., Yasa, K., Tanaka, S.: Airborne 1,3- $\beta$ -glucan may be related to symptoms in sick buildings. *Indoor Environ* 1, 263-267 (1992)
- Smoragiewicz, W., Cosette, B., Boutard, A., Krzystyniak, K.: Trichothecene mycotoxins in the dust of ventilation systems in office buildings. *Int Arch Occup Environ Health* 65, 113-117 (1993)
- Sorenson, W. G.: Fungal Spores: Hazardous to Health? *Environ Health Perspect.* 107 (S3), 469-472 (1999)
- Targonski, P. V., Persky, V. W., Ramekrishnan, V.: Effect of environmental molds on risk of death from asthma during the pollen saison. *J Allergy Clin Immunol* 95, 955-961 (1995)
- Thorn, J., Rylander, R.: Airways inflammation and glucan in a rowhouse area. *Am J Respir. Crit Care Med* 157, 1798-1803 (1998)

- Walsh, T. J., Groll, A. H.: Emerging fungal pathogens: evolving challenges to immunocompromised patients for the twenty-first century. *Transpl Infect Disease* 1, 247-261 (1999)
- Wan, G.-H., Li, C.-S., Guo, S.-P., Rylander, R., Lin, R.-H.: An airborne mold-derived product, 1,3- $\beta$ -D-glucan, potentiates airway allergic responses. *Eur J Immunol* 29, 2491-97 (1999)
- Zureik, M., Neukirch, C., Leynaert, B., Liard, R., Bousquet, J., Neukirch, F.: Sensitisation to airborne moulds and severity of asthma: cross sectional study from European Community respiratory health survey. *BMJ* 325, 411 (2002)

## 4 Endotoxine und Atemwegserkrankungen – zwei Seiten derselben Münze?

Katja Radon

### 4.1 Zusammenfassung

Endotoxine sind Bestandteile der äußeren Zellwand gram-negativer Bakterien. Sie sind ubiquitär verbreitet. Das Potenzial der Endotoxine, neutrophile Entzündungsreaktionen auszulösen, ist aus vielen Studien bekannt. So wurde in einer großen Anzahl arbeitsepidemiologischer Untersuchungen gezeigt, dass berufliche Exposition gegenüber Endotoxinen das Risiko für Organic Dust Toxic Syndrom (ODTS; sogenanntes Drescherfieber), chronische Bronchitis und asthma-ähnliche Symptome erhöht. Im Gegensatz dazu wurde in vielen arbeits- und umweltepidemiologischen Studien sowohl an Kindern als auch an Erwachsenen gezeigt, dass Endotoxine vor allergischen Erkrankungen und allergischer Sensibilisierung schützen.

In bezug auf Asthma sind die Ergebnisse auf den ersten Blick widersprüchlich. Während in einigen Studien ein erhöhtes Risiko für Asthma nach Exposition gegenüber Endotoxinen gezeigt wurde, ergaben andere Untersuchungen einen protektiven Effekt. Diese Unterschiede können erklärt werden, wenn der Phänotyp des Asthmas mit berücksichtigt wird. Das Risiko für **atopisches Asthma**, primär dominiert durch eine eosinophile Immunantwort, ist bei Personen mit höherer Exposition gegenüber Endotoxinen, z.B. durch Leben oder Arbeiten auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, vermindert. Im Gegensatz dazu steigt das Risiko für **nicht-atopisches Asthma** mit zunehmender Endotoxinexposition. Dieses nicht-atopische Asthma ist durch neutrophile Entzündungsreaktionen gekennzeichnet. Die Ergebnisse aus epidemiologischen Untersuchungen werden durch in-vivo und in-vitro Studien gestützt. Sie stehen in Übereinstimmung mit der sogenannten Hygienehypothese, die 1989 erstmals von Strachan postuliert wurde.

Aufgrund dieser Ergebnisse sollten am Arbeitsplatz Maßnahmen ergriffen werden, um das Risiko für eine chronisch neutrophile Entzündung in den Atemwegen der Mitarbeiter durch eine Minderung der Endotoxinexposition zu minimieren. Die Effektivität solcher Maßnahmen in bezug auf chronische Atemwegserkrankungen muss allerdings noch in Interventionsstudien gezeigt werden. Auf der anderen Seite stehen prospektive Kohortenstudien an, die untersuchen, wie das Risiko atopischer Erkrankungen auf Populationsebene vermindert werden kann, ohne das Risiko für andere Erkrankungen zu erhöhen.

## 4.2 Was versteht man unter Endotoxinen?

Im Gegensatz zu Gram-positiven Bakterien sind Gram-negative Bakterien von einer inneren und einer äußeren Membran umgeben [Bos *et al.* 2004]. Endotoxine sind Bestandteile der äußeren Membran. Sie werden in gereinigter Form auch als Lipopolysaccharide (LPS) bezeichnet [Michel 2000].

Endotoxine sind ubiquitär sowohl am Arbeitsplatz als auch in der Umwelt in stark variablen Konzentrationen vorhanden [Michel 2000, Liu & Redmon 2001, Singh & Schwartz 2005]. Ihre immunstimulierende Wirkung kann nur durch sehr hohe Temperaturen inaktiviert werden (z.B., 160°C für 4 Stunden). Sie sind somit wesentlich stabiler und überleben länger als die Bakterien selbst.

Im beruflichen Umfeld kommen Endotoxine überall da vor, wo höhere Konzentrationen organischer Stäube zu finden sind. Dies sind vor allem die Landwirtschaft (Tierhaltung, Getreideanbau) [Radon *et al.* 2002, Von Essen 1997], Textilproduktion [Lane *et al.* 2004], und die Abfallwirtschaft [Michel 2000, Douwes *et al.* 2003].

Im häuslichen Umfeld stammen höhere Konzentrationen von Haustieren, Teppichböden und Klimaanlage [Singh & Schwartz 2005]. In der Landwirtschaft werden Endotoxine aus dem Stall auch in das häusliche Umfeld transportiert [Waser *et al.* 2004]. Aktuelle Studien ergaben mittlere Endotoxinkonzentrationen in Staubproben von Schlafzimmern zwischen 7 EU/mg und 63 EU/mg [Michel 2003]. In ländlichen Gebieten mit vielen Betrieben der Veredlungswirtschaft nahe der Wohnbebauung ist eine Erhöhung der Hintergrundbelastung durch Endotoxine auch in Wohnungen von Personen ohne direkten Kontakt zur Landwirtschaft zu erwarten [Radon *et al.* 2004, Carty *et al.* 2003, Mueller-Anneling *et al.* 2004].

## 4.3 Expositionsabschätzung

Endotoxine werden üblicherweise in der Luft oder im Sedimentstaub gemessen. Ein Problem der Expositionsabschätzung ist die bislang fehlende Standardisierung der Untersuchungsmethoden sowie der Probenahme [Thorne *et al.* 2004]. Der kinetische Limulus-Amöbozyten-Lysat-Test (LAL-Test), eine biologische in-vitro Methode, wird seit den 80ern häufig für die Bestimmung von Endotoxinen verwendet [Schenker 1998, Poole 2003].

Der LAL-Test misst die biologische Aktivität des freien LPS. Das für den Test verwendete Lysat wird aus dem Pfeilschwanzkrebs erstellt (*Limulus polyphemus*) [Williams *et al.* 2001]. Aus diesem Grund sind verschiedene Test-Chargen schwierig zu vergleichen und ein interner Standard muss eingesetzt werden. Die Ergebnisse des Tests sollten als Endotoxinein-

heiten (EU) angegeben werden, da die Reaktionsbereitschaft ebenso wie das Molekulargewicht von verschiedenen Endotoxinen stark variieren kann [Schenker 1998].

Aus den großen Unterschieden der in den verschiedenen Laboren eingesetzten Protokolle können große Unterschiede in den Ergebnissen resultieren. Deshalb können nur intra-Laborergebnisse unmittelbar mit einander verglichen werden [Schenker 1998]. Aus diesem und anderen Gründen ist die Ableitung eines Grenzwertes für Endotoxin nach wie vor schwierig [Thorne et al. 2004]. Der neue europäische Standard für Endotoxinbestimmungen am Arbeitsplatz könnte dieses Problem lösen [DIN 2003].

#### **4.4 Bekannte zelluläre Effekte**

Endotoxine haben schon in geringen Mengen eine starke immunstimulierende und proinflammatorische Wirkung [Douwes et al. 2002]. Nach Inhalation gelangen die Endotoxine in die Atemwege und treffen dort auf Makrophagen mit CD14-Rezeptoren, einem LPS-bindenden Rezeptor. Die Bindung an CD14 wird über das LPS bindende Protein (LBP) vermittelt. Über Toll-like Rezeptoren (TLR-2 und -4) werden alveoläre Makrophagen aktiviert. Hieraus resultiert die Ausschüttung proinflammatorischer Zytokine, Chemokine und anderer Mediatoren [Michel 2000, Reed & Milton 2001]. In diesem Zusammenhang auftretende Zytokine sind TNF- $\alpha$ , Interleukin (IL) 1- $\beta$ , IL 6 and IL 8 und Metaboliten der Arachidonsäure [Michel 2000]. Die Zytokine rekrutieren und aktivieren Neutrophile. Dies führt zu einer lokalen und systemischen Entzündung mit Leukozytose und Neutrophilie [Michel 2000, Reed & Milton 2001].

Genetische Variationen im TLR-4 Polymorphismus werden für intraindividuelle Unterschiede in der Suszeptibilität gegenüber Endotoxinen verantwortlich gemacht [Vercelli 2004, Eder et al. 2004].

#### **4.5 Endotoxine und Atemwegserkrankungen - Ergebnisse arbeitsepidemiologischer Untersuchungen**

An allen Arbeitsplätzen mit Exposition gegenüber organischen Stäuben können auch Endotoxine in höheren Konzentrationen gefunden werden (z.B. Landwirtschaft, Baumwollproduktion, Abfallwirtschaft). Am besten untersucht ist hierbei die Gruppe der Landwirte. Diese Untersuchungen können als Modell für die Wirkungen der Endotoxine auf die Atemwege dienen.

Bereits 1555 hat Olaus Magnus ein erhöhtes Risiko für Atemwegserkrankungen bei Landwirten beschrieben [Ramazzini 1940]. Dieses wurde mittlerweile in einer großen Anzahl von Studien bestätigt (Übersicht bei [Schenker 1998, Radon et al. 2002]). Atemwegserkrankungen bei Landwirten können daher in vielen Ländern als Berufskrankheiten anerkannt werden. Hierzu gehören

- Exogen allergische Alveolitis (EAA) (sogenannte „Farmerlunge“)
- Organic dust toxic syndrome (ODTS) (sogenanntes „Drescherfieber“)
- Chronische Bronchitis
- Allergische Rhinitis, Asthma und das so genannte „Asthma-like Syndrome“.

Von diesen wurden das ODTS, die chronische Bronchitis sowie das Asthma in Zusammenhang mit berufsbedingter Endotoxinexposition gebracht.

### **Organic dust toxic syndrome (ODTS; Drescherfieber)**

Unter ODTS versteht man eine systemische Entzündung mit grippe-ähnlichen Symptomen. Hierzu gehören Fieber, Myalgien, Kurzatmigkeit und Schüttelfrost 4 bis 8 Stunden nach der Exposition [Singh & Schwartz 2005, Radon et al. 2002]. Die Symptome ähneln der akuten Form der exogen-allergischen Alveolitis (EAA) [Linaker & Smedley 2002]. Hinzu kommt eine Atemwegsobstruktion, die evtl. mit einer erhöhten Atemwegsempfindlichkeit und einer reduzierten Diffusionskapazität einhergeht [Singh & Schwartz 2005]. Die Symptome klingen üblicherweise auch ohne Therapie nach 36 Stunden wieder ab. Typisch ist, dass die Symptome gleichzeitig bei mehreren Arbeitern an einem Arbeitsplatz auftreten, z.B. nach dem Ausmisten eines Tierstalls.

Es wird angenommen, dass Endotoxine die Hauptursache für die Entwicklung des ODTS darstellen. Bei Personen mit wiederholter Exposition scheint sich nach einiger Zeit eine Toleranz zu entwickeln. Welche Mechanismen für diese Toleranzentwicklung verantwortlich sind, ist bislang unklar [Medvedev et al. 2000].

Unter Landwirten ist ODTS eine häufige Erkrankung. So zeigten die Ergebnisse der Europäischen Landwirtschaftsuntersuchung, einer internationalen Querschnittsstudie, die mehr als 7000 Landwirte aus ganz Europa einschloss, dass die Lebenszeitprävalenz des ODTS 15% im Pflanzenanbau und 23% in der Schweinehaltung beträgt [Monso et al. 2000, Radon et al.

2001]. Eine schwedische Studie schätzte die jährliche Inzidenz auf 1% [Malmberg et al. 1988].

Bislang wurde ODS als selbst limitierendes, harmloses Syndrom betrachtet [Linaker & Smedley 2002]. Neuere Studien geben allerdings Hinweise darauf, dass ODS mit einem erhöhten Risiko für chronische Bronchitis einhergeht [Radon et al. 2002, Monso et al. 2003, Von Essen et al. 1999]. Es ist daher zu vermuten, dass die akute neutrophile Entzündungsreaktion des ODS bei chronisch Exponierten zu einer chronischen neutrophilen Entzündungsreaktion im Sinne der chronischen Bronchitis führt.

### **Chronische Bronchitis**

Viele Studien geben Hinweise darauf, dass Arbeit in der Landwirtschaft mit einem erhöhten Risiko für chronische Bronchitiden einhergeht. Die Prävalenz chronischer Bronchitiden bei Landwirten beträgt zwischen 5% [Brouwer et al. 1986] und 39% [Morris et al. 1999]. In der Europäischen Landwirtschaftsstudie hatten Tierhalter im Alter zwischen 20 und 44 Jahren bereits ein erhöhtes Risiko für chronische Bronchitis [Radon et al. 2001]. Eine aktuelle Meta-Analyse zeigte eine Odds Ratio von 2,0 (95% Konfidenzintervall 1,7; 2,4) für chronische Bronchitiden bei Tierhaltern im Vergleich zu nichtexponierten Referenzpopulationen [Goy, in Vorbereitung].

Endotoxine und  $\beta$ -Glucane in organischen Stäuben werden primär für die chronische neutrophile Entzündungsreaktion bei Landwirten verantwortlich gemacht. Allerdings wurde verschiedentlich gezeigt, dass die chronische Bronchitis bei Landwirten nicht mit einer Obstruktion einhergeht [Schenker 1998]. Neben einer potenziellen Selektion im Rahmen der betrachteten Querschnittsstudien ist es in Fragebogenstudien generell schwierig, zwischen den verschiedenen Atemwegserkrankungen klar zu unterscheiden [Thelin & Hoglund 1994, Radon et al. 2002]. So können z.B. giemende Atemgeräusche sowohl Kennzeichen einer chronischen Bronchitis als auch des Asthmas sein. Weiterhin ist denkbar, dass nicht-atopisches Asthma von Ärzten fehldiagnostiziert wird [Radon et al. 2004]. Dieses Problem wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

### **Allergische Sensibilisierung, Asthma und “Asthma-like Syndrome”**

Frühere Studien belegen einen klaren Zusammenhang zwischen Rinderhaltung und allergischer Sensibilisierung gegen Rinderepithel [Schenker 1998]. Gleichzeitig ist bekannt, dass Landwirte häufiger gegen Vorratsmilben und Schimmelpilze sensibilisiert sind (Übersicht bei

[*Schenker 1998*]). Weiterhin ist aus der Baumwollindustrie ein gehäuftes Auftreten von Asthma insbesondere an Montagen, nach einigen Tagen ohne Endotoxinexposition, bekannt (sogenanntes Montagsfieber oder Byssinose). In diesem Zusammenhang ergaben prospektive Studien in der chinesischen Baumwollindustrie eine kumulative Inzidenz von 24% über 15 Jahre im Vergleich zu 0% in der Seidenproduktion [*Wang et al. 2003*]. Außerdem ist bekannt, dass Endotoxine die Lungenfunktion verschlechtern und die Symptommhäufigkeit bei Patienten mit atopischem Asthma steigern können [*Schwartz 2001*].

Die neueren epidemiologischen Studien haben erstmals auch nicht-exponierte Referenzpopulationen eingeschlossen. Hierdurch ergaben sich zunächst widersprüchliche Ergebnisse. So zeigte z.B. der European Community Respiratory Health Survey, eine bevölkerungsbezogene europaweite Studie an jungen Erwachsenen, eine erhöhte Odds Ratio für Landwirte [*Kogevinas et al. 1999*]. Im Gegensatz dazu ergab die Europäische Landwirtschaftsstudie eine erhöhte Häufigkeit von Asthma und Allergien nur für Landwirte in der Pflanzenproduktion. Während die Prävalenz des Asthmas in der Blumenproduktion bei 5% lag, war sie mit 1% bei den Tierhaltern sogar deutlich niedriger als in der Allgemeinbevölkerung (3%) [*Monso et al. 2000, Radon et al. 2001*]. Von 100 Schweinehaltern mit arbeitsbezogenen Atemwegssymptomen waren 16% gegen ubiquitäre Allergene sensibilisiert im Vergleich zu 18% in der Allgemeinbevölkerung. Gleichzeitig war die Exposition gegenüber Hausstaubmilben bei den Landwirten 50fach erhöht [*Radon et al. 2000*].

#### Atopisches und nicht-atopisches Asthma

Eine mögliche Erklärung für die widersprüchlichen Ergebnisse bietet die Überlegung, dass nicht jedes Asthma mit einer allergischen Sensibilisierung einhergeht. Für Landwirte mit Asthmasymptomen, aber ohne allergische Sensibilisierung, wurde in der angloamerikanischen Literatur der Begriff des Asthma-ähnlichen Syndroms („Asthma-like Syndrome“) geprägt [*Schenker 1998*]. Dieses geht mit Kurzatmigkeit, giemenden Atemgeräuschen, Engegefühl in der Brust und einem Abfall der Einsekundenkapazität über den Arbeitstag von weniger als 10% einher. Im Gegensatz zum atopischen Asthma ist das Asthma-like Syndrome durch eine neutrophile Entzündung der Atemwege gekennzeichnet [*Schenker 1998*].

Insgesamt lässt sich das Asthma-like Syndrome als nicht-atopisches Asthma zusammenfassen [*Douwes et al. 2002*]. Es ist zu vermuten, dass etwa 50% aller Asthmafälle auf nicht-atopisches Asthma zurückzuführen sind. Beim berufsbedingten Asthma könnte dieser Anteil sogar noch höher liegen [*Douwes et al. 2002*]. In einer aktuellen Untersuchung in Niedersachsen konnten wir in diesem Zusammenhang zeigen, dass von den Teilnehmern, die über

giemende Atemgeräusche berichteten, nur die Hälfte auch Symptome einer allergischen Rhinitis aufwies oder gegen ubiquitäre Allergene sensibilisiert war. Endotoxine gehören zu den Hauptverursachern des nicht-atopischen Asthmas [Schenker 1998, Linaker & Smedley 2002, Radon et al. 2002, Douwes et al. 2002, Von Essen 2001].

Eduard et al. [2004] konnten zeigen, dass bei Tierhaltern das Risiko für nicht-atopisches Asthma mit zunehmender Endotoxinkonzentration am Arbeitsplatz anstieg. Hingegen war das Risiko für atopisches Asthma invers mit der Endotoxinkonzentration assoziiert. Diese Ergebnisse konnten kürzlich von unserer Gruppe bestätigt werden [Radon et al. 2004]. Es ist somit wichtig, den Phänotypen des Asthmas zu berücksichtigen, wenn die Prävalenz des Asthmas in verschiedenen Populationen verglichen wird.

Es wurde zunächst angenommen, dass genetische Unterschiede das reduzierte Risiko für atopische Erkrankungen bei Landwirten erklären könnten (Healthy Worker Effekt) [Van Schayck 2004, Vogelzang et al. 1999]. Während dieser Effekt eine Rolle in arbeitsepidemiologischen Studien spielen könnte, widersprechen umweltepidemiologische Untersuchungen sowie in-vitro und in-vivo Versuche diesem Erklärungsansatz [Braun-Fahrlander 2003].

Zusammenfassend geht berufsbedingte Endotoxinexposition mit einem verminderten Risiko für atopische Erkrankungen einher. Gleichzeitig ist das Risiko für nicht-atopisches Asthma mit steigender Endotoxinexposition erhöht. Diese Hypothesen werden durch Ergebnisse aus umweltepidemiologischen Untersuchungen unterstützt.

#### **4.6 Endotoxine und Atemwegserkrankungen - Ergebnisse umweltepidemiologischer Untersuchungen**

Um die weltweite Variation in der Prävalenz von Asthma und Allergien zu erfassen und hierdurch Rückschlüsse auf die Ursachen für diese Erkrankungen zu ziehen, wurden in den vergangenen Jahren einige internationale Studien durchgeführt [Omland 2002]. Hierbei zeigte sich, dass die relative Häufigkeit von Asthma und Allergien in Industriestaaten deutlich höher ist als in Schwellenländern. Zudem war die Prävalenz allergischer Erkrankungen zum Zeitpunkt der deutsch-deutschen Wiedervereinigung in Ostdeutschland deutlich niedriger als in Westdeutschland. Diese Unterschiede waren zehn Jahre nach der Wiedervereinigung durch einen Anstieg der Inzidenz und Prävalenz im Osten Deutschlands nicht mehr vorhanden.

Eine Erklärung hierfür bietet die sogenannte Hygienehypothese. Diese besagt, dass mikrobielle Belastung vor der Entwicklung atopischer Erkrankungen schützt [Pearce et al. 2000].

Diese Vermutung wurde durch verschiedene Faktoren, die mit einer verminderten Prävalenz atopischer Erkrankungen einhergehen, gestützt. Zu diesen gehören nach Braun-Fahrländer [2003]:

- Höhere Geschwisterzahl
- Kindergartenbesuch im ersten Lebensjahr
- Gastrointestinale Infektionen
- Aufwachsen auf landwirtschaftlichen Betrieben und früher Kontakt zu Tierställen.

Der letzte Punkt wurde mittlerweile in einer großen Zahl epidemiologischer Untersuchungen in aller Welt bestätigt (Übersicht bei [Braun-Fahrländer 2003, Strachan 2000]). Ebenso wie in den arbeitsepidemiologischen Studien scheint der protektive Effekt der Landwirtschaft auf die Tierhaltung beschränkt zu sein [Kabesch & Lauener 2004].

Zunächst wurde angenommen, dass nur der frühkindliche Kontakt zur Tierhaltung vor allergischen Erkrankungen schützt. Neuere Daten deuten darauf hin, dass auch regelmäßiger Tierstallkontakt mit Beginn im späteren Leben protektiv für diese Erkrankungen sein kann [Downs et al. 2001]. Zwei kleinere longitudinale Untersuchungen, eine an jungen Erwachsenen [Prior et al. 2001], die andere an Schulkindern [Horak et al. 2002], geben Hinweise darauf, dass Kontakt zu Tierställen nicht nur die Inzidenz atopischer Erkrankungen mindert sondern sogar mit einer erhöhten Remission atopischer Sensibilisierungen einhergeht. Allerdings weisen beide Studien methodische Schwächen auf, so dass weitere Studien mit höherer Datenqualität abzuwarten sind.

Als mögliche kausale Faktoren im inversen Zusammenhang zwischen Kontakt zur Landwirtschaft und allergischen Erkrankungen werden Endotoxine, bakterielle DNA, Muraminsäure, Pathogene wie *Toxoplasma gondii* und *Helicobacter pylori*, sowie möglicher Weise Schimmelpilzbestandteile diskutiert [Eder & von Mutius 2004]. Die Reaktion des Immunsystems nach Stimulation der Toll-like Rezeptoren bestimmt möglicher Weise den protektiven Effekt mikrobieller Exposition auf die Erkrankung [Lauener et al. 2002]. Daher ist zu vermuten, dass Endotoxine eine wichtige Rolle in diesem Zusammenhang spielen. Aktuelle Untersuchungen, die die Konzentration von Endotoxinen in den Matratzen von Schulkindern im ländlichen Umfeld untersuchten, ergaben, dass eine höhere Exposition gegenüber Endotoxinen im Matratzenstaub mit einem geringeren Sensibilisierungsrisiko einhergeht [Braun-Fahrländer et al. 2002]. Neben dem Kontakt zu landwirtschaftlichen Betrieben ist in diesem Zusammenhang

auch der Aufenthalt von Haustieren im häuslichen Umfeld eine wichtige Quelle für Endotoxine [Waser et al. 2004, Liu et al. 2002].

Zusammenfassend hängt die Prävalenz von allergischen Erkrankungen und chronischer Bronchitis von der Konzentration an Endotoxinen und Allergenen am Arbeitsplatz und in der Umwelt ab (Tabelle 1). Eine höhere Konzentration von Endotoxinen am Arbeitsplatz führt zu einer höheren Prävalenz chronischer Bronchitiden und nicht-atopischen Asthmas. Dieser Zusammenhang konnte von uns kürzlich auch im Umweltbereich für Anwohner landwirtschaftlicher Großbetriebe belegt werden [Radon et al. 2004]. Im Gegensatz dazu schützen hohe Endotoxinkonzentrationen am Arbeitsplatz und in der Umwelt vor allergischen Erkrankungen.

**Tab 1:** Postulierter Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung in Abhängigkeit von der Expositionshöhe

Exposition ggü.	Allergenen	Gering	Gering	Hoch	Hoch
	Endotoxinen	Gering	Hoch	Gering	Hoch
Prävalenz von	Allergische Rhinitis / Atopisches Asthma	☺	☺	☹	☺
	Asthma-like syndrome / Chronische Bronchitis	☺	☹	☺	☹

☺ = geringe Prävalenz der Erkrankung; ☹ = hohe Prävalenz der Erkrankung

#### 4.7 Mögliche Mechanismen

Die klassische Hygienehypothese suggerierte, dass eine erhöhte Produktion von T-Helferzellen Typ 1 (Th-1) zu einer Verschiebung des Immunsystems weg von einer durch T-Helferzellen Typ 2 (Th-2) dominierten Immunantwort führt. Es wurde angenommen, dass hierdurch die Prävalenz von Th-2 dominierten Erkrankungen vermindert wird [Strachan 2000].

Die Beobachtung, dass auch Wurminfektionen, die mit einer Th-2 Immunantwort einhergehen, mit einer verminderten Allergiehäufigkeit assoziiert sind, widerspricht der klassischen Hygienehypothese [Strachan 2000, Radon et al. 2003]. Es wird daher heute angenommen, dass die Immunantwort über IL-10, welches von Th-3 Zellen ausgeschüttet wird, modifiziert wird. So wurde in bezug auf Katzenallergene vermutet, dass eine Kombination von IL-10 und IL-4 zu einer Verschiebung der Immunantwort hin zu IgG4 Ausschüttung statt der Produktion von IgE führt [Liu & Murphy 2003, Platts-Mills et al. 2001].

Die Mechanismen dieser zweiseitigen Immunantwort wurden in Tier- und Zellversuchen geklärt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in einer aktuellen Übersichtsarbeit von Renz und Herz zusammengefasst [Renz & Herz 2003].

Der nächste Schritt sind nun Kohorten- und Interventionsstudien, die uns dem Ziel der Prävention atopischer Erkrankungen näher bringen. Zudem sollte unser aktuelles Wissen über die adversen Effekte des Endotoxins in Bezug auf chronische Bronchitis und nicht-atopisches Asthma in effektive Präventionsmaßnahmen an Arbeitsplätzen mit hoher Exposition gegenüber organischen Stäuben umgesetzt werden.

## 4.8 Literatur

- Bos MP, Tommassen J. Biogenesis of the Gram-negative bacterial outer membrane. *Curr Opin Microbiol* 2004;7:610-6.
- Braun-Fahrländer C, Riedler J, Herz U, Eder W, Waser M, Grize L, et al. Environmental exposure to endotoxin and its relation to asthma in school-age children. *N Engl J Med* 2002;347(12):869-77.
- Braun-Fahrländer C. Environmental exposure to endotoxin and other microbial products and the decreased risk of childhood atopy: evaluating developments since April 2002. *Curr Opin Allergy Clin Immunol* 2003;3(5):325-9.
- Brouwer R, Biersteker K, Bongers P, Remijn B, Houthuijs D. Respiratory symptoms, lung function, and IgG4 levels against pig antigens in a sample of Dutch pig farmers. *Am J Ind Med* 1986;10(3):283-5.
- Carty CL, Gehring U, Cyrus J, Bischof W, Heinrich J. Seasonal variability of endotoxin in ambient fine particulate matter. *J Environ Monit* 2003;5(6):953-8.
- DIN EN 14031. Workplace atmospheres - Determination of airborne endotoxins. 2003.

- Douwes J, Gibson P, Pekkanen J, Pearce N. Non-eosinophilic asthma: importance and possible mechanisms. *Thorax* 2002;57(7):643-8.
- Douwes J, Pearce N, Heederik D. Does environmental endotoxin exposure prevent asthma? *Thorax* 2002;57:86-90.
- Douwes J, Thorne P, Pearce N, Heederik D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *Ann Occup Hyg* 2003;47(3):187-200.
- Downs SH, Marks GB, Mitakakis TZ, Leuppi JD, Car NG, Peat JK. Having lived on a farm and protection against allergic diseases in Australia. *Clin Exp Allergy* 2001;31(4):570-5.
- Eder W, Klimecki W, Yu L, von Mutius E, Riedler J, Braun-Fahrlander C, et al. Toll-like receptor 2 as a major gene for asthma in children of European farmers. *J Allergy Clin Immunol* 2004;113(3):482-8.
- Eder W, von Mutius E. Hygiene hypothesis and endotoxin: what is the evidence? *Curr Opin Allergy Clin Immunol* 2004;4(2):113-7.
- Eduard W, Douwes J, Omenaas E, Heederik D. Do farming exposures cause or prevent asthma? Results from a study of adult Norwegian farmers. *Thorax* 2004;59(5):381-6.
- Goy S. Chronische Bronchitis in der Landwirtschaft – eine Metaanalyse [Zahnmedizinische Doktorarbeit]. Ludwig-Maximilians-Universität, in Vorbereitung.
- Horak F, Jr., Studnicka M, Gartner C, Veiter A, Tauber E, Urbanek R, et al. Parental farming protects children against atopy: longitudinal evidence involving skin prick tests. *Clin Exp Allergy* 2002;32(8):1155-9.
- Kabesch M, Lauener RP. Why Old McDonald had a farm but no allergies: genes, environments, and the hygiene hypothesis. *J Leukoc Biol* 2004;75(3):383-7.
- Kogevinas M, Anto JM, Sunyer J, Tobias A, Kromhout H, Burney P. Occupational asthma in Europe and other industrialised areas: a population-based study. European Community Respiratory Health Survey Study Group. *Lancet* 1999;353(9166):1750-4.
- Lane SR, Nicholls PJ, Sewell RD. The measurement and health impact of endotoxin contamination in organic dusts from multiple sources: focus on the cotton industry. *Inhal Toxicol* 2004;16(4):217-29.
- Lauener RP, Birchler T, Adamski J, Braun-Fahrlander C, Bufe A, Herz U, et al. Expression of CD14 and Toll-like receptor 2 in farmers' and non-farmers' children. *Lancet* 2002;360(9331):465-6.

- Linaker C, Smedley J. Respiratory illness in agricultural workers. *Occup Med* 2002;8:451-9.
- Liu AH, Murphy JR. Hygiene hypothesis: fact or fiction? *J Allergy Clin Immunol* 2003;111(3):471-8.
- Liu AH, Redmon AH, Jr. Endotoxin: friend or foe? *Allergy Asthma Proc* 2001;22(6):337-40.
- Liu AH. Endotoxin exposure in allergy and asthma: reconciling a paradox. *J Allergy Clin Immunol* 2002;109(3):379-92.
- Malmberg P, Rask-Andersen A, Hoglund S, Kolmodin-Hedman B, Read Guernsey J. Incidence of organic dust toxic syndrome and allergic alveolitis in Swedish farmers. *Int Arch Allergy Appl Immunol* 1988;87:47-54.
- Medvedev AE, Kopydlowski KM, Vogel SN. Inhibition of lipopolysaccharide-induced signal transduction in endotoxin-tolerized mouse macrophages: dysregulation of cytokine, chemokine, and toll-like receptors 2 and 4 gene expression. *J Immunol* 2000;164:5564-74.
- Michel O. Role of lipopolysaccharide (LPS) in asthma and other pulmonary conditions. *J Endotoxin Res* 2003;9(5):293-300.
- Michel O. Systemic and local airways inflammatory response to endotoxin. *Toxicology* 2000;152:25-30.
- Monso E, Magarolas R, Radon K, Danuser B, Iversen M, Weber C, et al. Respiratory symptoms of obstructive lung disease in European crop farmers. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;162(4 Pt 1):1246-50.
- Monso E, Schenker M, Radon K, Riu E, Magarolas R, McCurdy S, et al. Region-related risk factors for respiratory symptoms in European and Californian farmers. *Eur Respir J* 2003;21(2):323-31.
- Morris PD, Lenhart SW, Service WS. Respiratory symptoms and pulmonary function in chicken catchers in poultry confinement units. *Am J Ind Med* 1991;19(2):195-204.
- Mueller-Anneling L, Avol E, Peters JM, Thorne PS. Ambient endotoxin concentrations in PM10 from Southern California. *Environ Health Perspect* 2004;112(5):583-8.
- Omland O. Exposure and respiratory health in farming in temperate zones--a review of the literature. *Ann Agric Environ Med* 2002;9(2):119-36.
- Pearce N, Sunyer J, Cheng S, Chinn S, Bjorksten B, Burr M, et al. Comparison of asthma prevalence in the ISAAC and the ECRHS. ISAAC Steering Committee and the Euro-

- pean Community Respiratory Health Survey. International Study of Asthma and Allergies in Childhood. *Eur Respir J* 2000;16(3):420-6.
- Platts-Mills TA, Vaughan JW, Blumenthal K, Pollart Squillace S, Sporik RB. Serum IgG and IgG4 antibodies to Fel d 1 among children exposed to 20 µg Fel d 1 at home: relevance of a nonallergic modified Th2 response. *Int Arch Allergy Immunol* 2001;124(1-3):126-9.
- Poole F. Class II Special Controls Guidance Document: Endotoxin Assay. Rockville, MD: U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, 2003.
- Prior C, Falk M, Frank A. Longitudinal changes of sensitization to farming-related antigens among young farmers. *Respiration* 2001;68(1):46-50.
- Radon K, Danuser B, Iversen M, Joerres R, Monso E, Opravil U, et al. Respiratory symptoms in European animal farmers. *Eur Respir J* 2001;17:747-54.
- Radon K, Danuser B, Iversen M, Monso E, Weber C, Hartung J, et al. Air contaminants in different European farming environments. *Ann Agric Environ Med* 2002;9(1):41-8.
- Radon K, Dressel H, Windstetter D, Reichert J, Schmid M, Nowak D. *Toxoplasma gondii* infection, atopy and autoimmune disease. *Eur J Med Res* 2003;8(4):147-53.
- Radon K, Ehrenstein V, Praml G, Nowak D. Childhood visits to animal buildings and atopic diseases in adulthood: an age-dependent relationship. *Am J Ind Med* 2004;46(4):349-56.
- Radon K, Goldberg M, Becklake M. Healthy worker effect in cohort studies on chronic bronchitis. *Scand J Work Environ Health* 2002;28(5):328-32.
- Radon K, Monso E, Weber C, Danuser B, Iversen M, Opravil U, et al. Prevalence and risk factors of airway diseases in farmers - summary of results of the European farmers' project. *Ann Agric Environ Med* 2002;9:207-13.
- Radon K, Nowak D. Farming. In: Hendrick DJ, Burge PS, Beckett WS, Churg A, editors. *Occupational disorders of the lung: recognition, management, and prevention*. London: WB Saunders, 2002:427-37.
- Radon K, Schottky A, Garz S, Koops F, Szadkowski D, Radon K, et al. Distribution of dust-mite allergens (Lep d 2, Der p 1, Der f 1, Der 2) in pig-farming environments and sensitization of the respective farmers. *Allergy* 2000;55(3):219-25.
- Radon K, Schulze A, van Strien R, Ehrenstein V, Eckart J, Entorf H, et al. Respiratory health of young adults living in rural areas of Lower Saxony [Abschlussbericht]. Ludwig-

- Maximilians-Universität, 2004. <http://aumento.web.med.uni-muenchen.de/nils/index.html>
- Ramazzini B. *De morbis artificum diatriba*. Chicago, IL: The University of Chicago Press, 1940.
- Reed CE, Milton DK. Endotoxin-stimulated innate immunity: a contributing factor for asthma. *J Allergy Clin Immunol* 2001;108:157-66.
- Renz H, Herz U. The bidirectional capacity of bacterial antigens to modulate allergy and asthma. *Eur Respir J* 2002;19(1):158-71.
- Schenker M. Respiratory health hazards in agriculture. *Am J Respir Crit Care Med* 1998;158:S1-S76.
- Schwartz DA. Does inhalation of endotoxin cause asthma? *Am J Respir Crit Care Med* 2001;163(2):305-6.
- Singh J, Schwartz DA. Endotoxin and the lung: Insight into the host-environment interaction. *J Allergy Clin Immunol* 2005;115:330-3.
- Strachan DP. Family size, infection and atopy: the first decade of the "hygiene hypothesis". *Thorax* 2000;55 Suppl 1:S2-10.
- Thelin A, Hoglund S. Change of occupation and retirement among Swedish farmers and farm workers in relation to those in other occupations. A study of "elimination" from farming during the period 1970-1988. *Soc Sci Med* 1994;38(1):147-51.
- Thorne PS, Duchaine C, Douwes J, Eduard W, Gorny R, Jacobs R, et al. Working group report 4: exposure assessment for biological agents. *Am J Ind Med* 2004;46(4):419-22.
- van Schayck CP, Knottnerus JA. Can the 'hygiene hypothesis' be explained by confounding by behavior? *J Clin Epidemiol* 2004;57(5):435-7.
- Vercelli D. Genetics, epigenetics, and the environment: Switching, buffering, releasing. *J Allergy Clin Immunol* 2004;113:381-6.
- Vogelzang PF, van der Gulden JW, Tielen MJ, Folgering H, van Schayck CP. Health-based selection for asthma, but not for chronic bronchitis, in pig farmers: an evidence-based hypothesis. *Eur Respir J* 1999;13(1):187-9.
- Von Essen S, Fryzek J, Nowakowski B, Wampler M. Respiratory symptoms and farming practices in farmers associated with an acute febrile illness after organic dust exposure. *Chest* 1999;116(5):1452-8.

Von Essen S. The role of endotoxin in grain dust exposure and airway obstruction. *Curr Opin Pulm Med* 1997;3(3):198-202.

von Essen S. The role of farm exposures in occupational asthma and allergy. *Opin Allergy Clin Immunol* 2001;1:151-6.

Wang XR, Eisen EA, Zhang HX, Sun BX, Dai HL, Pan LD, et al. Respiratory symptoms and cotton dust exposure; results of a 15 year follow up observation. *Occup Environ Med* 2003;60(12):935-41.

Waser M, Schierl R, von Mutius E, Maisch S, Carr D, Riedler J, et al. Determinants of endotoxin levels in living environments of farmers' children and their peers from rural areas. *Clin Exp Allergy* 2004;34(3):389-97.

Williams KL, Roberts K, Nnalue NA, Weary M, Jorgensen JH. *Endotoxins: Pyrogens, LAL Testing, and Depyrogenation*. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 2001.

## 5 Schimmelpilze - Nachweis und Bewertung

Christoph Trautmann

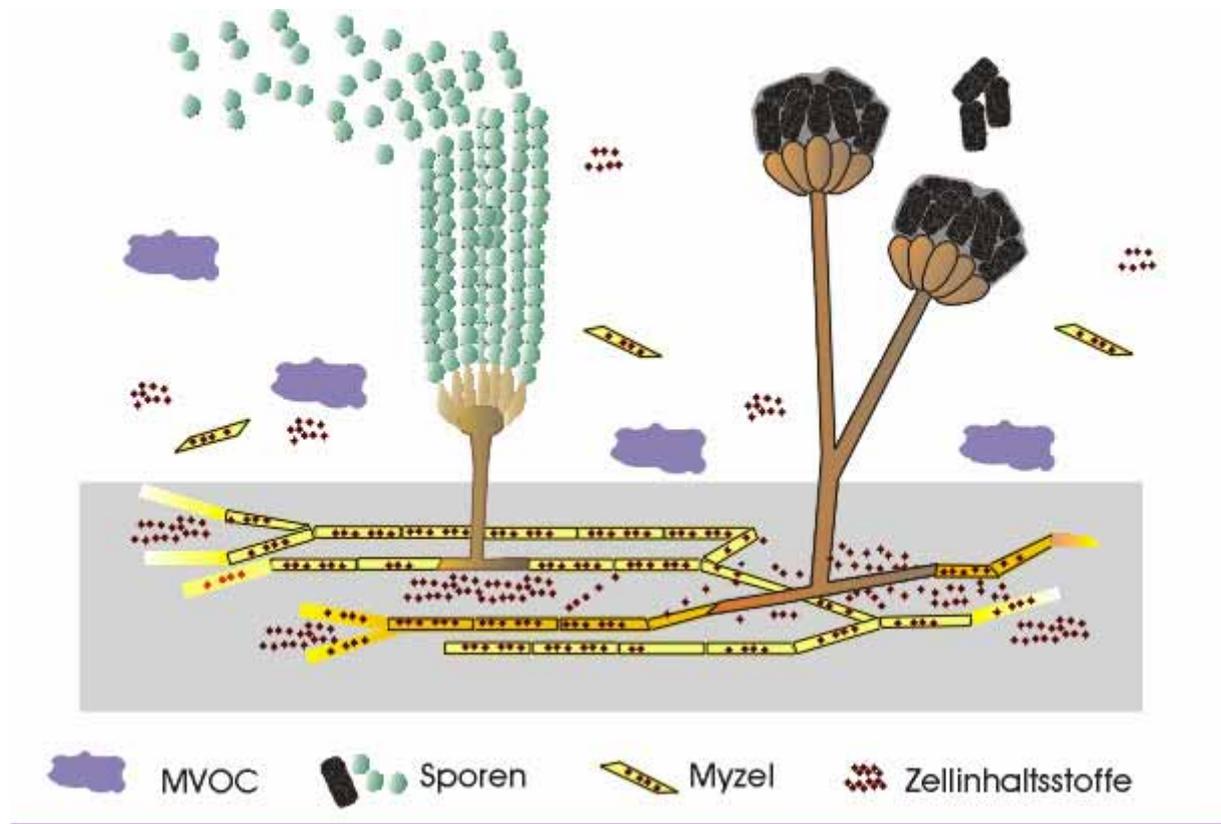
### 5.1 Vorkommen und Lebensansprüche von Schimmelpilzen

Pilze sind praktisch in allen natürlichen Lebensräumen vorhanden und haben als Destruenten im Stoffkreislauf eine wichtige Funktion bei der Zersetzung von organischen Substanzen. Pilze wachsen z.B. auf Blättern oder abgefallenem Laub. Viele Schimmelpilze können innerhalb weniger Tage Sporen bilden, die bereits bei geringen Luftbewegungen von der vorbeistreichenden Luft mitgerissen werden. Je nach Größe und Gewicht lagern sich die Sporen sehr unterschiedlich schnell auf Oberflächen ab. Kleine Sporen z.B. die von vielen *Aspergillus*- oder *Penicillium*-arten (2-4µm) können selbst bei geringer Luftbewegung über viele Stunden in der Luft bleiben. Die Verbreitungseinheiten von Pilzen (Sporen oder Hyphenstücke) sind deshalb insbesondere während der Vegetationsperiode in erhöhten Konzentrationen in der Außenluft vorhanden und werden mit der täglichen Lüftung auch in den Innenraum eingetragen. Wie andere Luftpartikel lagern sich Sporen auf Oberflächen im Innenraum ab. Treffen Pilzsporen in Innenräumen auf geeignete Lebensbedingungen, können sie innerhalb mehrerer Stunden auskeimen und innerhalb weniger Tage zu einer sichtbaren Pilzkolonie heranwachsen.

Die entscheidende Voraussetzung für ein mikrobielles Wachstum in Innenräumen ist eine hohe Materialfeuchtigkeit und ein geeigneter pH-Wert (pH 5-8), weitere Bedingungen wie die Temperatur und das Nährstoffangebot sind in bewohnten Räumen häufig optimal für das Wachstum von Schimmelpilzen.

Pilze bilden auf und in feuchten Materialien feine Haargeflechte (Myzelien bzw. Hyphen). An diesen Myzelien entstehen Sporenträger, an denen Sporen gebildet werden. Je nach Pilzart werden sehr unterschiedliche Sporenformen und Sporenmengen gebildet. Die Sporen werden einzeln, in Ketten oder Köpfchen gebildet und haben oft eine Größe zwischen 2-20 µm. Einzelne Pilze bilden während ihres Wachstums Toxine, die in ihren Myzelien und Sporen enthalten sind. Diese werden nach dem Absterben und der Auflösung der Myzelien (Lysis) freigesetzt. Sie reichern sich entweder im Material an oder werden partikelgebunden an die Raumluft abgegeben. Viele Pilze geben während des Wachstums gasförmige Produkte ihres Sekundärstoffwechsels an die Umgebung ab. Diese MVOCs (microbial volatile organic compounds) können in einem sehr unterschiedlichen Ausmaß vom Menschen als Geruch wahr-

genommen werden, und führen zu dem typischen muffigen Geruch von Schimmelpilzbesiedlungen.



## 5.2 Ursachen für Feuchteschäden

Die häufigsten Ursachen für Feuchteschäden sind:

- Verletzung der Außenhaut eines Gebäudes (Dach, Fassade, Keller)
- Nicht ausreichende Beachtung bauphysikalischer Gesetzmäßigkeiten (z.B. fehlerhafte oder fehlende Dampfbremsen sowie geometrische Wärmebrücken)
- Konstruktions- und Planungsfehler (z.B. Einschluss von Feuchtigkeit, Kontergefälle, Undichtigkeit aufgrund von Materialschumpfung, konstruktive Wärmebrücken )
- Havarien und Überschwemmungen (Platzen von Rohrleitungen oder Wasserbehältern sowie Naturkatastrophen wie Hochwasser)
- Nutzungsfehler (ungenügendes Lüften, ungünstige Platzierung von Möbeln)

Wie bereits oben angeführt, ist eine hohe Materialfeuchtigkeit eine Voraussetzung für ein mikrobielles Wachstum. Die Materialfeuchtigkeit kann ohne technische Hilfsmittel nur unsicher eingeschätzt werden. Insbesondere wird häufig davon ausgegangen, dass Schimmelpilze erst wachsen, wenn sichtbare Wassertropfen bzw. Pfützen auftreten. Stehende Nässe ist allerdings für die meisten Schimmelpilzarten ungeeignet, so dass ein intensives Wachstum in der Regel nur in den angrenzenden durchfeuchteten Materialbereichen beobachtet wird.

Üblicherweise wird im Zusammenhang mit mikrobiellem Wachstum im Innenraum die Materialfeuchte als  $a_w$ -Wert (Wasseraktivität) angegeben. Die Wasseraktivität eines Materials im Ausgleichszustand ist als Quotient aus der relativen Feuchtigkeit der Luft über dem Material geteilt durch die Feuchtigkeit, die sich im Gleichgewicht über reinem Wasser (100%) einstellt definiert. Sie kann daher Werte zwischen 0 – 1 annehmen. In der Praxis wird näherungsweise davon ausgegangen, dass der  $a_w$ -Wert eines Materials, im Gleichgewichtszustand mit der umgebenden Luft, einem hundertstel des Wertes der relativen Luftfeuchtigkeit entspricht. Pilze mit einem hohem Feuchtigkeitsanspruch benötigen zum optimalen Wachstum Materialfeuchten mit einem  $a_w$ -Wert von 0,96-0,99 (entspricht einer relativen Feuchtigkeit von 96%-99%), während stark angepasste Schimmelpilze bei ansonsten optimalen Bedingungen, sogar noch in Materialien mit  $a_w$ -Werten von 0,75 (entspricht einer relativen Raumluftfeuchtigkeit von 75%) wachsen können.

Eine relative Luftfeuchtigkeit von >75% tritt in Deutschland im Innenraum auch in der feuchten Jahreszeit nur selten für längere Zeit auf, so dass auf dem ersten Blick eine Schimmelpilzbildung aufgrund zu hoher Luftfeuchtigkeit nicht befürchtet werden müsste. Häufig wird jedoch unterschätzt, dass die Feuchtigkeitsaufnahmekapazität von Luft mit abnehmender Temperatur sinkt. Für die Praxis bedeutet das, dass Luftmengen die in Kontakt mit kalten Wandoberflächen stehen, abkühlen und dadurch die Feuchtigkeitsaufnahmekapazität absinkt, so dass die relative Luftfeuchtigkeit ansteigt und im schlimmsten Fall sogar eine Kondensation von Feuchtigkeit auf der kalten Wandoberfläche erfolgt. Zum Beispiel reicht bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% und einer Raumtemperatur von 20 °C eine Temperaturniedrigung um nur 7 °C aus, um bereits den so genannten Taupunkt zu erreichen, d.h. die Luftfeuchtigkeit kondensiert z.B. an der Wandoberfläche aus. Eine anhaltende Kondensation führt zu einer starken Befeuchtung der oberen Wandbereiche und sehr häufig zu einem Schimmelpilzwachstum. Es ist außerdem zu beachten, dass bei gleichen Ausgangsbedingungen und einer Abkühlung um nur 4 °C eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 80% erreicht wird, bei der ein Schimmelpilzwachstum bereits möglich ist.

Oberflächentemperaturen von Wohn- und Schlafräumen können im Tageslauf sehr unterschiedliche Werte erreichen, zumal häufig Schlafzimmer weniger beheizt werden und häufig weniger sonnenbestrahlt sind (Nordseite) als die übrigen Räume in der Wohnung bzw. im Haus. Es ist daher neben der relativen Feuchtigkeit und der Raumlufttemperatur (beide können zumindest grob mit Thermometer bzw. Hygrometer ermittelt werden) auch auf die Temperatur von Raumbooberflächen zu achten um Schimmelschäden vorzubeugen.

Nachfolgend werden die Bereiche und Situationen im Haus aufgeführt, in denen am häufigsten Feuchtigkeitsschäden beobachtet werden:

### **Dach**

Idealerweise sollten Dächer zumindest in regenreichen Gebieten eine Dachneigung besitzen, die das Abfließen von Regenwasser sicherstellt. Insbesondere in flachen Dachbereichen ist darauf zu achten, dass Regenwasser nicht in kleinen Senken stehen bleibt. Aufgrund der exponierten Lage unterliegt die Dachaußenhaut starken thermischen und mechanischen Beanspruchungen. Entsprechend müssen Kehlbleche und Anschlussfolien an Schornstein, und Dachfenster etc. so konstruiert werden, dass sie auch bei hohen Temperaturunterschieden oder starkem Winddruck dauerhaft intakt bleiben. Dächer müssen regelmäßig gewartet und bei Leckagen z.B. nach Sturmschäden kurzfristig erneuert werden. Insbesondere müssen vorhandene Regenrinnen und Gesimsbleche regelmäßig gereinigt und auf ihre Dichtigkeit kontrolliert werden.

### **Fassade**

Die Fassade muss einen festen, dichten Putz aufweisen, damit Schlagregen nicht eindringen kann. Wichtige Elemente einer Fassade sind neben intakten Fenstern auch intakte Gesims- und Fensterbleche, die mit einem ausreichenden Überstand und einer Abtropfnase ausgestattet sein müssen, damit anfallendes Regenwasser von der Fassadenoberfläche abgeleitet werden kann. Weiterhin ist auf eine fehlerfreie Funktion von Regenfall- bzw. Standrohren zu achten. Undichte oder verstopfte Leitungen führen häufig zu einer starken Anfeuchtung der betroffenen Fassadenbereiche. Im Sockelbereich wird die Fassade insbesondere durch Spritzwasser beansprucht und wird deshalb z.B. durch besonders zementhaltigen Putz oder Keramikfliesen geschützt.

## **Keller**

Im Keller ist je nach geologischen Gegebenheiten auf eine ausreichende horizontale und vertikale Abdichtung zu achten. Probleme treten nicht nur bei grundwassernahen Standorten sondern insbesondere auch bei stark verdichteten und tonhaltigen Böden auf, wenn Regenwasser nicht versickern kann und es so zu Staunässe oder Schichtenwasserproblemen kommen kann. Um Staunässe zu vermeiden, ist weiterhin darauf zu achten, dass der an das Haus angrenzende Bodenbereich kein Kontergefälle aufweist und das Regenwasser möglichst weit vom Gebäude abgeführt wird.

## **Kondensationsschäden**

Kondensationsschäden treten immer dann auf, wenn relativ warme, feuchte Luft auf kalte Bauteile trifft (siehe oben). Kondensationsschäden können sowohl in den Wintermonaten als auch in den Sommermonaten auftreten. In der kalten Jahreszeit können unzureichend gedämmte Gebäudeaußenbereiche stark abkühlen, so dass die Luftfeuchtigkeit der relativ warmen und feuchten Raumluft an den kalten Oberflächen auskondensieren kann. In den Sommermonaten kann die Außenluft aufgrund hoher Außentemperaturen bei entsprechender Witterung relativ viel Luftfeuchtigkeit aufnehmen. Im Sommer sind jedoch insbesondere Kellerwände und Kaltwasserleitungen häufig deutlich kälter als die Außenluft, so dass es an diesen Oberflächen zu Kondensationen kommen kann (z.B. wenn bei offenen Fenstern ein großer Luftaustausch über längere Zeit erfolgt).

Die Ursache vieler Kondensationsschäden sind unterschiedliche Typen von Wärmebrücken. Als Wärmebrücken bezeichnet man Bereiche, die im Vergleich zu anderen Gebäudebereichen eine besonders gute Wärmeleitfähigkeit haben. Derartige Bereiche können z.B. Stahlträger oder Betonplatten (konstruktive Wärmebrücken) mit Kontakt zum Außenwandbereich sein. Weiterhin treten Kondensationsschäden an so genannten geometrischen Wärmebrücken auf. Eine geometrische Wärmebrücke ist z.B. der Eckbereich zwischen den Außenwänden und der Geschoßdecke. Dieser Bereich hat im Innenraum eine relativ kleine Fläche, über die Wärmeenergie aufgenommen wird, und eine vergleichsweise große Außenfläche über der die aufgenommene Energie verstärkt abgeleitet wird, so dass der Eckbereich geringfügig kälter ist als benachbarte Wandbereiche. Bei kritischen Feuchtegehalten der Raumluft, die in einigen Fällen auch durch Nutzungsfehler (ungenügendes Lüften, hohe Feuchteproduktion) bedingt ist, kann es im Eckbereich zur Kondensation der Luftfeuchtigkeit kommen.

Kondensationsschäden treten auch in Folge ungenügender oder fehlerhafter Errichtung von Dampfbremsen auf. Dampfbremsen werden z.B. in gedämmten Dachausbauten eingesetzt, um die Diffusion der relativ feuchtwarmen Raumluft in den Dämmstoff zu bremsen. Eine ungebremste Diffusion von Feuchtigkeit in eine Dämmung führt häufig dazu, dass die Luftfeuchtigkeit der Raumluft in der Dämmschicht bzw. hinter der Dämmschicht auskondensiert, weil aufgrund der Temperaturerniedrigung der Kondensationspunkt erreicht wird. Dies tritt im Fall von ausgebauten Dachgeschossen vor allem dann auf, wenn die Sparren nicht ausreichend hinterlüftet sind. Ähnliche Effekte können auch dann auftreten, wenn z.B. ein großer Schrank dicht an eine kalte Außenwand gestellt wird, so dass der Austausch wandnaher Luftschichten stark behindert oder unterbunden wird. Hierbei wirkt der Schrank als Dämmung, da er die Wärmeenergie abschirmt und folglich die Wand nicht mehr von der Raumwärme erwärmt werden kann, so dass die Wand hinter dem Schrank abkühlt. In der Regel wird die Diffusion der Raumluftfeuchtigkeit durch einen Schrank nur wenig behindert, so dass feuchtwarme Luft hinter den Schrank diffundieren kann und es zu einer Feuchte Kondensation an der Wand kommen kann.

### **Konstruktions- und Planungsfehler**

Ein häufiger Planungsfehler ist der Einschluss von Feuchtigkeit. Aufgrund von Termindruck wird ein neu errichteter Gebäudeteil häufig zu früh ausgebaut, obwohl die „Baufeuchtigkeit“ noch nicht ausreichend abgetrocknet ist. Beispiele, bei denen der Einschluss von Feuchtigkeit zu gravierenden Schimmelpilzschäden geführt hat, sind vor allem Estriche, die zu früh mit einem dichten Bodenbelag (PVC, Kork oder Linoleum) oder Zusatzaufbauten (Kabelboden) versehen wurden. Weitere gravierende Fehler treten im Sanitärbereich bei der Abdichtung von Duschtassen- und Fußböden auf oder wenn das Bodengefälle zum Fußbodeneinlauf unzureichend ist. Weiterhin führt die Verwendung von schrumpfenden Materialien (Montageschaum etc.) zur Rissbildung zwischen Gebäudeteilen (insbesondere Fenster und Wandverbindungen). Durch einen ungesteuerten Luftaustausch an Rissen und Fugen in der Außenhaut können Kondensationsschäden auftreten.

### **Havarien und Leckagen**

Die Ursachen für sehr massive Feuchteschäden, bei denen große Wassermengen in Gebäude eingetragen werden, sind häufig Havarien von Frisch- und Abwasserleitungen, Wassertanks oder Waschmaschinen sowie Überflutungen bei starken Regenfällen. Häufig werden das Wasser sowie die Ursache, die zum Wassereinbruch geführt hat, beseitigt, ohne für eine ausreichende Trocknung der durchfeuchteten Materialien zu sorgen. Besondere Schwierigkeiten treten bei Durchfeuchtungen von massiven Wänden und Decken auf. So muss zum Beispiel in der Regel eine nasse Lehmschüttung in Decken ausgebaut werden, da sie nicht effektiv getrocknet werden kann. Bei einer allmählichen Trocknung kann es zu einer starken Entwicklung von Mikroorganismen oder sogar zur Entwicklung von holzzerstörenden Pilzen wie z.B. dem Echten Hausschwamm kommen. Problematisch ist auch eine hohe Restfeuchtigkeit bei ungenügend getrockneten Wasserschäden im Estrichbereich. Auch hier sind genügend Nährstoffe vorhanden, so dass es zu einem mikrobiellen Wachstum kommen kann. Insbesondere Schimmelpilzschäden in schwingenden Decken und Böden können beim Begehen über Dehnfugen große Sporenmengen freisetzen. Neben offensichtlichen Schäden, die leicht erkannt und saniert werden können, gibt es viele Fälle, in denen der Schaden nicht direkt sichtbar ist. Beispiele hierfür sind Haarrisse in Wasserleitungen in Versorgungsschächten oder hinter Einbauküchen.

### **Lagerschäden**

Weitere, häufig nicht erkannte Schäden entstehen bei der Lagerung von Gegenständen unter ungeeigneten Bedingungen. So ist z.B. bei der Lagerung im Keller zu beachten, dass bereits bei einer anhaltenden relativen Luftfeuchtigkeit von über 75% zumindest einzelne angepasste Schimmelpilze an den gelagerten Materialien zur Entwicklung kommen können.

### **Fehlerhaftes Nutzerverhalten**

Bereits bei der normalen Nutzung einer Wohnung wird von den Bewohnern durch Transpiration Feuchtigkeit an die Innenraumluft abgegeben. Noch größere Mengen Feuchtigkeit werden beim Duschen, Waschen und Kochen an die Raumluft abgegeben. Diese Feuchtigkeit muss durch ausreichendes und richtiges Lüften wieder abgeführt werden.

Ideal sind mehrfache, kurze Stoßlüftungen, die entsprechend der Nutzung über den Tag verteilt erfolgen. Hierbei sollte in kurzer Zeit ein möglichst großes Luftvolumen ausgetauscht

werden (Durchzug, gegenüber liegende Fenster öffnen). Ein häufiger Lüftungsfehler im Winter ist die Kippstellung der Fenster. Hierdurch wird ein relativ geringer Luftaustausch erzielt und gleichzeitig wird der Fenstersturz des gekippten Fensters stark abgekühlt. An dem abgekühlten Fenstersturz kann die Raumlufffeuchte auskondensieren. Häufig wird die Lüftung jedoch aus Sorge vor hohen Heizkosten gering gehalten. Bei ungenügender Lüftung steigt jedoch die Raumlufffeuchtigkeit an. Hierdurch werden Kondensationen an vorhandenen Wärmebrücken begünstigt.

Anfällig für Pilzschäden sind neben Bädern und Küchen auch Nebenräume wie Schlafzimmer oder Abstellräume. Diese Räume werden häufig nicht geheizt. Ein häufiger Fehler ist, die Verbindungstüren zu diesen Räumen offen zu halten, weil dadurch die relativ warme und feuchte Luft aus den beheizten Räumen einströmen kann und ggf. die enthaltene Luftfeuchtigkeit an den kälteren Wänden auskondensieren kann.

### **5.3 Mikrobiologische Untersuchungen im Innenraum**

Schimmelpilzuntersuchungen von Material-, Luft- oder Staubproben gehören zu den häufigsten angewandten Untersuchungsverfahren bei vermuteten Belastungen durch Feuchteschäden im Innenraum. Die Entscheidung, welche Untersuchungsmethode zur Anwendung kommen sollte, wird vor allem von der Fragestellung und den Bedingungen vor Ort bestimmt.

Einen sehr wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis einer Probenahme können die allgemeinen Bedingungen am Probenahmeort (z.B. besondere Schimmelpilzquellen in der Umgebung, Hygienestandard des Innenraums) oder die Bedingungen während der Probenahme haben. Weiterhin kann der Zeitpunkt der Probenahme einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Z.B. können die Auswirkungen eines Kondensationsschadens auf die Raumluff unterschätzt werden, wenn die Luftuntersuchung im Sommer, bei bereits abgetrockneten Feuchteschäden und verminderter Keimkonzentration, durchgeführt wird. Weiterhin ist abhängig von der Jahreszeit mit einem stark variierenden Einfluss der Außenluft zu rechnen. Letztlich hat auch die Erfahrung des Probennehmers durch die Festlegung der Untersuchungsstrategie und der Probenahmepunkte einen starken Einfluss auf das Untersuchungsergebnis.

Erhöhte Schimmelpilzbelastungen im Innenraum sind häufig auf kontaminierte Materialien zurückzuführen. Sofern eine gezielte Entnahme von belasteten Materialproben möglich ist, sollten derartige Proben für die Beurteilung eines Schadens herangezogen werden.

Luft- oder Staubuntersuchungen werden vor allem dazu genutzt, Schimmelpilze zu erfassen, die aus nicht erkannten Innenraumquellen stammen. Das Ergebnis muss als Summenparameter aufgefasst werden, da es sowohl durch die Außenluft als auch durch den Hygienestandard oder durch mikrobiell belastete Materialien beeinflusst wird. Erhöhte Schimmelpilzkonzentrationen in Luftproben oder Staubproben können hierbei nur Indizien für eine Belastung sein. Ob diese Ergebnisse tatsächlich auf belastete Materialien zurückzuführen sind oder andere Erklärungen haben, muss im konkreten Einzelfall überprüft werden.

Bei der Verwendung unterschiedlicher Methoden sollte die LSM-Regel (Luft → Staub → Material) berücksichtigt werden, d.h. es sollte erst eine ruhige Luftprobenahme bzw. eine Probenahme unter Nutzungssimulation, dann ggf. eine aggressive Probenahme zur Aktivierung potenzieller Sporenquellen durchgeführt werden und erst im Anschluss sollten, wenn erforderlich, Staubproben genommen werden. Die Entnahme von Materialproben sowie die intensive Suche nach versteckten Schäden (Wegrücken von Schränken; Öffnen von Wänden oder Decken etc.) und bauphysikalische Untersuchungen zur Ursachenklärung sollten erst am Ende einer Probenahme durchgeführt werden, um die Aufwirbelung von Staub oder die Freisetzung von eingeschlossenen Sporen vor einer Luftuntersuchung zu vermeiden.

Für die Erstellung eines Gutachtens sowie zur Unterstützung bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse sollte ein Begehungsprotokoll angelegt werden, in dem die folgenden Angaben über die Wohnung bzw. deren Umgebung festgehalten werden:

- Wohnung allgemein (Lage und Größe, Alter des Gebäudes, Wandaufbau, Art der Fenster, Unterkellerung, Fußbodenbeläge)
- die rel. Feuchtigkeit
- Raumtemperatur und Temperaturdifferenzen innerhalb der Wohnung und insbesondere an typischen Wärmebrücken
- Heizungs- und Lüftungsverhalten
- bauliche Besonderheiten z.B. Innenwanddämmung, Wandverkleidung usw.
- Reinigungsgewohnheiten, Müllentsorgung, Sammeln von Biomüll sowie weiteren Müllsorten in der Wohnung
- Geruch (Art und Intensität)
- Letzte Renovierung
- Einrichtungsgegenstände
- Bewohneranzahl und zeitliche Nutzung
- Haustiere (insbesondere mit Strohhaltung wie Kaninchen, Meerschwein u.a.)
- Ausstattung der Wohnung (Topfpflanzen, Fußbodenbelag, Raumlufttechnische Anlagen, Luftbefeuchter usw.)

- Gesundheitliche Beschwerden, die mit der Wohnung gekoppelt sind; treten diese Beschwerden bei verschiedenen Bewohnern auf; tritt eine Besserung der Beschwerden nach längerer Abwesenheit ein
- Umgebung des Hauses (Kompost / Mist, emittierende Betriebe wie Kompostwerke, landwirtschaftliche Betriebe o.ä.).

## 5.4 Nachweismethoden

Der Nachweis von Schimmelpilze im Wohnraum kann durch Kultivierungsmethoden (Anzucht) und mikroskopische Methoden erfolgen. Kultivierungsmethoden und mikroskopische Verfahren unterscheiden sich grundlegend voneinander und haben spezifische Vor- und Nachteile. Der wesentlichste Unterschied besteht darin, dass mit den Kultivierungsmethoden nur solche Strukturen erfasst werden, die auf dem verwendeten Nährmedium wachstumsfähig sind, während bei den mikroskopischen Methoden theoretisch alle in der Probe enthaltenen Strukturen erfasst werden können. Bei kultivierungstechnischen Methoden wird die Konzentration von koloniebildende Einheiten (KBE) angegeben, da nicht bekannt ist, ob eine Kolonie aus einer Spore oder aus einem Myzelstück bzw. aus einem Cluster von Sporen bzw. Zellen hervorgegangen ist. Mit mikroskopischen Untersuchungen können prinzipiell Einzelsporen bzw. Sporencluster unterschieden werden. Allerdings ist in der Praxis der Nachweis von Pilzsporen auf Oberflächen aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes nur an mäßig oder stärker belasteten Proben sinnvoll. In wenigen Fällen können auch einzelne Pilzarten aufgrund charakteristischer Sporen oder Sporenträger bereits mit mikroskopischen Methoden identifiziert werden. In der Regel müssen jedoch für eine Artbestimmung Kultivierungsmethoden verwendet werden. Für die Erfassung von Innenraumquellen kommt der Artenzusammensetzung eine hohe Bedeutung zu. Ihre Erfassung ist notwendig, um zum einem das Auftreten von fakultativen Krankheitserregern zu ermitteln und zum anderen, um so genannte Indikatororganismen, die auf den Befall von bestimmten Materialien hindeuten, zu erfassen.

Ein großer Vorteil der mikroskopischen Methode ist, dass die Proben sofort ausgewertet werden können, während Kultivierungsuntersuchungen eine Inkubationszeit zwischen 5-10 Tagen benötigen.

## 5.5 Allgemeine Angaben zu Kultivierungsmethoden

Für den Nachweis kultivierbarer Pilze in Luft-, Staub- und Materialproben hat sich die Kombination von Malzextraktagar (MEA) für Pilzarten mit hohem Feuchtigkeitsanspruch und Dichloran 18% Glycerol-Agar (DG18-Agar) für solche mit niedrigerem Feuchtigkeitsanspruch bewährt. Zur Unterdrückung von Bakterien wird den Nährmedien Chloramphenicol zugegeben.

Die Nähragarschalen werden bei  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  bzw.  $37^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  inkubiert. Die Inkubationszeit ist abhängig vom Nährmedium und den Schimmelpilzen, die sich darauf entwickeln. Sie sollte auch bei Malzextraktagar mindestens 5 Tage betragen. In vielen Fällen und insbesondere bei DG18-Agar ist eine Inkubationszeit von 10 Tagen und mehr notwendig, um eine qualitative und quantitative Aussage treffen zu können. Ab dem dritten Inkubationstag und danach im Abstand von 2-3 Tagen muss die KBE-Konzentration ausgezählt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Sporen von Pilzen mit sehr schneller Sporenbildung eventuell bereits zu Sekundärkolonien auswachsen können. Die Schimmelpilze können sich gegenseitig im Wachstum behindern. Im Idealfall sollten die Nähragarschalen (Durchmesser ca. 9 cm) nicht mehr als 100 KBE enthalten.

Mit Kultivierungsmethoden können koloniebildende Einheiten (KBE) von Schimmelpilzen erfasst werden. Die Konzentration wird soweit möglich als Mittelwert der Parallelen berechnet. Stark gestörte Ansätze, z.B. aufgrund einzelner schnellwachsender Pilzarten, können für die Konzentrationsberechnung nicht herangezogen werden.

## 5.6 Materialuntersuchungen

Für die Bewertung von Innenraumschäden ist die Biomasse eines mikrobiellen Schadens abzuschätzen. Sie wird durch den Befallsumfang, die Tiefe sowie die Intensität und die mikrobielle Aktivität des befallenen Materials bestimmt.

Die Probenahme erfolgt abhängig vom befallenen Material mit geeigneten und zuvor sterilisierten Werkzeugen. Bei der Probenentnahme und beim -transport ist darauf zu achten, dass keine Verschleppung von Pilzen aus befallenen Probenbereichen in weniger befallene Probenbereiche erfolgt. Die Materialprobe wird nach optischer Inspektion beschrieben und ggf. der Geruch dokumentiert. Materialproben können sowohl mit mikroskopischen Techniken als auch mit der Suspensionsmethode sowie durch direktes Auftragen beziehungsweise durch Abklatschen auf das Nährmedium untersucht werden.

Zur mikroskopischen Untersuchung werden von unterschiedlichen Materialstellen kleine Zupf- oder flache Materialschnittproben entnommen, in Lactophenolblaulösung oder Baumwollblaulösung eingedeckt und mikroskopiert. Wenn eine direkte mikroskopische Untersuchung nicht sinnvoll durchgeführt werden kann, ist häufig das Abdrücken von Folienkontakten möglich. Dazu wird transparenter Klebefilm (Kristallklar) auf die Materialoberfläche gedrückt, der anschließend direkt mikroskopiert werden kann.

Die Suspensionsmethode ist für eine quantitative und qualitative Erfassung von keimfähigen Pilzstrukturen am oder im Material geeignet. Häufig ist eine Materialzerkleinerung notwendig. Die Zerkleinerung sollte zu Materialstücken mit einem Durchmesser von  $< 0,5$  cm führen. Anschließend werden definierte Materialmengen in Puffer (Phosphatpuffer mit 0,01 % Tween 80) suspendiert. Die Suspension kann im Schikanekolben auf einem Schütteltisch bei 200 Umdrehungen pro Minute oder in einem Labormixer (Waring Blender) erfolgen. Die Puffermenge ist abhängig vom Materialvolumen und muss so gewählt werden, dass das Material umspült wird. Die gewonnene Suspension wird in Abhängigkeit von der vermuteten Schimmelpilzbelastung in Zehnerschritten verdünnt und in Parallelen auf Nährmedien ausplattiert und inkubiert (siehe oben).

Das direkte Abklatschen von Materialproben oder das Aufbringen kleiner Materialproben auf Nährmedien wird primär für die Bestimmung der dominierenden Schimmelpilzarten an Materialproben benutzt. In vielen Fällen ist darüber hinaus eine grobe Einschätzung der Materialproben in gering, mäßig oder stark belastet möglich.

## 5.7 Luftproben

Luftuntersuchungen im Innenraum können mit Kultivierungsmethoden und mikroskopischen Methoden erfolgen. Für beide Probenahmetechniken werden Kurzzeitsammlungen mit Impaktoren empfohlen.

Die folgenden Aspekte sind eine wichtige Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse von Luftuntersuchungen (Kultivierung und Mikroskopie):

- Das Sammelgerät muss einen Abscheidungsgrad (Cut-Off) von  $< 1\mu\text{m}$  haben.
- Der vom Gerätehersteller vorgegebene Volumenstrom sowie der Abstand zwischen Impaktionsdüsen und Sammelmedium ist unbedingt einzuhalten, da hierdurch der Abscheidungsgrad entscheidend beeinflusst wird.
- Damit der Einfluss der Außenluft minimiert wird, sollten alle Fenster und Türen 6 Stunden vor der Messung geschlossen werden.

- Die Messung sollte in einer Höhe von ca. 1,2 m erfolgen. Insbesondere bei bodennahen Messungen ist mit veränderten Hintergrundwerten zu rechnen.
- Zusätzlich zu einer ruhigen Sammlung unter Nutzungsbedingungen sollte eine aktive Sammlung durchgeführt werden, bei der durch starke Aktivität Schimmelpilzquellen in Wänden oder unter dem Estrich aktiviert werden, um potenzielle Sporenbelastungen (worst case) zu dokumentieren.
- Als Referenzuntersuchung sind Außenluftproben mitzuführen. Der Probenahmeort ist so zu wählen, dass er im Zusammenhang mit dem untersuchten Innenraum steht. Ideal ist die Probenahme auf der Wind zugewandten Seite (Luv-Seite).
- Luftuntersuchungen unterliegen erfahrungsgemäß sehr hohen Schwankungen. Es sollten drei Parallelmessungen durchgeführt werden.
- Der Sammler muss zwischen der Untersuchung verschiedener Räume desinfiziert werden.

Das Probenvolumen für kultivierungstechnische Luftuntersuchungen ist abhängig von der Belastungssituation und sollte so gewählt werden, dass nicht mehr als 100 KBE pro Nährgarschale auswachsen. Für die Beurteilung von mäßig belasteten Innenräumen haben sich 100 Liter Probenluft bei einer Bebrütung bei 25°C und 200 Liter Probenluft bei 37°C als praktikabel erwiesen. Es wird jedoch empfohlen bei stärkeren Belastungen zusätzliche kleinere Probenahmenvolumen mit zu führen.

Bei der Luftpartikelsammlung werden die partikulären Bestandteile eines definierten Luftvolumens auf einen Objektträger mit spezieller Adhäsionsbeschichtung impaktiert. Diese Luftpartikel enthalten neben lebenden Sporen und Myzelien auch tote Pilzbestandteile und Bakterienaggregate. Das Probenvolumen ist abhängig von der Belastungssituation. Für die Beurteilung mäßig belasteter Innenräume sind 200 Liter Probenluft geeignet. Die Proben werden in Lactophenolblaulösung eingebettet und mikroskopisch ausgewertet.

## 5.8 Staubuntersuchungen

Untersuchungen von Staubproben werden zurzeit sehr unterschiedlich durchgeführt, so dass kaum vergleichbare Untersuchungen existieren. Die hier dargestellte Methode der gewichtsbezogenen Staubuntersuchung entspricht in ihren Grundzügen den am häufigsten verwendeten Varianten aus der Vielzahl von Möglichkeiten.

Die folgenden Aspekte sind wichtige Voraussetzungen für aussagekräftige Ergebnisse von Staubuntersuchungen:

- Es wird der Staub von ca. 2 m<sup>2</sup> Teppichböden untersucht
- 7 Tage vor der Probennahme sollte keine Reinigung der zu untersuchenden Räume mehr erfolgen.
- Der Ort der Probenahme ist so zu wählen, dass er repräsentativ für die vermutete Belastung ist. In der Regel werden mehrere Teilflächen abgesaugt.
- Die Staubprobe wird mittels eines speziellen Planfilterhalter auf einem Gelatinefilter (Porengröße 3 µm) oder einem Polycarbonatfilter gesammelt (VDI 4300, Blatt 8, Messen von Innenraumluftverunreinigungen-Probenahme von Hausstaub).
- Das Verhältnis zwischen Saugöffnung und Volumenstrom muss so gewählt werden, dass auch feine Staubpartikel genügend stark angesaugt werden.
- Die zu untersuchende Bodenfläche ist so auszuwählen, dass eine Staubmenge von mehr als zwei Gramm gewonnen wird.
- Der Staub wird gesiebt, und die Siebfraktion kleiner 63 µm wird gewogen und für die weitere Untersuchung verwendet.
- Die Staubprobe wird mit dem 100fachen ihres Gewichts mit Verdünnungslösung (0,9 % NaCl, 0,01 % TWEEN 80-Lösung) versetzt und 30 min im Schikanekolben bei 200 UpM geschüttelt.
- Die gewonnene Suspension wird in Abhängigkeit von der vermuteten Schimmelpilzbelastung in Zehnerschritten verdünnt. Jeweils 0,1 ml der verschiedenen Verdünnungsschritte werden mindestens in Parallelen auf Nährmedien ausplattiert und inkubiert (siehe oben).

## 5.9 Bewertung von mikrobiellen Schäden

Schimmelpilze können irritierende, allergene, toxische und in seltenen Fällen sogar pathogene Auswirkungen auf Menschen haben. Als die häufigste Auswirkung von Schimmelpilzbelastungen werden allergische Reaktionen und undefinierte Beschwerden wie Müdigkeit oder Konzentrationsstörungen beschrieben. In Anbetracht der adversen Effekte von Mikroorganismen, sollte nach dem Minimierungsgebot prinzipiell eine Vermeidung von mikrobiellen Be-

lastungen erfolgen. Das bedeutet, dass bei einer deutlichen, statistisch abgesicherten Erhöhung der Schimmelpilzkonzentration in einem Innenraum im Vergleich zum allgemeinen Hintergrund, eine zusätzliche Quelle anzunehmen ist, die aus Gründen der Vorsorge beseitigt werden sollte.

Ausführliche Bewertungshilfen für Schimmelpilze in Material-, Luft- und Staubproben wurden im „Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen“ vom Umweltbundesamt [1], im Schimmelpilzleitfaden des Landesgesundheitsamtes Baden-Württembergs [2] sowie im Bundesgesundheitsblatt [2] [3] veröffentlicht. Nachfolgend werden die grundlegenden Aspekte zusammengefasst.

### **5.10 Bewertung von Materialproben**

Allgemein liegt die Konzentration von Schimmelpilzen an technisch hergestellten fabrikneuen Materialien unter der Nachweisgrenze. Dennoch ist der Nachweis mäßiger Schimmelpilzkonzentrationen an Materialoberflächen, die von Luft umspült werden, nicht ungewöhnlich. In Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur, der Standzeit und der Luftqualität ist eine unterschiedlich starke Sporensedimentation zu erwarten. Derartige Hintergrundkonzentrationen können in der Regel an der Artenzusammensetzung sowie der unregelmäßigen und durchmischten Anordnung der Sporen auf dem Material erkannt werden. Recyclingprodukte und Naturprodukte haben allgemein höhere Hintergrundwerte und können in Einzelfällen stärker mit Schimmelpilzen belastet sein.

Der Nachweis von Schimmelpilzen an Materialien kann häufig bereits anhand von mikroskopischen Untersuchungen erfolgen. Bei diesen Untersuchungen lässt sich in der Regel eindeutig erkennen, ob vorhandene Schimmelpilzstrukturen (Myzel und Sporenträger) auf dem Material gebildet wurden oder auf anderem Wege auf das Material gekommen sind. Die Keimfähigkeit von vorhandenen Schimmelpilzen kann dagegen nicht sicher erkannt werden und muss durch Kultivierungsmethoden untersucht werden. Weiterhin ist der mikroskopische Nachweis zeitaufwendig und daher nur auf kleinen Flächen bzw. in Stichproben möglich. Geringe und farblich unauffällige Besiedlungen können bei mikroskopischer Untersuchung, in der immer nur ein Teilbereich der Gesamtprobe untersucht werden kann, leicht übersehen werden und können häufig besser durch kultivierungstechnische Untersuchungen erfasst werden. Allerdings sollten die Ergebnisse von Kultivierungsmethoden besonders kritisch auf Plausibilität überprüft werden. Zum einen können nicht keimfähige Schimmelpilze auch in hohen Konzentrationen im Material enthalten sein, die dann nicht erfasst werden (falsch negatives Ergebnis) und zum anderen können hohe Keimzahlen an Materialien festgestellt

werden, die z.B. durch Sporen aus benachbarten Schadensbereichen eingetragen wurden (Kontamination).

Die Schimmelpilzzusammensetzung und ihre Konzentration bei Feuchteschäden werden wesentlich durch den Feuchtigkeitsgehalt und die Nährstoffqualität bestimmt. Bevorzugt werden allgemein organische Materialien wie z.B. Holz, Pressspan, Tapeten, Farben, Leder und Textilien aber auch Mischmaterialien wie Gipskartonplatten. Weiterhin können auch Substanzen wie Weichmacher (z.B. in flexiblen Kunststoffen wie Folien und Schaumstoffen), Tenside (z.B. in Farben) oder Putzzuschlagsstoffe sowie Staubablagerungen als Nährstoffgrundlage dienen. Der Nährstoffgehalt der verschiedenen Materialien hat einen Einfluß auf die Bildung von Pilzbiomasse. Die Sporenbildung wird darüber hinaus von weiteren Eigenschaften wie z.B. der Oberflächenstruktur und der Materialporosität beeinflusst.

Obwohl Materialien wie Putz, Gipskarton, Gasbeton, Glasfaser, Pressspan und Tapete sehr unterschiedliche Nährstoffgehalte besitzen, werden in der Praxis zumindest einzelne Proben der aufgeführten Materialien mit massiven Schimmelschäden festgestellt, in denen die Pilzkonzentration  $10^6$  KBE pro Gramm Material überschreitet.

Der Schimmelpilzbewuchs unterschiedlicher Materialien kann jedoch nur schlecht miteinander verglichen werden, da die aufgeführten Materialien sehr unterschiedliche Dichten und Oberflächen besitzen. Weiterhin werden häufig Materialien untersucht, die bereits längere Zeit eingebaut waren und deren Nährstoffgehalt z.B. durch Staubablagerungen oder durch Kontakt oder Durchmischung mit anderen Materialien verändert wurde. Beispiele hierfür sind Putzproben, auf denen bereits unterschiedliche Tapetenkleber und Tapeten aufgetragen wurden oder Mineralfasermaterial, das im Dachausbau im direkten Kontakt mit Holzsparren oder mit Gipskartonplatten verbaut war.

Zu den häufigsten Pilzarten bei Feuchteschäden, die darüber hinaus auf einem breiten Spektrum von Materialien und Feuchtigkeitsgehalten hohe Konzentrationen bilden, gehören *Aspergillus versicolor* und *Penicillium chrysogenum*. Wenngleich viele Schimmelpilze unter geeigneten Bedingungen auf unterschiedlichen Materialien in hohen Konzentrationen auftreten können, werden andere Arten überwiegend an bestimmten Materialien und nur bei bestimmten Feuchtigkeitsgehalten in hohen Konzentrationen festgestellt.

**Tapete:** *Acremonium strictum*, *A. murorum*, *A. restrictum*, *Ascotricha chartarum*, *Chaetomium globosum*, *Myxotrichum spp.*, *Stachybotrys chartarum*, *Ulocladium chartarum*, *Verticillium luteoalbum*, *Wallemia sebi*

**Gipskarton:** *Acremonium murorum*, *Chaetomium globosum*, *Scopulariopsis* spp., *Stachybotrys chartarum*, *Ulocladium chartarum*

**Pressspan:** *Chaetomium globosum*, *Trichoderma* spp., *Scopulariopsis chartarum*, *Paecilomyces variotii*

**MDF-Materialien** (Fußleisten, Bilderrahmen): *Eurotium herbariorum*

**Holz:** *Trichoderma viride*, *T. harzianum*, *Ceratocystis* spp. *Paecilomyces variotii*, *Cladosporium oxysporum*

**Putz:** *Acremonium strictum*, *A. furcatum*, *Acremonium* spp., *Botryotrichum piluliferum*, *Engyodontium album*, *Phialophora fastigiata*, *Pyronema domesticum*, *Scopulariopsis brevicaulis*, *S. brumptii*.

**Styropor:** *Acremonium* spp., *Aspergillus sydowii*, *Engyodontium album*, *Scopulariopsis* spp., *Verticillium psalliotae*,

**Leder** (Schuhe, Möbel): *Eurotium herbariorum*, *E. amstelodami*

„feuchtes Badezimmer“: *Phialophora* spp., *Exophiala jeanselmei*, *Fusarium* spp.

Viele andere Pilze wie z.B. *Penicillium expansum*, *P. brevicompactum* und *P. olsonii*, die ebenfalls in Feuchteschäden auftreten, werden auch an Textilien, Lebensmitteln und im Hausmüll häufig festgestellt.

Pilzarten, die insbesondere in sehr feuchten Materialien auftreten, sind *Stachybotrys chartarum*, *Acremonium* spp., *Chaetomium globosum*, *Phialophora fastigiata*, *Fusarium* spp., *Trichoderma* spp. und *Mortierella* spp.

Pilzarten, die in Materialien mit geringer Feuchte häufig auftreten und darüber hinaus unter feuchten Bedingungen fehlen, sind *Eurotium* spp., *Wallemia sebi*, *Aspergillus restrictus* und *Aspergillus penicillioides*.

Im Leitfaden des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg [2] bzw. des Umweltbundesamtes [1] wird die Bewertung von verschimmelten Materialien in drei Kategorien entsprechend der nachstehenden Tabelle vorgeschlagen. Hierbei werden die Schäden primär nach ihrer flächigen Ausbreitung bewertet. Außerdem soll eine höhere Einstufung erfolgen, wenn der Schaden nicht nur flächig ist sondern auch in die Tiefe geht und daher eine größere Biomasse hat. Weiterhin ist die Zusammensetzung der Schimmelpilze zu berücksichtigen. Eine höhere Einstufung sollte auch erfolgen, wenn häufig Schimmelpilzarten auftreten, de-

nen eine besondere gesundheitliche Bedeutung zugeordnet wird. Weiterhin sollte eine höhere Einstufung erfolgen, wenn mit einer starken Verbreitung von Mikroorganismen zu rechnen ist, z.B. bei Pilzarten mit besonders gut „flugfähigen“ Sporen oder bei Vibrationen in Gebäudeteilen oder bei starken Luftbewegungen.

Bewertung von Materialproben mit Schimmelpilzbewuchs nach [2]

sichtbare und nicht sichtbare Materialschäden	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
Schadensausmaß	keine bzw. sehr geringe Biomasse (z. B. geringe Oberflächenschäden < 20 cm <sup>2</sup> )	mittlere Biomasse; oberflächliche Ausdehnung < 0,5 m <sup>2</sup> , tiefere Schichten sind nur lokal begrenzt betroffen	große Biomasse; große flächige Ausdehnung > 0,5 m <sup>2</sup> , auch tiefere Schichten können betroffen sein
<p><b>Wichtige Anmerkungen Schimmelbefall an Materialien!</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiefenschäden: Wenn bei einem Oberflächenschaden der Pilzbewuchs tief in das Material geht, muss der Schaden entsprechend dem Befallsumfang ggf. höheren Kategorien zugeordnet werden.</li> <li>2. Es ist zwischen einem aktiven Befall und einem abgetrockneten Altschaden oder einer Sporenkontamination zu unterscheiden: Bei einem aktiven Befall sollte fallbezogen durch die Sachverständigen entschieden werden, ob die Kategorie erhöht wird, denn:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Die Mikroorganismenpopulation kann sich relativ schnell ändern, und es können unerwartete krankheitserregende Schimmelpilzarten auftreten.</li> <li>b) Es können kontinuierlich und über längere Zeit hohe Mengen lebensfähiger Sporen abgegeben werden (im Gegensatz dazu nimmt bei einem Altschaden die Sporenkonzentration und deren Lebensfähigkeit mit der Zeit ab).</li> <li>c) Ein aktiver Schimmelpilzbefall stellt häufig die Nährstoffgrundlage für andere Organismen wie z. B. Milben dar. Nach Austrocknung eines Schadens nimmt in der Regel die Anzahl dieser Organismen schnell ab.</li> </ol> </li> <li>3. Organismenzusammensetzung: Ein häufiges bis überwiegendes Auftreten von Schimmelpilzarten, denen eine besondere gesundheitliche Bedeutung zugeordnet wird (z.B. <i>Aspergillus fumigatus</i>, <i>Aspergillus flavus</i>, <i>Stachybotrys chartarum</i>), führt zu einer Verschiebung in eine höhere Kategorie.</li> </ol>			

**Kategorie 1:** Normalzustand bzw. geringfügiger Schaden

**Kategorie 2:** Geringer bis mittlerer Schaden. Die Freisetzung von Pilzbestandteilen sollte unmittelbar unterbunden und die Ursache mittelfristig ermittelt und saniert werden.

**Kategorie 3:** Großer Schaden. Die Freisetzung von Pilzbestandteilen sollte sofort unterbunden werden, die Ursache des Schadens ist unverzüglich zu ermitteln und zu beseitigen. Die Betroffenen sind auf geeignete Art und Weise über den Sachstand zu informieren, eine umweltmedizinische Betreuung sollte erfolgen. Nach abgeschlossener Sanierung hat eine Kontrolluntersuchung stattzufinden.

## 5.11 Bewertung von Luftproben

Bei der Beurteilung von Luftproben sind mehrere Faktoren zu beachten:

### 1) Außenlufteinfluss

Der Sporengehalt der Außenluft unterliegt im Jahreslauf starken Schwankungen und kann besonders während der Sommer- und Herbstmonate sehr hoch sein. Da in vielen Fällen die Außenluft einen Einfluss auf die Innenraumluft hat, sollte für die Interpretation von Innenluftuntersuchungen eine Vergleichsmessung der Außenluft mitgeführt werden. Schimmelpilzarten, die in der Außenluft insbesondere in den Sommer- und Herbstmonaten in hohen Konzentrationen auftreten und innerhalb weniger Tage starken Konzentrationsschwankungen unterworfen sind, können auch im Innenraum stark schwankende Konzentrationen aufweisen (ein jahreszeitlicher Einfluss macht sich vor allem bei den Gattungen *Cladosporium* und *Alternaria*, Hefen sowie bestimmten steril wachsenden Pilzen in der Innenraumluft bemerkbar). Für diese Pilzarten sind feste Hintergrundkonzentrationen nicht sinnvoll. Aufgrund des möglichen Außenlufteinflusses und der ggf. starken Konzentrationsschwankungen dieser Pilze ist es häufig besser die Innenraumkonzentration mit der entsprechenden Konzentration in der Außenluft ins Verhältnis zu setzen.

### 2) Indikatorpilze für Feuchteschäden und andere Pilzarten, die nur in geringen Konzentrationen in der Außenluft auftreten

Pilze, die selten in der Außenluft vorkommen und die typischerweise bei Feuchteschäden auftreten, können anhand fester Hintergrundkonzentrationen bewertet werden. Indikatorpilze für Feuchteschäden können bei geringen Konzentrationen (in mehreren Paralleluntersuchungen) Hinweise auf befallene Materialien sein. Leider sind die Sporen in der Innenraumluft nicht homogen verteilt und Parallelmessungen weisen dementsprechend hohe Schwankungen auf. Die Praxis zeigt daher, dass bis auf wenige Ausnahmen geringe Konzentrationen einzelner Pilzarten eine hohe Standardabweichung aufweisen und erst bei einer Konzentration von über 50 KBE/m<sup>3</sup> (nach Bereinigung des Außenlufteinflusses) eine Bewertung möglich ist.

### **3) Bewertung einzelner Arten bzw. Pilzgattungen und Artengruppen**

In der Praxis können bei der Analyse einer Luftkeimplatte oft nur bestimmte Pilze bis auf das Artniveau differenziert werden und andere Pilze werden häufig nur als Gattungskonzentration angegeben, weil eine Differenzierung der einzelnen Arten mit einem unverhältnismäßig großen Arbeitsaufwand verbunden wäre. In vielen Fällen setzt sich die Konzentration einer Gattung aus den Konzentrationen mehrerer Einzelarten zusammen. Es ist daher logisch, dass für Gattungen höhere Hintergrundkonzentrationen als für Einzelarten gelten.

### **4) die Sporenbildungsrate und die „Flugfähigkeit“ der Sporen verschiedenen Pilzarten**

Die Sporenbildungsrate und die Sporenflugfähigkeit ist bei den verschiedenen Pilzarten z.T. sehr unterschiedlich. Die Erfahrung zeigt, dass Pilzarten mit sogenannten trockenen, gut flugfähigen Sporen bereits bei geringen Materialschäden zu hohen Sporenkonzentrationen in der Luft führen können. Die Sporen dieser Arten sind in der Regel relativ klein und werden in großer Anzahl gebildet. Sie sind nicht in eine „Schleimmatrix“ eingebettet, so dass einzelne Sporen oder kleine Sporenaggregate durch leichte Luftbewegungen verbreitet werden können. Als Leitarten für diesen Verbreitungstyp können Arten der Gattungen *Penicillium* und *Aspergillus* gelten. Wesentlich geringere Luftbelastungen werden dagegen festgestellt, wenn Materialien von Pilzen besiedelt wurden, deren Sporen relativ gross sind oder nach ihrer Bildung in Schleimsubstanzen gesammelt werden und daher schlecht flugfähig sind. Als Leitarten für diesen Verbreitungstyp gelten viele Arten der Gattungen *Acremonium* oder *Fusarium* sowie Sporen der Pilzart *Stachybotrys chartarum*.

### **5) Aktivität während der Probenahme.**

Die Aktivität während einer Luftprobenahme sowie die allgemeinen Bedingungen am Probenahmeort haben einen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis der Untersuchung. Für Untersuchungen wird eine Nutzungssimulation vorgeschlagen. Hiermit ist die normale Bewegung im Raum gemeint und keine aktive Aufwirbelung von sedimentierten Staub.

Die nachfolgenden beiden Tabellen enthalten Bewertungshilfen für Luftkeimsammlungen und Luftpartikeluntersuchungen nach [3]. Die Proben werden nach ihrer Konzentration in drei Kategorien unterteilt. Kategorie 0 entspricht Hintergrundkonzentrationen, Kategorie 1 entspricht einem schwachen Hinweis auf eine Belastung und die Kategorie 2 entspricht einem deutlichen Hinweis auf verschimmelte Materialien.

**Bewertungshilfe für kultivierbare Pilze in der Luft (KBE/m<sup>3</sup>) nach [3]**

	<b>Kategorie 1 Innenraumquelle unwahrscheinlich</b>	<b>Kategorie 2 schwacher Hinweis auf Innenraumquellen</b>	<b>Kategorie 3 starker Hinweis auf Innenraumquellen</b>
AL-Typ-Sommer	$RL \leq AL$	$RL \leq [AL \times 2]$	$RL > [AL \times 2]$
$\Sigma$ RL-Typ	$RL \leq [AL + 150]$	$RL \leq [AL + 500]$	$RL > [AL + 500]$
Einzelgattung	$RL \leq [AL + 100]$	$RL \leq [AL + 300]$	$RL > [AL + 300]$
Einzelart	$RL \leq [AL + 50]$	$RL \leq [AL + 100]$	$RL > [AL + 100]$
Einzelart GS	$RL \leq [AL + 30]$	$RL \leq [AL + 50]$	$RL > [AL + 50]$

**AL-Typ-Sommer** = Pilze, deren Konzentration in der Raumluft durch die Außenluft stark beeinflusst wird. Es wird die Raumluftkonzentration ins Verhältnis zur Außenluftkonzentration gesetzt. Beispiele sind Cladosporium spp. und Hefen im Sommer. Die Bewertung dieser Pilze kann bei ungewöhnlich geringen Außenluftkonzentrationen (z.B. bei starker Hitze oder UV-Strahlung) zu Fehlinterpretationen führen. Im Winter kann diese Bewertung nicht durchgeführt werden (siehe Einzelgattung).

$\Sigma$  **RL-Typ** = Summe der Pilze, die wenig von der Außenluft beeinflusst werden. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 150 KBE/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

**Einzelgattung** = Die Raumluftkonzentration von Vertretern einer Pilzgattung, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird (z.B. Penicillium spp. oder Aspergillus spp; im Winter auch Cladosporium spp. oder Hefen, sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 100 KBE/m<sup>3</sup> nicht überschreiten).

**Einzelart** = Einzelne Pilzart, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 50 KBE/m<sup>3</sup> nicht überschreiten

**Einzelart GS** = Einzelne Pilzart mit geringer Sporenfreisetzungsrates (z.B. Phialophora sp., Stachybotrys chartarum), die von der Außenluft wenig beeinflusst wird. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 30 KBE/m<sup>3</sup> nicht überschreiten

**Bewertungshilfe für Gesamtsporen in der Luft (Sporen/m<sup>3</sup>) nach [3]**

	Kategorie 1 Innenraumquelle unwahrscheinlich	Kategorie 2 schwacher Hinweis auf Innenraumquellen	Kategorie 3 starker Hinweis auf Innenraumquellen
AL-Typ	RL ≤ [AL x 1,2]	RL ≤ [AL x 2]	RL > [AL x 2]
∑ Typ Asp./Pen	RL ≤ [AL + 300]	RL ≤ [AL + 800]	RL > [AL + 800]
Stachybotrys	RL ≤ AL	RL ≤ [AL + 10]	RL > [AL + 10]
Chaetomium	RL ≤ AL	RL ≤ [AL + 20]	RL > [AL + 20]
∑ diverser Pilze	RL ≤ [AL + 400]	RL ≤ [AL + 800]	RL > [AL + 800]
Myzelbruchstücke	RL ≤ [AL + 150]	RL ≤ [AL + 300]	RL > [AL + 300]

**AL-Typ** = Pilze, deren Konzentration in der Raumluft durch die Außenluft stark beeinflusst werden (in den Sommermonaten z.B. Ascosporen, Basidiosporen, Cladosporium und Hefen). Es wird die Raumluftkonzentration ins Verhältnis zur Außenluftkonzentration gesetzt. Das Verhältnis 1,2 sollte nicht überschritten werden.

**∑ Typ Asp./Pen** = Summe der Sporen vom Typ Aspergillus/Penicillium (kleine runde Sporen). Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 300 Sporen/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

**Stachybotrys** = Sporen vom Typ Stachybotrys. Die Raumluftkonzentration sollte nicht über der Außenluftkonzentration liegen.

**Chaetomium** = Sporen vom Typ Chaetomium. Die Raumluftkonzentration sollte nicht über der Außenluftkonzentration liegen.

**∑ diverser Pilze** = Summe diverser Pilzsporen, die nur wenig von der Außenluft beeinflusst werden. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration nicht über 400 Sporen/m<sup>3</sup> liegen.

**Myzelbruchstücke** = Die Raumluftkonzentration der Myzelbruchstücke sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration nicht über 150 Myzelstücke/m<sup>3</sup> liegen.

**5.12 Bewertung von Staubproben**

Hausstaubproben werden untersucht, um eine Sporenausbreitung von einer bekannten Quelle zu erfassen, oder um die Bedingungen der letzten Wochen am Probenahmeort besser erfassen zu können. Theoretisch setzt sich Hausstaub vor allem aus sedimentierten Sporen zusammen, die aus der Außenluft sowie ggf. aus Feuchteschäden oder anderen Innenraumquellen (z.B. verschimmelte Lebensmittel oder Müll) stammen. Häufig sind in Hausstaubproben allerdings auch Schimmelpilzsporen, die nicht durch Sedimentation sondern z.B. mit Schmutzpartikeln (Benutzung mit Straßenschuhen) oder mit Blumenerde sowie Pflanzenbestandteilen in die Probe gelangt sind, vorhanden. Derartige Verunreinigungen können zu falsch positiven Bewertungen führen. Es wird daher empfohlen, sofern nicht die Sporenausbreitung von einer bekannten Quelle überprüft werden soll, parallel zur Staubuntersuchung noch Luftkeimsammlungen durchzuführen, so dass überprüft werden kann, ob

eine ggf. vorliegende Belastung der Hausstaubprobe auch in der Luftprobe festgestellt werden kann. Weiterhin sollte das Ergebnis einer Hausstaubprobe auf Plausibilität überprüft werden. So sind zum Beispiel hohe Belastungen im Hausstaub durch Pilze, deren Sporen nur schlecht flugfähig sind (z.B. Arten der Gattungen *Phoma*, *Fusarium*, *Acremonium*, *Trichoderma*, *Gliocladium* u.a.), sehr wahrscheinlich nicht durch Sedimentation sondern mit Schmutzpartikeln in die Probe gelangt oder sind auf dem untersuchten Bodenbelag gewachsen.

In der folgenden Tabelle sind unter „1. Beurteilungswert“ Hintergrundkonzentrationen für die < 63µm Hausstaubfraktion angegeben. Diese Konzentrationen stellen das 95% Perzentil einer Untersuchung von Hausstaubproben in unbelasteten Haushalten in verschiedenen Regionen Deutschlands dar. Der „2. Beurteilungswert“ liegt dreimal höher als der erste Beurteilungswert. Es wird angenommen, dass derartige Konzentrationen nur sehr selten in unbelasteten Hausstaubproben erreicht werden, sofern Störfaktoren ausgeschlossen sind. In der Tabelle wurden die Konzentrationen für Pilze, die typischerweise in der Außenluft in hohen Konzentrationen auftreten können, weggelassen, da für diese Pilze keine Hintergrundkonzentrationen angegeben werden können, die für alle Jahreszeiten gelten. In der Spalte „G“ wurde zusätzlich eine Gruppierung der Schimmelpilze nach möglichen Quellen angegeben.

**Bewertungshilfe für kultivierbare Pilze in Teppichbodenstaub (< 63 µm Fraktion) nach [4]**

Pilze	G	1. Beurteilungswert [KBE/g]	2. Beurteilungswert [KBE/g]
Acremonium spp.	1 <sup>▼</sup>	10.000	30.000
Eine Aspergillus Spezies außer Aspergillus versicolor, A. fumigatus und A. niger	2	10.000	30.000
Aspergillus fumigatus oder A. niger	2	20.000	60.000
Aspergillus versicolor	1	20.000	60.000
Summe Aspergillus	2	100.000	300.000
Chaetomium spp.	1	10.000	30.000
Engyodontium album	1	10.000	30.000
Summe Eurotium	1*	40.000	120.000
Eine Mucorales Spezies	2	10.000	30.000
Summe Mucorales	2	20.000	60.000
Eine Penicillium Spezies	2	30.000	90.000
Summe Penicillium	2	150.000	450.000
Phialophora spp.	1 <sup>▼</sup>	10.000	30.000
Scopulariopsis spp.	1	10.000	30.000
Stachybotrys chartarum	1	3.000	9.000
Trichoderma spp.	1	10.000	30.000
Wallemia sebi	1*	10.000	30.000
Eine andere Spezies	2	20.000	60.000
Gesamt-KBE ohne Alternaria, Aureobasidium, Cladosporium Hefen, sterile Myzelien	2	300.000	900.000

\* = kann auch bei Tierhaltung mit Heu und Stroh in erhöhter Konzentration im Staub auftreten

▼ = geringer Sporenflug, ggf. Eintrag durch kontaminierter Bodenpartikel

Beurteilungswert 1 = obere Grenze der Konzentration der meisten unbelasteten Staubproben

Beurteilungswert 2 = untere Grenze der Konzentration, ab der ein Staub als belastet eingestuft wird.

G = Gruppierung der Pilze nach häufigem Auftreten:

1 = Feuchteschaden

2 = Feuchteschaden und andere Innenraumquellen

3 = Außenluft

### 5.13 Literaturverzeichnis

[1] Umweltbundesamt (2002) Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen UBA

[2] Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg (2001) Abgestimmte Ergebnisprotokolle der Arbeitsgruppe „Analytische Qualitätssicherung im Bereich der Innenraumluftmessung biologischer Schadstoffe“ am Landesgesundheitsamt Baden Württemberg 14.12.2001, Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. Überarbeitet 2004

- [3] Trautmann, C. et al. (2004) Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in der Luft. Erhebung von Schimmelpilzkonzentrationen in Wohnungen ohne bekannte Schimmelschäden in 3 Regionen Deutschlands. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforsch. Bundesumweltblatt 47. S. 12-20.
- [4] Trautmann, C. et al. (2004) Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen im Hausstaub. Erhebung von Schimmelpilzkonzentrationen in Wohnungen ohne bekannte Schimmelschäden in 3 Regionen Deutschlands. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforsch. Bundesumweltblatt 47. S. 29-35.

## 6 Sanierung von Schimmelpilzbelastungen in Innenräumen

Thomas Gabrio

### 6.1 Allgemein

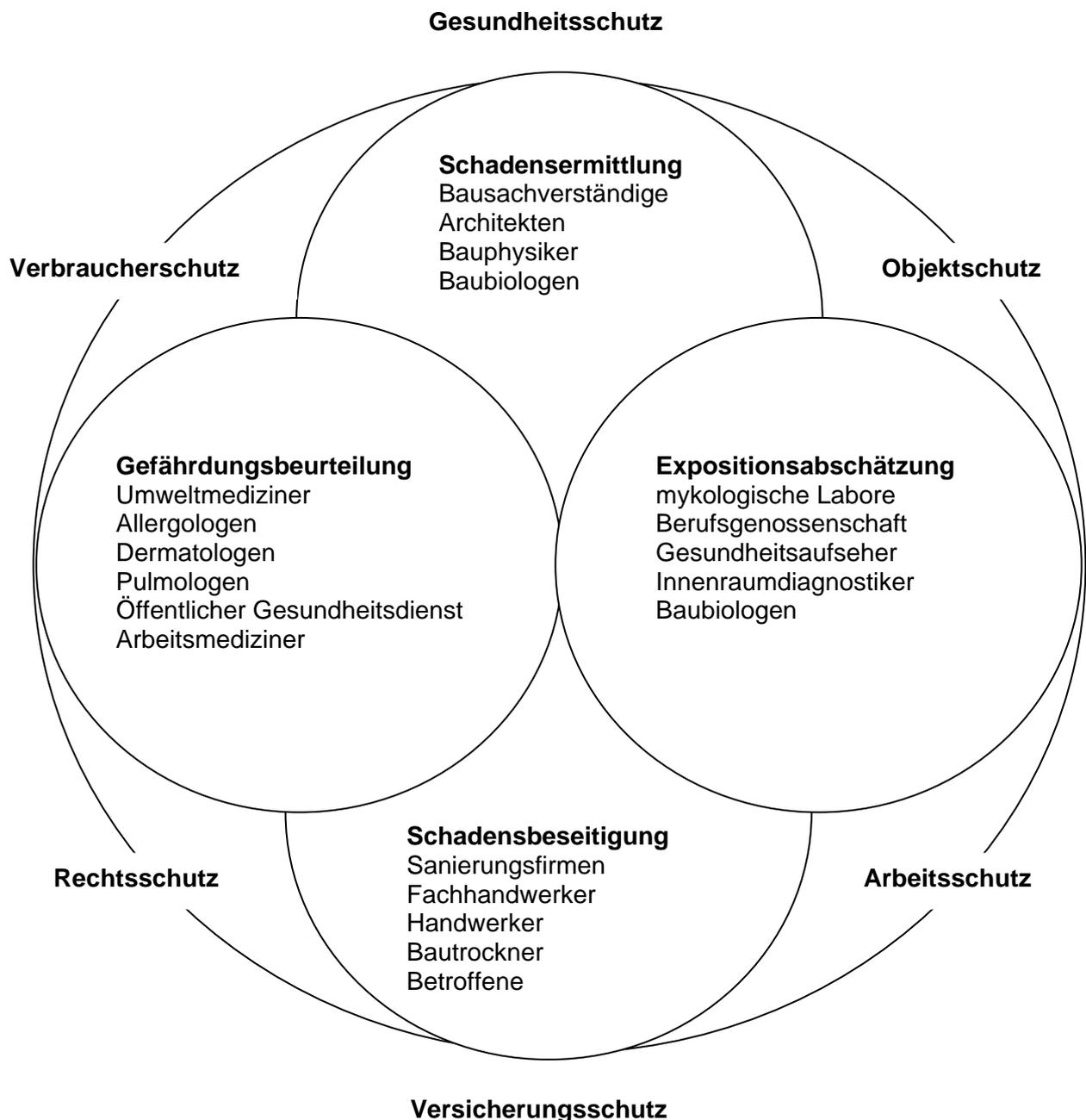
Die Ursachen für die Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen sowie die Möglichkeiten und Notwendigkeiten für ihre Durchführung können sehr unterschiedlich sein. Außerdem ist zu bedenken, dass eine Vielzahl von Berufsgruppen in eine Sanierung eingebunden sein können. Es ist also nicht möglich, für alle vorstellbaren Gegebenheiten konkrete Empfehlungen für die Art und Weise der Durchführung einer Sanierung zu geben. Trotzdem ist es aber möglich, folgende allgemeine Regeln für die Durchführung einer Sanierung aufzustellen:

- Ermittlung der Ursache und des Schadensumfangs des Schimmelpilzbefalls
- Gefährdungsbeurteilung und Festlegung der Schutzmaßnahmen bei der Sanierung
- Gegebenenfalls Übergangsmaßnahmen zur Überbrückung unvermeidbarer zeitlicher Verzögerungen
- Planung der Sanierung
- Praktische Durchführung der Sanierung
  - in der Regel Entfernung des mit Schimmelpilzen befallenen Materials
  - Beseitigung der Ursache des Befalls
  - im Bedarfsfall desinfizierende Reinigung der Bauteile, die vom Schimmelpilz befreit wurden
  - gegebenenfalls Trocknung feuchter Bausubstanz
  - Wiederaufbau
- Feinreinigung des Objektes
- Abnahme des Bauwerks

Je nach Ausmaß, Ursache und Art des Schimmelpilzschadens unterscheiden sich die Maßnahmen zu seiner Behebung sowie die Berufsgruppen und Gewerke, die die Sanierung durchführen bzw. an ihr beteiligt sein sollten. Häufig ist es notwendig, Sanierungen in interdisziplinärer Zusammenarbeit vorzunehmen. Dazu empfiehlt es sich regionale Netzwerke aufzubauen, um die Sanierungen sachgerecht durchführen zu können.

Die Verfahren die zur Ermittlung der Ursachen eines Schimmelpilzbefalls angewendet werden und deren Umfang hängen von der Art des Schadens und des Bauwerks ab. Neben der

in Augenscheinnahme gefährdeter Bauteile wie das Dach, abgehängte Decken, die Außenwände, die Dachrinnen, die Rolladen-Kästen, die Kanten und Ecken von Außenwänden, die Fensterlaibungen, die Decken von Garagen, die Balkonträger, eingebaute Möbel, die Innenwärmmedämmungen, die Abwasserleitungen, die Keller usw. kommt der Messung der Feuchte und Temperatur von Baumaterialien und der Innenraumluft eine besondere Bedeutung zu, wobei die Innenraummessungen als Langzeitmessungen durchgeführt werden sollten. Je nach Baukonstruktion sollte auch die Dichtigkeit der Bauhülle kontrolliert, bauphysikalische Berechnungen und mitunter unterstützend, auch mykologische Untersuchungen durchgeführt werden.



Im Zusammenhang mit der Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen sind folgende Gefährdungen zu beachten:

- mikrobiologische Gefährdungen
- chemische Gefährdungen
- Gefährdung der Statik der Bausubstanz

Mikrobiologische Gefährdungseinschätzung

Folgende unterschiedliche Gefährdungsbetrachtungen sind vorzunehmen:

Gefährdung	Haupteinschätzungskriterien
Einschätzung der hygienischen Situation eines mit Schimmelpilzen befallenen Innenraums	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufgrund der Komplexität der Schimmelpilzproblematik können Schimmelpilzbelastungen in Innenräumen nur im Sinne der Vorsorge beurteilt werden. Folglich sind aus hygienischer Sicht relevante Schimmelschäden in Innenräumen nicht zu akzeptieren. Die Größe der mit Schimmelpilzen befallenen Biomasse ist ein Beurteilungskriterium (Flächen &lt; 20 cm<sup>2</sup> = geringer Schaden, Flächen &gt; 0,5m<sup>2</sup> = relevanter Schaden). [1,2]</li> </ul>
Risikoeinschätzung für den Fall, dass eine Sanierung nicht gleich nach Auftreten bzw. nach Feststellung eines Schimmelpilzschadens behoben werden kann	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umfang und Art der voraussichtlichen Schimmelpilzfreisetzung</li> <li>• Gesundheitszustand der Nutzer</li> <li>• Art des Feuchteschadens</li> <li>• voraussichtliche Verzögerung der Sanierung</li> </ul>
Einschätzung der Gefährdung für diejenigen, die die Sanierung durchführen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• voraussichtliche Freisetzung von Schimmelpilzsporen während der Sanierung (Konzentration und Dauer) [3]</li> </ul>
Einschätzung der Gefährdung für die Nutzer, die sich während der Sanierung in dem sanierten Objekt bzw. in dessen Nähe aufhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• voraussichtliche Schimmelpilzbelastung in den Räumen in denen sich der Nutzer während der Sanierung aufhält (Konzentration und Dauer)</li> <li>• Gesundheitszustand des Nutzers</li> </ul>

Da bestimmte Schimmelpilze in der Umwelt weit verbreitet sind (z.B. *Cladosporium*-, *Alternaria*- sowie einzelne *Aspergillus*- und *Penicillium*-Arten), hat sich der Mensch an das Vorkommen dieser Schimmelpilze in seiner Umgebung angepasst und weist gegenüber vielen Schimmelpilzen eine hohe natürliche Resistenz auf. Er reagiert infolgedessen nur selten mit Krankheitssymptomen auf eine Schimmelpilzexposition. Entscheidend für die Wirkung von inhalativ aufgenommenen Schimmelpilzen auf den Menschen ist neben individuellen konstitutionellen Faktoren (Immunsystem) die spezifische Pathogenität einzelner Schimmelpilze, die Konzentration der auf den Menschen einwirkenden Schimmelpilze und die Häufigkeit ih-

res Auftretens, unabhängig davon, aus welcher Quelle sie kommen. Das verstärkte Auftreten von Schimmelpilzen im Innenraum ist ein Indikator für zu hohe Feuchtigkeit im Innenraum. Bei einer Schimmelpilzbelastung in der Wohnung oder am Arbeitsplatz ist die Zuordnung zu einer Quelle für die Planung von Abhilfemöglichkeiten notwendig.

In vielen Fällen liegt nicht nur eine Schimmelpilzbelastung vor, sondern eine allgemeine Belastung durch Mikroorganismen und Kleinstlebewesen. Dies liegt zum einen daran, dass die Voraussetzungen für ein Schimmelpilzwachstum, Feuchte und geeignete Nährstoffe, auch das Wachstum und die Vermehrung von anderen Mikroorganismen sowie Milben, Schimmelpilzkäfer etc. fördert. Deshalb müssen insbesondere bei Schäden mit mikrobiologisch belastetem Wasser (z. B. Abwasser, Oberflächenwasser bei Überschwemmungen) erweiterte Beurteilungskriterien herangezogen werden, da bereits das eingetragene Wasser ein hygienisches Problem darstellt und oft mit nicht vorhersehbaren Pathogenen belastet ist. Außerdem ist zu beachten das von Zellbestandteilen und Stoffwechselprodukten von Schimmelpilzen wie z.B.  $\beta$ -Glukane, Ergosterol, Allergene, Toxine bzw. Microbial Volatile Organic Compounds (MVOC) gesundheitliche Wirkungen ausgehen können. Bei einer Gesamtgefährdungsbetrachtung ist auch zu bedenken, dass Schimmelpilzsanierungen auch den Einsatz von Desinfektionsmitteln und anderen aggressiven Mitteln erforderlich machen können.

## 6.2 Gesundheitliche Gefährdung durch Schimmelpilze

Von Schimmelpilzen können u.a. folgende Wirkungen ausgehen:

### ■ allergene Wirkung:

Der Dosis-Wirkungszusammenhang ist in diesem Falle sehr komplex (siehe TRGS 907). Er hängt u. a. von der individuellen Prädisposition sowie vom allergenen Potential der Schimmelpilzsporen ab. Bei Sensibilisierungen richtet sich das Auftreten allergischer Reaktionen nach dem Grad der Sensibilisierung, der Membranfunktion von Haut und Schleimhäuten und der Allergendosis pro Fläche. Mittels der heutigen Nachweisverfahren wurden bei etwa 5 % der Bevölkerung in Deutschland eine Sensibilisierung gegen Schimmelpilze nachgewiesen.

### ■ toxische Wirkung:

Die Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen (z. B. den Mykotoxinen), sowie die Zellwandbestandteile (Glukane) wirken toxisch. Als immuntoxische Wirkung ist auch die Freisetzung

von Interleukinen und sonstigen Entzündungsmediatoren in Haut und Schleimhäuten bei Schimmelpilzeinwirkung zu sehen. Ausgelöst durch Innenraumbelastungen ist allerdings kaum mit einer solchen Wirkung zu rechnen.

■ infektiöse Wirkung:

Die infektiöse Wirkung spielt vor allem bei immungeschwächten Menschen eine Rolle. Ausgelöst durch Innenraumbelastungen ist allerdings kaum mit einer solchen Wirkung zu rechnen.

■ Geruchsbelästigung:

Sie kann die Lebensqualität beträchtlich beeinflussen. Gerüche können außer von Schimmelpilzen auch von Bakterien oder VOC-Emittenten verursacht werden. Dies sollte bei der Untersuchung bedacht werden.

Die Ausprägung der toxischen und allergenen Wirkungen u.a. durch Mykotoxine ist sehr stark von der Art der Schimmelpilze (Spezies) und von der aufgenommenen Gesamtmenge abhängig. Neben der Exposition, die im Innenraumbereich für gewöhnlich niedriger ist als in der allgemeinen Umwelt, kommt der Disposition des Betroffenen eine entscheidende Bedeutung bezüglich der Ausprägung einer gesundheitlichen Wirkung zu. Z.B. spielen bezüglich der allergenen Wirkung der Schimmelpilze folgende Aspekte eine entscheidende Rolle:

- liegt bei dem Betroffenen schon eine Sensibilisierung auf Schimmelpilze vor ?
- sprechen genetische Faktoren, der Gesundheitszustand, der Immunstatus, eine Vorschädigung der Haut bzw. der Schleimhaut mit dauernder oder vorübergehender Störung der Barrierefunktion dafür, dass bei dem Betroffenen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit zur Ausprägung einer Allergie vorliegt?
- liegt schon eine andere spezifische Allergie bei den betroffenen Personen vor?

Bei der Beurteilung der allergenen Wirkung ist zu bedenken, dass die Konzentration, die zur Ausprägung einer Erstsensibilisierung bzw. dem Auftreten von Symptomen bei vorliegender Sensibilisierung notwendig ist, sehr unterschiedlich sein kann.

Bezüglich der infektiösen Wirkung der Schimmelpilze kommt dem Immunstatus des Betroffenen eine besondere Bedeutung zu. Ist dessen Immunsystem z.B. durch eine Organtransplantation, eine Chemotherapie, AIDS oder eine andere, das Immunsystem schwächende Krankheit beeinträchtigt, geht von Schimmelpilzen mit einem hohen infektiösen Potential wie z.B. *Aspergillus fumigatus*, ein besonderes Risiko aus. Ebenso können vom Immunsystem schlecht erreichbare Räume wie Bronchiektasen, entzündete Nasennebenhöhlen o.ä. leichter durch Pilze der Risikogruppe 2 nach Biostoffv besiedelt werden (z. B. Aspergillome). Die Wahrscheinlichkeit einer Infektion durch bestimmte Pathogene ist auch von der Höhe der Keimbelastung abhängig.

Die verstärkte Präsenz von Schimmelpilzen stellt ein allgemein hygienisches Problem dar. Der Dosis-Wirkungs-Zusammenhang ist bei Schimmelpilzbelastungen äußerst komplex. Aufgrund der unterschiedlichen gesundheitlichen Gefährdung, die von Schimmelpilzen ausgeht, ist eine eindeutige zu verallgemeinernde Beurteilung von Schimmelpilzbelastungen in Innenräumen aus gesundheitlicher Sicht z.Z. nicht möglich.

Da zum einen unterschiedliche gesundheitliche Auswirkungen je nach Schimmelpilzspezies angenommen werden müssen, andererseits aber ein zwingender kausaler Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Schimmelpilzbefalls in einem Innenraum und einer in allen Fällen resultierenden Gesundheitsbeeinträchtigung nicht existiert, können lediglich für einzelne Schimmelpilzspezies nach folgenden Kriterien Aussagen gemacht werden:

- Hinsichtlich Allergien müssen Schimmelpilze mit ausgeprägter Sporenbildung als problematischer angesehen werden, wobei bedacht werden muss, dass Allergene auch an den Staub abgegeben und bei Zerfall der Schimmelpilze frei werden.
- In Hinblick auf Infektionen sollten alle Schimmelpilze, die in die Risikogruppe 2 und 3 nach TRBA 460 eingestuft sind, als problematisch angesehen werden. Die größte Bedeutung als wichtigstem Mykoseerreger kommt hier *Aspergillus fumigatus* zu.
- Bezüglich möglicher Mykotoxinwirkungen sollten Mykotoxinbildner als problematisch angesehen werden, insbesondere, wenn die Toxine cancerogen sind. Hierbei muss aber bedacht werden, dass die Mykotoxine nicht immer gebildet werden und zumindest unter Laborbedingungen hohe Keimzahlen erforderlich sind, um von einer Wirkung ausgehen zu können. Nur bei *Stachybotrys chartarum* können schon bei geringerer Sporenbelastung der Raumluft Toxinwirkungen auftreten.

Im Sinne der Vorsorge sollten durch *Stachybotrys chartarum* sowie für *Aspergillus fumigatus* und *Aspergillus flavus* bedingte Schimmelpilzschäden besonders kritisch betrachtet werden.

### 6.3 Weitere gesundheitliche Gefährdungen im Zusammenhang mit Schimmelpilzschäden

Wie oben schon ausgeführt, ist im Zusammenhang mit Feuchte- und Schimmelpilzschäden auch immer damit zu rechnen, dass eine Belastung mit anderen Mikroorganismen und Parasiten zu rechnen ist.

### 6.4 Abwasser/Oberflächenwasser

Wurde der Schimmelpilzschaden durch eine außergewöhnliche Ursache wie z.B. Hochwasser oder eine Leckage einer Abwasserleitung verursacht, müssen auch gesundheitliche Gefährdungen z.B. aufgrund der mikrobiologischen Belastung des Abwassers in Erwägung gezogen werden. Abwasser enthält 100 – 10 000 000 Kolonie bildende Einheiten Bakterien pro ml, zusätzlich Schimmelspilze, Viren, Wurmeier und Protozoen. Die TRBA 220 (Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe) geht von einer Exposition der Arbeitnehmer in abwassertechnischen Anlagen durch folgende im Abwasser vorkommende Mikroorganismen aus, die in der folgenden Auflistung noch durch weitere häufig im Abwasser vorkommende Mikroorganismen ergänzt wurden:

- **Bakterien:** wie *Enterobacteriaceae*: (z. B. *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Klebsiella* species, Salmonellen), *Campylobacter* species, *Leptospiraceae*, *Clostridium* species. (z. B. *Clostridium tetani*), *Enterococcus faecalis*, *Listeria* species,
- **Viren:** wie Enteroviren (Poliomyelitisviren, Coxsackieviren, ECHO-Viren), Adenoviren, Rotaviren, Norwalkviren, Hepatitis A-Viren
- **Pilze:** wie *Candida* species (*Candida albicans*, *tropicalis*); *Aspergillus fumigatus*
- **Protozoen:** wie *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*
- **Wurmeier:** z.B. von *Ascaris lumbricoides*

Bei fäkaler Verunreinigung kann auch Oberflächenwasser ähnliche Mikroorganismen enthalten. Die Exposition gegenüber fäkal kontaminiertem Wasser kann zu folgenden gesundheitlichen Problemen führen:

### ■ Infektionen

Abwasser verursacht nachweislich bei Aufnahme der Erreger über den Mund Durchfallerkrankungen, kann aber auch zu Gelbsucht, Sommergrippe bzw. durch Enteroviren verursachte Erkrankungen des zentralen Nervensystems, der Hirnhaut oder des Herzens führen. Gelegentlich kommen Infektionen durch Wurmeier, Protozoen oder Leptospiren vor. Viren können auch über Aerosole übertragen werden.

### ■ Toxische Wirkungen

Zerfallsprodukte von gramnegativen Bakterien (Endotoxine) können (besonders in hohen Konzentrationen) toxische Wirkungen verursachen, die sich am häufigsten als Entzündungsreaktion auf die Bindehäute, die Haut, seltener auf die Schleimhaut der Nase, der oberen Atemwege, seltener auf die tiefen Atemwege auswirken.

## **6.5 Beurteilung der Gefährdung der Bewohner/Nutzer durch die in Innenräumen vorliegenden Schimmelpilzbelastungen**

Da der Zusammenhang zwischen der durch einen Schimmelpilzschaden bedingten Exposition und den auftretenden gesundheitlichen Effekten sehr komplex ist, ist es nicht möglich toxikologisch begründete Grenzwerte für eine akzeptable Schimmelpilzbelastung abzuleiten. Aufgrund der allergenen, infektiösen und/oder toxischen Wirkung der Schimmelpilze ist allerdings generell aus Vorsorgegründen anzustreben, dass die Exposition im häuslichen Bereich durch zusätzliche Quellen nicht erhöht wird und im Rahmen der üblichen Hintergrundwerte bleibt. Dies ist besonders bei Personen wichtig, die z.B. aufgrund einer allergenen Vorschädigung bzw. einer Immunschwäche prädestiniert sind, bei einer bestehenden Schimmelpilzbelastung zu erkranken.

## **6.6 Gefährdungsbeurteilung anhand von mit Schimmelpilzen befallenem Material**

Beim jetzigen Stand des Wissens scheint die Größenabschätzung von mit Schimmelpilzen befallenem Material die praktikabelste Form der Bewertung von Innenraumquellen zu sein, wobei es für eine Beurteilung erforderlich ist zu unterscheiden, ob es sich um einen aktiven (feuchten) oder passiven (bereits länger trockenen) Schaden handelt. Allgemein liegt die Schimmelpilzkontamination an technisch hergestellten, fabrikneuen Materialien unter der

Nachweisgrenze bzw. im niedrigen Bereich. Dennoch ist der Nachweis geringer Pilzkonzentrationen an Materialoberflächen die von Luft umspült werden, nicht ungewöhnlich. In Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur, der Standzeit und der Luftqualität ist eine unterschiedlich starke Sporensedimentation zu erwarten. Derartige Hintergrundkonzentrationen können in der Regel an der Artenzusammensetzung sowie der unregelmäßigen und durchmischten Anordnung der Schimmelpilze auf dem Material erkannt werden. Recyclingprodukte und Naturprodukte haben allgemein höhere Hintergrundwerte und können in Einzelfällen stark mit Schimmelpilzen bewachsen sein.

Da geringfügige Schimmelpilzschäden, von denen in der Regel keine relevante gesundheitliche Belastung ausgeht, in vielen Objekten vorliegen und es sich nicht bei jedem Schaden, der über diesen geringfügigen Befall hinausgeht, um einen großen Schaden handelt, ist es sinnvoll, nach der im Umweltbereich angewandten Praxis zu verfahren und drei Kategorien zur Einstufung von Schimmelpilzschäden anhand von befallenem Material festzulegen:

**Kategorie 1:** Normalzustand bzw. geringfügiger Schaden

**Kategorie 2:** Geringer bis mittlerer Schaden. Die Freisetzung von Schimmelpilzbestandteilen sollte unmittelbar unterbunden und die Ursache mittelfristig ermittelt und saniert werden.

**Kategorie 3:** Großer Schaden. Die Freisetzung von Schimmelpilzbestandteilen sollte sofort unterbunden werden, die Ursache des Schadens ist unverzüglich zu ermitteln und zu beseitigen. Die Betroffenen sind auf geeignete Art und Weise über den Sachstand zu informieren, eine umweltmedizinische Betreuung sollte erfolgen. Nach abgeschlossener Sanierung hat eine Kontrolluntersuchung stattzufinden.

Die Ausdehnung eines Schimmelpilzschadens in der Fläche, aber auch in der Tiefe, ist ein Maß für die Größe der mit Schimmelpilzen befallenen Biomasse.

**Tab. 1:** Bewertung von Materialproben mit Schimmelpilzbewuchs

sichtbare und nicht sichtbare Materialschäden	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
Schadensausmaß	keine bzw. sehr geringe Biomasse (z. B. geringe Oberflächenschäden < 20 cm <sup>2</sup> )	mittlere Biomasse; oberflächliche Ausdehnung < 0,5 m <sup>2</sup> , tiefere Schichten sind nur lokal begrenzt betroffen	große Biomasse; große flächige Ausdehnung > 0,5 m <sup>2</sup> , auch tiefere Schichten können betroffen sein

Wichtige Anmerkungen zu sichtbarem Schimmel an Materialien!

Tiefenschäden: wenn bei einem Oberflächenschaden der Pilzbewuchs tief in das Material geht, muss der Schaden entsprechend dem Befallsumfang gegebenenfalls höheren Kategorien zugeordnet werden.

Es ist zwischen einem aktiven Befall und einem abgetrockneten Altschaden oder einer Sporenkontamination zu unterscheiden: Bei einem aktiven Befall sollte fallbezogen durch die Sachverständigen entschieden werden, ob die Kategorie erhöht wird, denn:

1. Die Mikroorganismenpopulation kann sich relativ schnell ändern, und es können unerwartete krankheitserregende Schimmelpilzarten auftreten.
2. Es können kontinuierlich und über längere Zeit hohe Mengen lebensfähiger Sporen abgegeben werden (im Gegensatz dazu nimmt bei einem Altschaden die Sporenkonzentration und deren Lebensfähigkeit mit der Zeit ab).
3. Ein aktiver Schimmelpilzbefall stellt häufig die Nährstoffgrundlage für andere Organismen wie z. B. Milben dar. Nach Austrocknung eines Schadens nimmt in der Regel die Anzahl dieser Organismen schnell ab.

Organismenzusammensetzung: Ein häufiges bis überwiegendes Auftreten von Schimmelpilzarten, denen eine besondere gesundheitliche Bedeutung zugeordnet wird (z.B. *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*, *Stachybotrys chartarum*), führt zu einer Verschiebung in eine höhere Kategorie.

## 6.7 Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzschadens anhand der Schimmelpilzkonzentration in der Innenraumluft

Die Untersuchung der Konzentration der Schimmelpilze bzw. deren Stoffwechselprodukte sowie Zellbestandteile in der Luft stellt nur eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Vorliegens einer zusätzlichen Innenraumquelle dar. Aufgrund der allgemeinen Belastung der Umwelt mit Schimmelpilzen kann die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens einer Schimmelpilzbelastung nicht nur an einem Kriterium festgemacht werden, sondern sollte durch die Überprüfung mehrerer Kriterien z.B. Luftkeimsammlung, Partikelauswertung erhärtet werden. Die Bewertung der Konzentrationen der verschiedenen Schimmelpilzarten, die mittels **Luftkeimsammlung** bestimmt wurden, wird durch folgende Vergleiche zwischen der Innenraumluft und der Außenluft vorgenommen. Die angegebenen Beurteilungswerte wurden aus den Da-

ten eines vom Umweltbundesamt geförderten Verbundprojekts „Erhebung von Hintergrundwerten für die Bewertung von Schimmelpilzen im Innenraum“ abgeleitet:

- Vergleich der Konzentration der stark von der Außenluft beeinflussten Schimmelpilzsporen (z.B. *Cladosporium* spp., *Alternaria* spp., Hefen) in der Innenraumluft mit der entsprechenden Konzentration in der Außenluft.
- Vergleich der Konzentration einer Schimmelpilzgattung in der Innenraumluft, die erfahrungsgemäß nicht aus der Außenluft stammt, mit der entsprechenden Konzentrationen in der Außenluft.
- Vergleich der Konzentration einer Schimmelpilzart in der Innenraumluft, die erfahrungsgemäß nicht aus der Außenluft stammt, mit der entsprechenden Konzentrationen in der Außenluft.

**Tab. 2:** Bewertungshilfe für Luftproben (Luftkeimsammlung)

	<b>Kategorie 1</b> Innenraumquelle unwahrscheinlich	<b>Kategorie 2</b> Innenraumquelle nicht auszuschließen	<b>Kategorie 3</b> Innenraumquelle wahrscheinlich
AL-Typ-Sommer	$RL \leq AL$	$RL \leq [AL \times 2]$	$RL > [AL \times 2]$
$\Sigma$ RL-Typ	$RL \leq [AL + 150]$	$RL \leq [AL + 500]$	$RL > [AL + 500]$
Einzelgattung	$RL \leq [AL + 100]$	$RL \leq [AL + 300]$	$RL > [AL + 300]$
Einzelart	$RL \leq [AL + 50]$	$RL \leq [AL + 100]$	$RL > [AL + 100]$
Einzelart GS	$RL \leq [AL + 30]$	$RL \leq [AL + 50]$	$RL > [AL + 50]$

**AL-Typ-Sommer** = Schimmelpilze, deren Konzentration in der Raumluft durch die Außenluft stark beeinflusst wird. Es wird die Raumluftkonzentration ins Verhältnis zur Außenluftkonzentration gesetzt. Beispiele sind *Cladosporium* spp. und Hefen im Sommer. Die Bewertung dieser Pilze kann bei ungewöhnlich geringen Außenluftkonzentrationen (z.B. bei starker Hitze oder UV-Strahlung) zu Fehlinterpretationen führen. Im Winter kann diese Bewertung nicht durchgeführt werden (siehe Einzelgattung).

**$\Sigma$  RL-Typ** = Summe der Schimmelpilze, die wenig von der Außenluft beeinflusst werden.

**Einzelgattung** = Die Raumluftkonzentration von Vertretern einer Schimmelpilzgattung, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird (z.B. *Penicillium* spp. oder *Aspergillus* spp; im Winter auch *Cladosporium* spp. oder Hefen)

**Einzelart** = Einzelne Schimmelpilzart, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird

**Einzelart GS** = Einzelne Pilzart mit geringer Sporenfreisetzungsrate (z.B. *Phialophora* sp, *Stachybotrys chartarum*), die von der Außenluft wenig beeinflusst wird

Auch die **Partikelbewertung** (kultivierbare und nicht kultivierbare Schimmelpilze) von Luftproben geht von einem Vergleich der Konzentrationen in der Innenraumluft zur Außenluft

aus. Da bei der Partikelbewertung eine Differenzierung bis zur Art nicht möglich ist, erfolgt hier ein Vergleich der Sporentypen wie folgt:

- Vergleich der Konzentrationen der Sporentypen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen z.B. Typ Ascosporen, Typ Alternaria/Ulocladium, Typ Basidiosporen sowie Cladosporium spp. zwischen der Innenraumluft und der Außenluft
- Überprüfung, ob die Konzentration des Sporentyps Penicillium/Aspergillus in der Innenraumluft erhöht ist.
- Überprüfung, ob eine Art charakteristischer Sporentypen mit guter Flugfähigkeit in der Innenraumluft erhöht ist.
- Überprüfung, ob eine Art charakteristischer Sporentyp mit schlechter Flugfähigkeit z.B. Chaetomium spp. Stachybotrys chartarum in der Innenraumluft erhöht ist.
- Überprüfung, ob die Summe diverser Schimmelpilzsporen, die nicht den typischen Außenluftsporen entsprechen und jeweils in geringen Konzentrationen auftreten, in der Innenraumluft erhöht ist.
- Überprüfung, ob die Anzahl von Myzelstücken in der Innenraumluft erhöht ist.

**Tab. 3:** Bewertungshilfe für kultivierbare Pilze in der Luft (Sporen/m<sup>3</sup>).

	<b>Kategorie 1</b> Innenraumquelle unwahrscheinlich	<b>Kategorie 2</b> Innenraumquelle nicht auszuschließen	<b>Kategorie 3</b> Innenraumquelle wahrscheinlich
AL-Typ-Sommer	$RL \leq AL$	$RL \leq [AL \times 2]$	$RL > [AL \times 2]$
$\sum$ RL-Typ	$RL \leq [AL + 150]$	$RL \leq [AL + 500]$	$RL > [AL + 500]$
Einzelgattung	$RL \leq [AL + 100]$	$RL \leq [AL + 300]$	$RL > [AL + 300]$
Einzelart	$RL \leq [AL + 50]$	$RL \leq [AL + 100]$	$RL > [AL + 100]$
Einzelart GS	$RL \leq [AL + 30]$	$RL \leq [AL + 50]$	$RL > [AL + 50]$

**AL-Typ-Sommer** = Pilze, deren Konzentration in der Raumluft durch die Außenluft stark beeinflusst wird. Es wird die Raumluftkonzentration ins Verhältnis zur Außenluftkonzentration gesetzt. Beispiele sind Cladosporium spp. und Hefen im Sommer. Die Bewertung dieser Pilze kann bei ungewöhnlich geringen Außenluftkonzentrationen (z.B. bei starker Hitze oder UV-Strahlung) zu Fehlinterpretationen führen. Im Winter kann diese Bewertung nicht durchgeführt werden (siehe Einzelgattung).

**$\sum$  RL-Typ** = Summe der Pilze, die wenig von der Außenluft beeinflusst werden. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 150 Sporen/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

**Einzelgattung** = Die Raumluftkonzentration von Vertretern einer Pilzgattung, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird (z.B. Penicillium spp. oder Aspergillus spp; im Winter auch Cladosporium spp. oder Hefen, sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 100 Sporen/m<sup>3</sup> nicht überschreiten).

**Einzelart** = Einzelne Pilzart, die wenig von der Außenluft beeinflusst wird. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 50 Sporen/m<sup>3</sup> nicht überschreiten

**Einzelart GS** = Einzelne Pilzart mit geringer Sporenfreisetzungsrate (z.B. Phialophora sp, Stachybotrys chartarum), die von der Außenluft wenig beeinflusst wird. Die Raumluftkonzentration sollte nach Abzug der Außenluftkonzentration 30 Sporen/m<sup>3</sup> nicht überschreiten

## 6.8 Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzschadens anhand der Schimmelpilzkonzentration im Hausstaub

Den verschiedenen Schimmelpilzen kommt bezüglich der Relevanz der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzschadens eine unterschiedliche Bedeutung zu. So sind Schimmelpilze wie z.B. *Cladosporium* spp. oder *Alternaria* spp., die im Sommer in gänzlich anderen Konzentrationen in der Außenluft und damit auch im Hausstaub vorkommen, für eine Beurteilung schlechter geeignet als Schimmelpilze wie z.B. *Aspergillus* spp., die im Sommer und im Winter in ähnlicher Konzentration auftreten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass auch Schimmelpilzarten wie z.B. *Penicillium* spp., die vor allem im Zusammenhang mit verschimmelten Lebensmitteln sowie anderen Innenraumquellen („Gelber Sack“, Abfälle usw.) auftreten können, eine andere Bedeutung zukommt als Arten, die vor allem im Zusammenhang mit feuchten Baumaterialien auftreten. Daher wurden die Schimmelpilze in die folgenden drei Gruppen aufgeteilt:

Gruppe 1 = Schimmelpilze, die insbesondere bei Feuchteschäden in erhöhten Konzentrationen festgestellt werden.

Gruppe 2 = Schimmelpilze, die sowohl bei Feuchteschäden als auch an verschimmelten Lebensmitteln festgestellt werden, bzw. aufgrund eines allgemeinen Hygieneproblems (Gelber Sack, Biomüll) in erhöhten Konzentrationen im Staub auftreten können.

Gruppe 3 = Schimmelpilze, deren Konzentration im Staub häufig durch einen Eintrag durch die Außenluft bestimmt wird.

Aufgrund der großen Spannweite, in der die verschiedenen Schimmelpilze selbst in unbelasteten Wohnungen auftreten, soll durch die Festlegung von zwei Beurteilungswerten ein Bereich fixiert werden, der den Übergang zwischen einer allgemeinen Hintergrundbelastung und einer Belastung durch Innenraumquellen markiert.

**Tab. 4:** Bewertungshilfe für kultivierbare Schimmelpilze in Teppichbodenstaub (< 63 µm Fraktion)

Pilze	G	1. Beurteilungswert [KBE/g]	2. Beurteilungswert [KBE/g]
eine <i>Aspergillus</i> Spezies außer <i>A. versicolor</i> , <i>A. fumigatus</i> und <i>A. niger</i>	2	10.000	30.000
<i>Aspergillus fumigatus</i> und <i>A. niger</i>	2	20.000	60.000
<i>Aspergillus versicolor</i>	1	20.000	60.000
Summe <i>Aspergillus</i>	2	100.000	300.000
Summe <i>Eurotium</i>	1*	40.000	120.000
Eine <i>Penicillium</i> Spezies	2	30.000	90.000
Summe <i>Penicillium</i>	2	150.000	450.000
Eine <i>Mucorales</i> Spezies	2	10.000	30.000
Summe <i>Mucorales</i>	2	20.000	60.000
<i>Acremonium</i> spp.	1▼	10.000	30.000
<i>Chaetomium</i> spp.	1	10.000	30.000
<i>Phialophora</i> spp.	1▼	10.000	30.000
<i>Scopulariopsis</i> spp.	1	10.000	30.000
<i>Stachybotrys chartarum</i>	1	3.000	9.000
<i>Engyodontium album</i>	1	10.000	30.000
<i>Trichoderma</i> spp.	1	10.000	30.000
<i>Wallemia sebi</i>	1*	10.000	30.000
Eine andere Spezies	2	20.000	60.000
Gesamt-KBE ohne <i>Alternaria</i> , <i>Aureobasidium</i> , <i>Cladosporium</i> Hefen, sterile Myzelien	2	300.000	900.000

\* = kann auch bei Tierhaltung mit Heu und Stroh in erhöhter Konzentration im Staub auftreten

▼ = geringer Sporenflug, ggf. Eintrag durch kontaminierte Bodenpartikel

Beurteilungswert 1 = obere Grenze der Konzentration der meisten unbelasteten Staubproben

Beurteilungswert 2 = Grenzkonzentration, ab der ein Staub als belastet eingestuft wird.

G = Gruppierung der Pilze nach häufigem Auftreten:

1 = Feuchteschaden

2 = Feuchteschaden und andere Innenraumquellen

3 = Außenluft

Neben der Untersuchung der Schimmelpilzsporen in der Luft und im Staub kann es auch hilfreich sein die Konzentration von Stoffwechselprodukten sowie Zellbestandteilen wie z.B. die der MVOC in der Luft bzw. des  $\beta$ -Glukans bzw. des Ergosterols im Staubs zu bestimmen. Hier ist allerdings zu bedenken, dass die entsprechenden Nachweisverfahren bisher nur unzureichend validiert sind oder ihre Aussagekraft bisher noch nicht ausreichend abgesichert ist.

## **6.9 Beurteilung der Dringlichkeit der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen**

Da die Beurteilung der Gefährdung der Bewohner/Nutzer durch die in Innenräumen vorliegenden Schimmelpilzbelastungen nur aus hygienischer Sicht erfolgt, lässt sich daraus nicht von vornherein die Dringlichkeit für die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen ableiten. Die Dringlichkeit der Sanierung und notwendige Schutzmaßnahmen bis zur Durchführung der Sanierung sind vom Gutachter zu beurteilen. Kriterien für diese Einschätzung sind u.a.:

- der Gesundheitszustand der Bewohner/Nutzer
- die Art und Weise der Raumnutzung
- das Ausmaß und die Aktivität des Schimmelpilzschadens
- die Art der im Befall vorliegenden Schimmelpilze, insbesondere im Zusammenhang mit der Disposition der Bewohner/Nutzer
- die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Schimmelpilzschaden kurzfristig vergrößert, diese Frage steht u.a. im Zusammenhang mit der Ursache des Befalls
- die Wahrscheinlichkeit, dass es im Ruhe- bzw. aktiven Nutzungszustand zu einem vermehrten Schimmelpilzflug kommt und sich dieser gegebenenfalls im gesamten Objekt verbreitet
- die Möglichkeiten den Sporenflug bis zur Sanierung auf einem niedrigen Niveau zu halten

Die Einschätzung der Dringlichkeit des Befalls setzt einen hohen Sachverstand des Gutachters voraus. In vielen Fällen wird eine sachgerechte Einschätzung der Dringlichkeit der Durchführung einer Sanierung nur interdisziplinär möglich sein, da eine abgesicherte Beurteilung sowohl u.a. einen medizinischen, hygienischen, mykologischen, bauphysikalischen, bau-, sanierungs- und Lüftungstechnischen Sachverstand voraussetzt.

## **6.10 Beurteilung der Gefährdung bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen - Gefährdungsbeurteilung für die Arbeitnehmer bei Sanierungsarbeiten**

Da Schimmelpilzbelastungen u.a. durch einen Wasserschaden mit mikrobiologisch belastetem Wasser (fäkalies Abwasser) bzw. durch Überschwemmungen oder Hochwasserkatastrophen verursacht sein können, wird neben der Gefährdungseinschätzung für Schimmelpilze auch eine für Bakterien und andere biologische Belastungen vorgenommen. Außerdem ist auch die Gefährdung durch Desinfektionsmittel zu beachten, die bei Sanierungen häufig genutzt werden.

Gemäß § 3 des Arbeitsschutzgesetzes vom 7.8.1996, zuletzt geändert am 21.6.2002, ergibt sich für den Arbeitgeber die Notwendigkeit, eine Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten bei der Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Objekten vorzunehmen. Die Gefährdungsbeurteilung sollte baustellenbezogen erfolgen.

## **6.11 Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe**

### Gefährdung durch Schimmelpilze

Schimmelpilzhaltige Stäube sind gemäß TRGS (Technische Regel für Gefahrstoffe) 907 "Verzeichnis sensibilisierender Stoffe" als allergen eingestuft. Deshalb muss die TRGS 540 „Sensibilisierende Stoffe“ oder auch die TRGS 524 „Sanierung und Arbeiten in kontaminierten Bereichen“ beachtet werden. Die Gefahr des Auftretens von Allergien oder toxischen Wirkungen ist gegeben. Sie ist von der Menge und der Art vorhandener Stäube abhängig. Infektionen sind äußerst selten. Die Biostoffverordnung (BioStoffV) vom 27. Januar 1999 regelt den Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen wie z. B. schimmelpilzhaltigem Material. In der Mehrzahl der Fälle sind die Tätigkeiten bei der Bausanierung nicht gezielte Tätigkeiten, bei denen Arbeitnehmer überwiegend gegenüber Mikroorganismen der Risikogruppe 1 (von 4) exponiert sind. Nur sehr wenige Erreger, z.B. *Aspergillus fumigatus*, werden der Schutzstufe 2 oder in anderen Fällen einer noch höheren Schutzstufe zugeordnet.

### Gefährdung durch Exposition gegen Abwasser oder Oberflächenwasser

Abwasser ist mit verschiedensten Mikroorganismen stark kontaminiert, ebenso kann fäkal verseuchtes Oberflächenwasser zahlreiche Mikroorganismen enthalten. Viele Mikroorganismen können bei Aufnahme über den Mund Infektionen verursachen. Einige Mikroorganismen können auch auf dem Luftweg über Aerosole, die teilweise über mehrere Stunden in der Luft verbleiben können, übertragen werden (z.B. Enteroviren). Deshalb ist bei erheblichem Abwasserkontakt meist von einer Schutzstufe 2 (von 4 Schutzstufen) nach Biostoffverordnung auszugehen.

### Einschätzung der voraussichtlichen Freisetzung von Schimmelpilzsporen während der Sanierung

Die Zahl der Untersuchungen über die tatsächliche Schimmelpilzsporenfreisetzung während einer Sanierung ist bisher relativ gering. Da die Ursachen für den eine Sanierung erforderlich machenden Feuchteschaden, wie auch die örtlichen Gegebenheiten und die angewandten

Sanierungstechniken sowie die Möglichkeiten des technischen Schutzes sehr unterschiedlich sein können, ist es nur möglich allgemeine Kriterien zur Abschätzung der Schimmelpilzbelastung während der Sanierung anzugeben. Es ist also erforderlich, dass der für die Sanierung Verantwortliche unter Beachtung der beabsichtigten Sanierungstechniken und aufgrund der konkreten Gegebenheiten vor Ort eine Gefährdungseinschätzung vornimmt. Hierzu muss er sowohl die Höhe der zu erwartenden Schimmelpilzsporenkonzentration als auch die benötigte Arbeitszeit abschätzen. Als Orientierungshilfe hierfür können folgende Kriterien dienen:

Größe und Tiefe des Schimmelpilzbefalls	Die Größe (Fläche aber auch Tiefe) der mit Schimmelpilzen befallenen Biomasse ist das Maß für die zur Sanierung benötigte Arbeitszeit und die zu erwartende Schimmelpilzkonzentration in der Luft
Art und Größenordnung der bei den Sanierungsarbeiten voraussichtlich zu erwartenden Staub- bzw. Aerosolentwicklung	Die Art des vorliegenden Schadens und das angewandte Sanierungsverfahren bestimmt entscheidend, ob Grob- oder Feinstaub bzw. Aerosole bei der Sanierung entstehen. Die zu erwartende Feinstaubkonzentration ist ein guter Indikator für die voraussichtlich bei der Sanierung vorliegende Schimmelpilzkonzentration. Durch die Auswahl einer geeigneten staubarmen Sanierungstechnik kann die Staub- bzw. Aerosolbelastung in beträchtlichem Maße reduziert werden. Wichtig ist vor allem, starke mechanische Verwirbelungen zu vermeiden.
Raumgröße	Die Konzentration gibt an, welche Masse bzw. wie viel Teilchen einer Substanz sich in einem bestimmten Volumen wie z.B. in einem m <sup>3</sup> befinden. Werden bei einer Sanierung z.B. 1 000 000 Schimmelpilzsporen freigesetzt, ergibt sich daraus bei einem Raumvolumen von 1 000 m <sup>3</sup> eine Zunahme der Schimmelpilzkonzentration von 1 000 Schimmelpilzsporen pro m <sup>3</sup> . Wird das Raumvolumen aufgrund einer Abschottung des Sanierungsbereichs auf 100 m <sup>3</sup> verkleinert nimmt die Sporenkonzentration in diesem Bereich um 10 000 Schimmelpilzsporen pro m <sup>3</sup> zu.
Durch Absaugung sowie durch Zuluft kann die Staub- bzw. Aerosolkonzentration reduziert werden	Durch Absaugung und durch Zuluft kann die Schimmelpilzkonzentration in dem belasteten Raum reduziert werden. Dabei ist es wichtig, dass die Absaugung möglichst quellnahe erfolgt.
Ausmaß der Kontamination mit mikrobiell kontaminiertem Wasser	Schimmelpilzbelastungen werden z.T. durch mikrobiell kontaminiertes Wasser ausgelöst. Für die Gefährdungseinschätzung ist es sehr wichtig zu wissen, womit das Wasser in welcher Konzentration belastet war und welche Menge wann in das Bauwerk eingedrungen ist. Wichtig ist auch zu wissen, in welchem Maße eine Vermehrung dieser Keime in dem entsprechenden Baumaterial wahrscheinlich ist (Temperatur und Art des Baumaterials).
Gesundheitliche Wirkung der vorhandenen Schimmelpilze	Bezüglich der gesundheitlichen Wirkung sind die meisten Schimmelpilze als ähnlich kritisch einzuschätzen. In der Literatur werden aber auch einige Schimmelpilze als besonders problematisch beurteilt: <i>Aspergillus fumigatus</i> aufgrund seiner infektiösen Wirkung <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> und <i>Stachybotrys chartarum</i> aufgrund ihrer toxischen und immuntoxischen Wirkung

**Tab. 5:** Gegenüberstellung von Arbeitstechniken bezüglich ihrer Staub- bzw. Aerosolfreisetzung

Sanierungsaufgabe	große Staub- bzw. Aerosolbelastung	geringe Staub- bzw. Aerosolbelastung
Reinigung	trocken Wischen bzw. Kehren	feucht Abwischen bzw. –saugen
Reinigung	Sandstrahlen	Sprüh-Extraktion
Tapeten entfernen	trocken Entfernen	befeuchtet bzw. vernetzt Entfernen
Abtragen von Material	nur mechanisch	mechanisch unter lokaler Absaugung
technische Trocknung	Druckverfahren	Saugverfahren mit Filtration und bzw. Luftableitung nach außen

**Tab. 6:** Anhaltspunkte für die Abstufung von persönlichen Schutzmaßnahmen sowie von Maßnahmen zur Vermeidung einer Verbreitung von Schimmelpilzen\*

Kriterium	Belastungsstufe				empfohlene Schutzmaßnahme
	0	1	2	3	
Staubfreies Entfernen von kleinen Flächen Schimmelpilz-befallener Materialien, schwache Sporenbelastung unabhängig von der Einwirkdauer, sensibilisierende Wirkung nicht zu befürchten	X				Handschuhe***
kurzzeitige Arbeiten (< 2 h) bei mittlerer Sporenbelastung z. B. vornehmliche Entwicklung von Grobstaub		X			Ggf. Schwarz/Weiß-Trennung Einwegschutzanzug Kat. III, Typ 5**, Handschuhe***, Schutzbrille, Atemschutz mit P2-Filter****
längerfristige Arbeiten (> 2 h) bei mittlerer Sporenbelastung			X		Schwarz/Weiß-Trennung Einwegschutzanzug Kat. III, Typ 5**, Handschuhe***, Atemschutzmaske der Schutzstufe TM2P; empfohlen werden gebläseunterstützte Atemschutzhauben mit Partikelfilter (TH2P)****
Hohe Sporenbelastung, unabhängig von der Arbeitsdauer z. B. starke Entwicklung von Feinstaub bzw. Aerosolen, keine wirksame lokale Absaugung				X	Schwarz/Weiß-Trennung Schleuse, ggf. mit Be- und Entlüftung Einwegschutzanzug Kat. III, Typ 5**, Handschuhe***, Atemschutzmaske der Klasse ; TM3P****

\*: Für weitere Informationen siehe auch: „Sanierung von schimmelpilzbelasteten Räumen“, Handlungsinformation der Bau-Berufsgenossenschaften 11/2004 ([www.bg23.de](http://www.bg23.de) > Infos/Service > Broschüren)

\*\* : Bei massivem Abwasserkontakt wasserdichte Schutz- bzw. Einwegschutzkleidung, die gegenüber Mikroorganismen undurchlässig ist.

\*\*\*: Hinweise zur Auswahl geeigneter Handschuhe gibt die BGR 195, "Regeln für den Einsatz von Schutzhandschuhen".

\*\*\*\*: Die Filter der Atemschutzmasken sind mindestens arbeitstäglich zu wechseln und zu entsorgen.

## **6.12 Gefährdung durch eingesetzte Chemikalien**

Prinzipiell wird von der Anwendung von Gefahrstoffen z.B. als Desinfektionsmitteln oder Reinigungsmittel (Chlorbleichlauge, Wasserstoffsuperoxid, Ethanol, Isopropanol usw.) abgeraten. Ist ein Einsatz unvermeidlich, muss sich der Anwender vor Arbeitsaufnahme über die Gefahren, die von diesen Mitteln ausgehen, informieren und entsprechende Sicherheitsdatenblätter einsehen (beim Hersteller anfordern, bzw. in der GISBAU-Datenbank einsehen), die Anwendungsvorschriften des Herstellers einhalten und eine entsprechende Betriebsanweisung erstellen.

## **6.13 Arbeitsschutz und Schutzmaßnahmen bei der Durchführung der Sanierungen von mit Schimmelpilzen belasteten Innenräumen**

Bei der Durchführung der Sanierungen von mit Schimmelpilzen belasteten Innenräumen ist stets zu beachten, dass sowohl mikrobiologische als auch chemische Belastungen vorliegen können. Zum Schutz gegen diese Belastungen sind

- technische und bauliche Maßnahmen
- organisatorische Maßnahmen
- die persönliche Schutzausrüstung
- und arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen

zu beachten

## **6.14 Arbeitsschutzmaßnahmen bezüglich der Belastung mit mikrobiologischen Schadstoffen**

Die Arbeitsschutzmaßnahmen bezüglich der Belastung mit mikrobiologischen Schadstoffen orientiert sich an der TRBA 500 vom März 1999, „Hygienemaßnahmen - Mindestforderungen“ und der TRGS 540 "Sensibilisierende Stoffe". Folgende Maßnahmen sollten u.a. beachtet werden:

### **■ Technische und bauliche Maßnahmen**

- Staubabsaugung bei Tätigkeiten mit erhöhter Staubentwicklung
- Minimierung der Staubentwicklung durch Befeuchten<sup>1</sup> oder durch Bindemittel z.B. zum Ablösen von Tapeten
- Abdecken bzw. Abkleben schimmelpilzbefallener Materialien
- Anwendung staubarmer Arbeitstechniken

---

<sup>1</sup> Diese Maßnahme empfiehlt sich nur, wenn nur kurze Zeit gearbeitet wird, da es bei Langzeitbefeuchtung eher zu Schimmelpilzvermehrung kommt

- evtl. technische Belüftung bei Arbeit mit Chemikalien oder mit hoher Staubbelastung, um den MAK-Wert einzuhalten bzw. die Staubexposition zu minimieren.

### ■ Organisatorische Maßnahmen

- Häufige nicht staubende Reinigung
- Verpflichtung zum Händewaschen vor Pausen und nach Beendigung der Tätigkeit
- Bei Exposition gegen Abwasser Händedesinfektion mit gegen Viren wirksamem Mittel
- Schaffung der Möglichkeit zur Aufnahme von Speisen und Getränken in einem gesonderten Raum
- Einnahme der Mahlzeiten nicht in verschmutzter Arbeitskleidung
- Schaffung der Möglichkeit, Lebensmittel und Getränke außerhalb des kontaminierten Bereiches aufzubewahren
- Schaffung der Möglichkeit zur getrennten Aufbewahrung von Schutzkleidung und persönlicher Schutzausrüstung von der Straßenkleidung
- Um eine Kontamination von unbelasteten Bereichen zu vermeiden, muss bei Arbeiten gegebenenfalls ab der Belastungsstufe 1 siehe Tab. 6 der Sanierungsbereich von den übrigen Gebäudeteilen abgeschottet werden. Je nach Sanierungsumfang können dafür unterschiedliche Maßnahmen erforderlich sein. Bei einer technischen Be- und Entlüftung des Schwarzbereiches ist sicherzustellen, dass durch die Ablufführung keine Gefährdung Dritter entsteht. Dies kann z.B. durch den Einsatz von Abluffiltern gewährleistet werden.
- regelmäßige Reinigung, ggf. Desinfektion der Schutzkleidung und der persönlichen Schutzausrüstung durch den Arbeitgeber, mindestens arbeitstäglicher Filterwechsel von Atemschutz usw.
- Sammeln und Entsorgen der mit Schimmelpilzen befallenen Materialien in geeigneten verschließbaren Behältnissen
- Erstellung von Betriebsanweisungen
- Unterweisung der Arbeitnehmer

### ■ Persönliche Schutzausrüstung

- Schutzkleidung z.B. Einwegschutzanzug mit Kapuze Kat. III, Typ 5 + 6, bei massivem Abwasserkontakt wasserdichte Schutzkleidung bzw. Einwegschutzkleidung, die gegen Mikroorganismen dicht ist
- Der Handschutz muss abgestimmt auf die mechanischen, chemischen und biologischen Belastungen ausgewählt werden. Bei Feuchtarbeiten sind flüssigkeitsdichte Handschuhe einzusetzen. Ansonsten sind die Schutzhandschuhe nach der mechanischen Belastung und eventuell vorhandenen Gefahrstoffen auszurichten. Handschuhe aus Leder/Textil-Kombinationen sowie medizinische Einmalhandschuhe sind ungeeignet. Im Allgemeinen empfiehlt es sich Handschuhe aus Nitril- bzw. Butylkautschuk zu verwenden. Hinweise zur Auswahl geeigneter Handschuhe gibt die BGR 195, "Regeln für den Einsatz von Schutzhandschuhen".
- Es ist ein der Baustelle entsprechendes Sicherheitsschuhwerk einzusetzen. Dieses muss zusätzlich abwaschbar sein. (Siehe auch BGR 191, "Regeln für die Benutzung von Fuß- und Beinschutz").
- Ist Augenschutz erforderlich, etwa bei der Gefahr von Spritzwasserbildung, Arbeiten über Kopf mit Staubentwicklung etc., so ist mindestens eine Korbbrille zu verwenden. Der Augenschutz kann auch durch das Tragen einer Vollmaske gewährleistet sein.
- Bei Tätigkeiten der Belastungsstufe 1 siehe Tab. 6 sind Masken mit P2-Filter einzusetzen. Grundsätzlich werden gebläseunterstützte Halbmasken mit Partikelfilter TM3P und insbesondere für Tätigkeiten der Belastungsstufe 3, Atemschutzhauben der Schutzstufe THP3 empfohlen. Die Filter der Atemschutzmasken sind mindestens arbeitstäglich zu

wechseln. Die Auswahl und der Einsatz geeigneter Atemschutzgeräte sind in den „Regeln für den Einsatz von Atemschutzgeräten“ (BGR 190) aufgeführt.

- Hautschutz-, Hautreinigungs- und Hautpflegemittel
- bei Kontakt mit Abwasser oder Oberflächenwasser geeignetes Händedesinfektionsmittel

#### ■ **Arbeitsmedizinische Vorsorge**

- Angebot von Vorsorgeuntersuchungen nach Biostoffverordnung bei Vorkommen von Schimmelpilzen der Risikogruppe 2 bzw. Exposition gegen Abwasser oder Oberflächenwasser
- G 26 (Atemschutz)

### **6.15 Arbeitsschutzmaßnahmen bezüglich der Belastung mit chemischen Schadstoffen**

Obwohl prinzipiell von der Anwendung von chemischen Schadstoffen bei der Schimmelpilzsanierung abgeraten wird, kann in Einzelfällen auf ihre Anwendung nicht verzichtet werden. Die z.B. zur Kurzzeitdesinfektion bzw. zur Langzeitabtötung von Schimmelpilzen (Fungiziden) genutzten Chemikalien können eine ätzende, reizende, brennbare, explosive oder toxische Wirkung besitzen, wobei einzelne Schadstoffe gleichzeitig mehrere Wirkungen haben können. Chlorbleichlauge besitzt z.B. aufgrund seiner Alkalität eine ätzende Wirkung, da Chlorbleichlauge aber auch freies Chlor abgibt, geht von ihr auch eine reizende und eine toxische Wirkung aus. Entsprechend der Wirkung, die von den zur Schimmelsanierung genutzten Chemikalien ausgeht, sind die notwendigen Maßnahmen bezüglich des Arbeits- und Nutzerschutzes einzuhalten. Die von den entsprechenden Chemikalien ausgehenden reizenden und toxischen Wirkungen, können sowohl auf dem inhalativen, dem oralen als auch dem perkutanen Pfad erfolgen. Entsprechend sind die notwendigen Schutzmaßnahmen einzuplanen. Bei Chemikalien, die über den inhalativen Pfad wirken bzw. brennbar oder explosiv sind, ist im besonderen darauf zu achten, dass die Konzentration dieser Stoffe in der Innenraumluft möglichst gering ist, dies kann durch gezielte technische Lüftung möglichst an der Quelle erreicht werden. Zusätzlich kann es gegebenenfalls bei Überschreitung der MAK-Werte bzw. TAK-Werte (bei krebserzeugenden Stoffen) erforderlich sein, dass sich die Betroffenen durch ein Atemschutzfiltergerät schützen, wobei darauf zu achten ist, dass der Filter der Maske so ausgewählt wird, dass sie Schutz vor dem entsprechenden Schadstoff gewährt. So ist z.B. beim Arbeiten mit Chlorbleichlauge ein Atemschutzfiltergerät mit einem Gasfilter B2 (Kennfarbe: Grau) zu verwenden, da nicht auszuschließen ist, dass Chlor an die umgebende Luft abgegeben wird. Zum Schutz vor ätzenden und reizenden Stoffen sind geeignete Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille zu tragen. Je nach Art der Anwendung sind auch geeignete Stiefel, Arbeitsanzüge, Schürzen usw. aus Gummi oder Kunststoffen zu tra-

gen. Bei giftigen Stoffen ist vor allem die orale und inhalative Aufnahme, aber auch der direkte Hautkontakt zu vermeiden. Wichtig ist diesbezüglich die allgemeine Körperhygiene wie z.B. dass die Betroffenen sich Vorort mit fließendem Wasser waschen und ihre Arbeitsschutzkleidung reinigen können.

Vor Beginn der Tätigkeit muss der Arbeitgeber die Sicherheitsdatenblätter der Chemikalien anfordern, die verwendet werden sollen. Eine Gefährdungsbeurteilung und eine Betriebsanweisung muss schriftlich erstellt werden. Der anzuwendende Arbeitsschutz muss so gewählt werden, dass die persönliche Schutzausrüstung den Gefahrstoff zurückhält. Mindestens jährlich müssen die Arbeitnehmer über Gefahren und Schutzmaßnahmen unterwiesen werden. Die Unterweisung ist schriftlich zu bestätigen. Ebenso muss bei Sanierungsbaustellen die Gefährdungsbeurteilung baustellenbezogen in Kooperation mit anderen Firmen vorgenommen werden und der Arbeitsschutz durch den Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator entsprechend überwacht werden, sofern dies durch die Baustellenverordnung bzw. das Arbeitsschutzgesetz gefordert wird.

### **6.16 Gefährdungseinschätzung für die/den Gebäudenutzer im Rahmen der Sanierung**

Bei der Durchführung der Sanierung von Schimmelpilzschäden ist neben der Gefährdung des Sanierers auch die der Gebäudenutzer zu beachten, wobei nicht nur die Gefährdungen durch mikrobiologische Belastungen wie durch Schimmelpilze und möglicherweise auch durch Bakterien zu bedenken sind, sondern auch durch die bei Sanierungen verwendeten Desinfektionsmittel und gegebenenfalls anderen Chemikalien. Folgende Aspekte sind u.a. bei der Einschätzung der Gefährdung der Gebäudenutzer zu beachten:

- Der Gesundheitszustand der Nutzer, besonders gefährdet sind z.B. Asthmatiker und Menschen mit einem geschwächten Immunsystem z.B. aufgrund einer Chemotherapie oder einer Organtransplantation, aber auch Bewohner von Altenheimen
- Die Gefahr der Verbreitung von mikrobiologischen und gegebenenfalls chemischen Schadstoffen im Gesamtobjekt z.B. durch offene Treppenaufgänge zwischen mehreren Etagen (Kaminwirkung), durch Raumluftechnische Anlagen oder durch Flure, Aufzugschächte usw.
- Die Möglichkeiten der Reinigung der im Objekt verbleibenden Gegenstände

Daher sollten sowohl im Sinne des Schutzes der Gebäudenutzer als auch des Arbeitsschutzes bei Sanierungen von Schimmelpilz belasteten Innenräumen folgende allgemeine Schutzmaßnahmen beachtet werden:

- Anwendung von Arbeitstechniken, bei denen die Freisetzung von Staub bzw. Aerosolen und damit auch von Schimmelpilzsporen und gegebenenfalls von anderen Mikroorganismen möglichst gering ist
- Vermeidung der Ausbreitung von Schimmelpilzsporen und gegebenenfalls von anderen Mikroorganismen (Verschleppung)
- Vermeidung der Belastung mit Schimmelpilzsporen und gegebenenfalls mit anderen Mikroorganismen von Menschen, die nicht direkt die Sanierung durchführen
- Vermeidung der Übertragung von Schimmelpilzsporen und gegebenenfalls von anderen Mikroorganismen auf Lebensmittel und schwer zu reinigenden Gegenständen
- Vermeidung der Anwendung von chemischen Schadstoffen wie Fungizide oder Desinfektionsmittel

Je nach Schwere des Schimmelpilzbefalls sind zusätzlich zu den aus Sicht des Arbeitsschutzes durchgeführten technischen und baulichen sowie organisatorischen Schritten zur Minimierung der Freisetzung von Schimmelpilzsporen folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Festlegung und Abgrenzung des Sanierungsbereiches
- Entfernung von Lebensmitteln
- Entfernung bzw. Abdecken schwer von Schimmelpilzsporen zu reinigenden Gegenständen (z.B. Teppiche und andere Raumtextilien)
- Staub- und luftdichte Abschottung besonders belasteter Bereiche gegebenenfalls mit Schleuse und Entlüftung

## **6.17 Sanierung und Beseitigung der schimmelbefallenen Teile**

### Vorbereitung der Arbeiten

Vor dem Beginn einer Sanierung von schimmelpilzbelasteten Innenräumen ist ein detailliertes Sanierungskonzept zu erarbeiten. Dies setzt bei größeren Schäden meist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit voraus. Da die Schadensursache, der Schadensumfang, die Möglichkeiten zur Schadensbehebung, die Bauausführung, die Art der Nutzung, die zu erwartende Gefährdung für Sanierer und Gebäudenutzer usw. von Fall zu Fall sehr unterschiedlich ist, ist es nicht möglich, ein allgemeines Sanierungskonzept vorzustellen. Es gibt bisher so gut wie keine validierten „Schimmelpilzsanierungsverfahren“ bei denen durch eine In-Prozess-Kontrolle abgesicherte wurde, welche Sanierungstechniken unter welchen Randbedingungen (Schadensursache, Schadensumfang usw.) zu welchen Sanierungserfolgen führten. In Tabelle 7 sind die Teilaspekte zusammengestellt die bei der Erarbeitung eines Sanierungskonzept zu beachten sind. In der Tabelle sind auch die Fachdisziplinen genannt, die über die entsprechende Kompetenz verfügen, um sich konstruktiv bei der Erarbeitung des Sanierungskonzeptes einbringen zu können.

**Tab. 7:** Teilaspekte, die bei der Erstellung eines Sanierungskonzepts zu beachten sind

<b>Teilaspekt</b>	<b>zu beteiligende Fachdisziplin</b>
Abklärung ob ein Schimmelpilzschaden vorliegt	umweltmykologische Labore Innenraumdiagnostiker Baubiologen Öffentlicher Gesundheitsdienst (Gesundheitsämter)
Ermittlung der Schadensursache	Bausachverständige Bauphysiker
Ermittlung des Schadensumfangs	Bausachverständige Bauphysiker umweltmykologische Labore Innenraumdiagnostiker Baubiologen
Beurteilung für die bei der Sanierung Beschäftigten und für die Gebäudenutzer	Arbeitsmediziner Öffentlicher Gesundheitsdienst Umweltmediziner Gewerbeaufsicht Berufsgenossenschaften
Erstellung eines Konzepts zur Beseitigung der Schadensursache	Architekten Bausachverständige Bauphysiker
Erstellung eines Konzepts durch das abgesichert wird, dass von der vorliegenden Schimmelpilzquelle keine relevante Innenraumbelastung ausgeht (in der Regel Entfernung schimmelpilzbelasteten Materials)	Architekten spezielle Sanierungsfirmen Fachhandwerker
Erstellung eines Konzepts für den Wiederaufbau nach der Entfernung schimmelpilzbelasteter Baumaterialien	Architekten spezielle Sanierungsfirmen Fachhandwerker
Beseitigung der Schadensursache	spezielle Sanierungsfirmen Fachhandwerker
Entfernung schimmelpilzbelasteten Materials	spezielle Sanierungsfirmen Fachhandwerker
gegebenenfalls Bautrocknung (Erstellung eines Konzepts und praktische Durchführung)	Bautrocknungsfirmen
Erstellung eines Konzepts zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der Sanierung	umweltmykologische Labore Innenraumdiagnostiker Baubiologen Öffentlicher Gesundheitsdienst Bausachverständige Bauphysiker
Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der Sanierung	umweltmykologische Labore Baubiologen Öffentlicher Gesundheitsdienst Bausachverständige, Bauphysiker

Aus der obigen Aufstellung wird deutlich, wie wichtig eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Fachrichtungen bei der Durchführung von Schimmelpilzsanierungen ist. In welchem Umfang und in welcher Art diese Zusammenarbeit bei Sanierungsmaßnahmen notwendig ist, ist vom konkreten Einzelfall (Ursache, Art und Umfang des Schimmelpilzschadens) abhängig. Es ist daher sinnvoll, wenn sich die unterschiedlichen Fachleute in der Region um entsprechende Ansprechpartner bemühen und untereinander ein Verhältnis der vertrauensvollen Zusammenarbeit aufbauen. Aufgrund der Komplexität der Schimmelpilzproblematik kommt der Fortbildung in diesem Bereich eine besondere Bedeutung zu, wobei es auch wichtig ist, Kompetenz und Sachverstand plausibel belegen zu können.

Da sich Schimmelpilze bei vorliegender Feuchtigkeit und bei Temperaturen von ca. 0 bis 30 °C sowie durch die in den meisten Baumaterialien enthaltenen Nährstoffe rasch vermehren, sollte möglichst Zeit nahe mit der Sanierung begonnen werden. Bei einem aktuellen massiven Wasserschaden sollte möglichst sofort mit der Schadensbehebung und der Trocknung begonnen werden. Kann aus versicherungstechnischen oder sonstigen technischen und rechtlichen Gründen oder wegen noch durchzuführenden Maßnahmen zur Schadensermittlung und zur Erstellung eines Sanierungskonzeptes nicht sofort nach bekannt werden des Schadens mit der Trocknung und Sanierung begonnen werden, ist abzusichern, dass es nicht zu einer Gefährdung der Raumnutzer oder zu einer Ausbreitung der Schimmelpilze kommt. Dies können je nach Art und Schwere des Schadens u.a. folgende Maßnahmen sein:

- Ablüften der Feuchte nach außen, wobei darauf zu achten ist, dass das übrige Objekt durch das Lüften nicht mit Schimmelpilzsporen belastet wird
- möglichst vollständiges Ausräumen betroffener Räume. Bei einem überfluteten Keller ist es z.B. sinnvoll, vor der Durchführung der Sanierung zuerst sämtliches, nicht fest eingebautes Material, das verschimmeln könnte, aus den entsprechenden Räumen zu entfernen. Dies gilt insbesondere für Gegenstände aus Holz, Papier, Textilien wie Polstermöbel, Teppiche, Tapeten etc.
- Nutzungseinschränkung bzw. –verbot stark mit Schimmelpilzen befallener Räume
- staub- und luftdichtes Einhausen stark befallener Bereiche. Ist dies nicht möglich, sind befallene Flächen mit Folie staub- und luftdicht abzudecken.

Bei sämtlichen Abbruch-, Reinigungs- und Transportmaßnahmen ist darauf zu achten, dass Aufwirbelung von Schimmelpilzsporen und sonstigen Schimmelpilzbestandteilen vermieden

werden. In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass auch von abgetöteten Schimmelpilzsporen allergische und reizende Wirkungen ausgehen können.

### Beseitigung der Ursache des Befalls

Die Beseitigung der Ursachen des Schimmelpilzbefalls sollte stets am Anfang einer Sanierung stehen. Dazu müssen die Ursachen für die Feuchtigkeit an dem betroffenen Bauteil erkannt und behoben werden. Dies gilt für Baumängel bzw. –schäden, für Schäden durch Wasser aus dem Erdreich, der Wasserinstallation bzw. dem Abwassernetz sowie durch Regen und Hochwasser usw.

Häufig liegt nicht nur ein Grund für das Auftreten eines Schimmelpilzschadens vor, sondern eine Kombination mehrerer Ursachen, wie z.B. bauseitige Schwachstellen und falsches Nutzungsverhalten. Besonders problematisch können in diesem Zusammenhang auch beengte Wohnverhältnisse sein. Je höher die Belegungsdichte einer Wohnung ist, desto schwieriger wird es, die produzierte Luftfeuchtigkeit abzulüften.

Die Suche nach dem für den Schaden Verantwortlichen kostet sehr viel Zeit, Energie und Geld bis dann schließlich mit der Sanierung begonnen werden kann. In der Zwischenzeit kann es aber zu einer deutlichen Schadensvergrößerung kommen. In diesen Fällen ist es wichtig, dass der entsprechende Sachverständige den Konfliktparteien bei der Suche nach einem sinnvollen Kompromiss hilft.

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Schadensursachen, des unterschiedlichen Schadenumfangs und der unterschiedlichen Gefährdungsmöglichkeiten ist es nicht möglich, für alle denkbaren Fälle Sanierungsempfehlungen zu geben. Dies ist nur für einige relevante Fälle möglich.

### Hohe Raumlufffeuchtigkeit

Zeitweise oder andauernd erhöhte Raumlufffeuchtigkeit ist oft die Ursache für einen Schimmelpilzbefall. Bei gefährdeten Räumen sollte die relative Luftfeuchte mit einem Hygrometer kontrolliert werden. Während der Heizperiode sollte die Raumlufffeuchtigkeit in Abhängigkeit vom Dämmstandard im Altbau 50% und im Neubau 60% nicht überschreiten. Kommt es für längere Zeit zu einer Überschreitung, sind Maßnahmen zur Absenkung der erhöhten Raumlufffeuchtigkeit zu ergreifen.

Die Ursachen für eine erhöhte Feuchtigkeit in der Innenraumluft können nutzungs- oder baulich bedingt sein. Nutzungsbedingte Ursachen sind z.B.

- Unzureichende Lüftung
- Unzureichendes Heizen
- Mangelnde Luftzirkulation hinter Einrichtungsgegenständen
- Trocknen von Wäsche in der Wohnung
- erhöhter Bestand von Pflanzen in der Wohnung
- Raumluftbefeuchter
- Nichtentfernen von anhaftendem Wasser an der Duschwand gleich nach dem Duschen usw.

Aufgrund der Nutzung durch den Menschen, entsteht in Innenräumen immer zusätzliche Feuchtigkeit. Um zu verhindern, dass es im Innenraum zu einer überhöhten Oberflächenfeuchtigkeit kommt, muss diese über den Tag ausreichend abgelüftet werden. In welchem Umfang ein Luftaustausch notwendig ist, ist von der Raumgröße und vor allem von der Belegungsdichte abhängig. Zur Feuchteabfuhr sollte in der Regel durch eine tägliche Fensterlüftung eine mittlere Luftwechselrate von 0,5/h sichergestellt werden, wobei die Lüftung möglichst über den Tag verteilt erfolgen sollte. In einigen Fällen kann es auch erforderlich sein, durch die Erhöhung der Außenluft rate (= dem Raum zugeführte Außenluftmenge in m<sup>3</sup>/h, unabhängig von der Raumgröße) Feuchtigkeit abzulüften, hierzu können u.a. folgende Maßnahmen sinnvoll sein:

- Einbau dezentraler bzw. zentraler Abluftanlagen bzw. -geräte oder Abluft- sowie Zuluftgeräte bzw. -anlagen mit geeigneten Nachströmungsmöglichkeiten für die Außenluft.
- Eine ausreichende Nachlaufzeit der Ventilatoren in innenliegenden Räumen ist mit geeigneten Mitteln sicherzustellen (Bei Sanierungsmaßnahmen sollte besonders darauf geachtet werden, dass Zuluftöffnungen vorhanden sind).

Besondere Probleme ergeben sich beim Lüften von Kellerräumen und nicht gedämmten Souterrainwohnungen. Diese können in den Sommermonaten tagsüber deutlich kälter als die Außenluft sein. Folglich kondensiert die Feuchtigkeit der warmen feuchten Luft an den kühlen Oberflächen der Kellerräume. In der warmen Jahreszeit sollten daher solche Räume tagsüber nicht gelüftet werden.

Ein weiteres Problem stellen Schlafzimmer und selten bewohnte Räume (wie Gästezimmer) dar. Diese Räume dürfen, wenn sie nicht separat gelüftet werden, nicht ganz auskühlen und

sollten nicht bzw. möglichst wenig indirekt über andere Räume mit beheizt werden, da auf diese Weise mit der warmen Luft auch Feuchte einströmt, die sich an kalten Oberflächen niederschlägt. Nach Möglichkeit sollten daher alle Räume gleichmäßig beheizt werden. Insgesamt garantiert eine erhöhte Zimmertemperatur eine niedrigere Raumlufffeuchte, eine höhere Oberflächentemperaturen sowie eine geringere Gefahr eines Schimmelpilzwachstum.

Durch größere Einrichtungsgegenstände wie Schränke aber auch lange Vorhänge kann die Erwärmung der Außenwände behindert werden. In der Heizperiode sind folglich diese Wände immer kälter als unverstellte und weisen eine vergleichsweise höhere relative Feuchtigkeit auf, sodass es zu einem Schimmelpilzbefall kommen kann. Ein ähnlicher Effekt kann bei ungedämmten Fußböden auftreten.

Bei der Möblierung sollten daher folgende Empfehlungen beachtet werden:

- an gefährdete Außenwände (Außenwände mit niedrigem Dämmniveau) und in Außen-ecken sollten keine Möbel gestellt werden
- ist eine Möblierung an gefährdeten Außenwänden und –ecken unvermeidlich, sollte der Abstand zur Außenwand mindestens ca. 10 cm betragen und um eine vertikale Zirkulation der Raumluf zu gewährleisten, sollten die Möbel auf Füßen stehen und nicht raumhoch sein
- in kritischen Fällen, z.B. im Sockelbereich einer Einbauküche im EG an der Außenwand kann es sinnvoll sein, diese kalten Bereiche zu beheizen

### Neubaufeuchte

Viele Baustoffe wie Mörtel, Putz, Estrich, Beton enthalten, wenn sie verbaut werden, große Mengen Wasser. Bei der Erstellung eines Massivbaus werden im Durchschnitt ca. 90 Liter Wasser pro Quadratmeter Wohnfläche in den Neubau eingebracht, bei 100 m<sup>2</sup> Wohnfläche sind das 9 Tonnen. Außerdem kann durch Regen und Schnee während der Bauphase zusätzlich Wasser in den Bau gelangen. So ist es also nicht verwunderlich, dass es je nach Art und Menge des verwendeten Baumaterials z.T. mehrere Heizperioden dauert, bis die Baufeuchte aus einem neu gebauten Haus austrocknet. Nach Einzug in einen Neubau kann in der Anfangszeit neben verstärktem Lüften und Heizen eine technische Trocknung notwendig sein um Schimmelbildung zu verhindern Eine Belehrung des Nutzers bezüglich des Lüftungs- und Heizverhaltens sowie der Möblierung nach dem Einzug in einen Neubau ist unbedingt erforderlich.

## **6.18 Bauschäden und Baumängel**

### Wandoberflächen - Temperaturen zu niedrig

Die Ursache für ein Schimmelpilzwachstum kann eine erhöhte Feuchtigkeit an Bauteiloberflächen sein, weil die Anforderungen der DIN 4108-2, 2003-2 nicht eingehalten wurden. Die Schimmelpilzbildung kann in solchen Fällen u.a. durch die zusätzliche Anbringung einer ausreichenden Wärmedämmung verhindert werden, wobei eine Außendämmung in der Regel vorteilhafter ist. Bei einer Innendämmung kann es zu einer Absenkung der Temperatur zwischen Dämmung und der ursprünglichen Wand kommen. Somit kann es auch zu erhöhter Feuchte und damit auch zu Schimmelpilzwachstum in diesem Bereich kommen. Daher sollte die Planung von Wärmedämmungen durch entsprechende Fachleute wie z.B. Architekten oder Bauingenieure vorgenommen werden.

### Feuchtigkeit im Kellerbereich

#### **Ursachen für Feuchtigkeit im Kellerbereich**

Eine erhöhte Feuchtigkeit im Kellerbereich kann auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sein. Ein Grund kann die Änderung der Nutzung der Kellerräume sein. Werden ursprünglich zu Lagerzwecken geplante und baulich konzipierte Kellerräume später als Wohnräume genutzt, kann dies zu Schimmelpilzproblemen führen. Andere Gründe sind bauliche Mängel, Schäden durch eindringendes Wasser aufgrund defekter oder fehlender Abdichtungen, durch Rohrleitungsschäden oder fehlerhaftes Lüftungsverhalten.

Als Ursache für eine Wanddurchfeuchtung im Kellerbereich kommen folgende Gründe in Frage:

- aufsteigende Feuchtigkeit
- seitlich eindringende Feuchte im Bereich des Wand-Sohlenanschlusses durch Sicker-, Hang- und Schichtenwasser
- seitlich eindringende Feuchtigkeit durch defekte Regenrohre ober- und unterhalb des Erdniveaus
- hygroskopische Feuchte durch Salzbelastung der Wände
- Tauwasser von feucht-warmer Außenluft an den kalten Kellerwänden und Wasserleitungen im Sommer
- Leckagen an wasserführenden haustechnischen Einrichtungen

### **Formen der Sanierung bei Feuchteschäden im Kellerbereich**

Bei aufsteigender Feuchtigkeit gibt es u.a. das Bohrlochinjektions-Verfahren und den Austausch von Mauerwerk, um nachträglich eine Horizontalsperre einzubringen. Die Verfahren zum Einbringen einer nachträglichen Horizontalsperre sind u.a. in den WTA-Merkblättern "Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit" und "Nachträgliche mechanische Horizontalsperren" beschrieben.

Dringt seitlich Feuchtigkeit in das Bauwerk ein (flächig und im Bereich Wand-Sohlenanschluss), so ist gemäß DIN 18195 – Bauwerksabdichtung und WTA-Merkblatt "Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile" das Gebäude von außen freizulegen. Anschließend ist das sach- und fachgerecht vorbereitete Mauerwerk z. B. mit einer elastischen Bitumendickbeschichtung abzudichten, gegebenenfalls ist auch eine Drainage des umgebenden Erdreichs vorzunehmen. Zum Schutz und zur Erhöhung des Wärmedämmwertes des Mauerwerkes ist eine Perimeterdämmung anzubringen.

Bei seitlich eindringender Feuchtigkeit kann es auch erforderlich sein, eine Innenabdichtung vorzunehmen. Dazu wird ein mehrlagiges Innenabdichtungssystem mittels starren und flexiblen Dichtungsschlämmen auf der Wandinnenseite gemäß DIN 18195 – Bauwerksabdichtung und WTA-Merkblatt "Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile" auf die Innenwand aufgebracht. Es kann erforderlich sein, dass außerdem noch eine horizontale Abdichtung vorgenommen wird, da ansonsten die Gefahr besteht, dass in der Wand vorhandene Feuchtigkeit höher aufsteigt als vor der Baumaßnahme.

Risse in der Wand oder undichte Fugen können durch Einpressen von Harzen (z. B. dauerelastischen Kunstharzen auf Polyurethanbasis) unter hohem Druck formschlüssig ausgefüllt werden.

Besondere Fachkenntnisse sind erforderlich, wenn die Feuchtigkeit aus der Raumluft durch hygroskopisch wirkende Salze im Mauerwerk angezogen wird. Zur Sanierungsplanung sind Kenntnisse über Höhe und Art der Salzbelastung nötig. Je nach Schadenssituation kann ein Sanierputz, der eine hohe Salzspeicherfähigkeit aufweist, als flankierende oder einzelne Maßnahme gemäß WTA Merkblatt „Sanierputz“ eingesetzt werden.

In Kellerräumen kann besonders im Sommer das Problem der Bildung von Tauwasser eine besondere Rolle spielen. Wie weiter oben schon ausgeführt, ist in diesen Fällen durch eine Außen- oder Innendämmung der Wärmedämmwert zu verbessern.

Waren Leitungswasserschäden die Ursache für das Feuchteproblem in den Kellerräumen, sind diese durch eine Fachfirma zu lokalisieren und zu beheben.

### Weitere Bauschäden im Zusammenhang mit Schimmelschäden

Feuchte aufgrund mangelhaften Schlagregenschutzes der Fassade kann, sofern die Wasserführung (Regenrinnen etc.) in Ordnung ist, bei verputzten Fassaden durch einen hydrophoben Anstrich erfolgreich abgesenkt werden. Bei Sichtmauerwerk kann dies durch ein ausreichend tief appliziertes Hydrophobierungsmittel erreicht werden.

Windundichtigkeiten und Leckagen in der Außenhülle können bei einer Wetterlage mit niedrigen Temperaturen häufig mittels Infrarotthermographie lokalisiert werden. Durch geeignete Maßnahmen sind diese Leckagen abzudichten.

Bei nicht fachgerecht ans Mauerwerk anschließende Fenster, Auskragungen und andere Durchdringungen, ist eine ausreichende Abdichtung und die notwendige Dämmung sicherzustellen.

Mangelhafte Abdichtungen auf Flachdächern, flachen Dächern, Balkonen, etc. sind meist nur mit großem Aufwand zu sanieren, weil der Feuchteschaden oft an einer weit von der Undichtheit entfernten Stelle zu Tage tritt.

Bauwerksabhängige fehlende bzw. fehlerhafte Dampfbremsen und Dampfsperren können abhängig von der jeweiligen Konstruktion zur Ansammlung von Feuchtigkeit im Bauwerk führen. Bei vorhandener Dampfbremse/-sperre treten die Undichtigkeiten meist an den mangelhaft verklebten Wandanschlüssen und Durchführungen auf. Durchfeuchtetes Dämmmaterial oder Holz/Holzwerkstoffe müssen in diesen Bereichen ersetzt werden und anschließend muss eine sorgfältigere Abdichtung durchgeführt werden.

## **6.19 Entfernung des mit Schimmelpilzen befallenen Materials und Reinigung der Oberflächen**

Wird ein Schimmelpilzbefall auf Material festgestellt, kann dies auf einen aktuellen Befall oder auf die Sedimentation von Schimmelpilzsporen zurückzuführen sein. Bei einem aktiven Befall wachsen und vermehren sich die Schimmelpilze auf dem Material. Auf Material befinden sich aber auch Verunreinigungen mit Schimmelpilzsporen z.B. aufgrund der Verbreitung von Schimmelpilzsporen eines aktuellen Befalls. Zu einer solchen Verbreitung kann es vor allem auch bei Sanierungsarbeiten kommen. Diese Schimmelpilzsporen vermehren sich aktuell nicht. Da auch von nicht mehr lebensfähigen Schimmelpilzen allergische und reizende Wirkungen ausgehen können, sind auch mit Schimmelpilzen befallene Materialien vollständig zu reinigen oder zu entfernen.

Sind saugfähige Baumaterialien wie u.a. Holzwerkstoffplatten, Papier, Pappen und Gipsplatten mit Schimmelpilzen befallen, müssen diese in der Regel vollständig entfernt und in reißfesten Behältnissen staub- und luftdicht verpackt entsorgt werden. Bei Dämmmaterialien ist von Fall zu Fall zu entscheiden, inwieweit ein Ausbau erforderlich ist. Erfolgt kein Ausbau, ist sicherzustellen, dass von diesen Schimmelpilzquellen keine Belastungen ausgehen. In einzelnen Fällen kann z.B. das Dämmmaterial getrocknet werden und durch ein geeignetes sorptionsfähiges Material kann verhindert werden, dass Schimmelpilzsporen und Geruchskomponenten in den Innenraum gelangen.

Mit Schimmelpilzen befallenes Naturholz (Möbel, Treppen, Verkleidungen) kann, abhängig von der Schimmelpilzart, gegebenenfalls durch Abwaschen und Abhobeln gereinigt werden. Bei starkem Schimmelbefall von Holzbauteilen ist eine Ausbreitung der Pilzmycelien in die Tiefe und/oder ein Befall mit holzerstörenden Pilzen durch geeignete Untersuchungen zu überprüfen. Es ist auch sicherzustellen, dass es zu keiner Rückbefeuchtung des sorptionsfähigen Holzes kommt, da dadurch ein erneuter Befall ausgelöst werden würde.

Bei beschichteten Materialien und keramischen Belägen reicht in der Regel eine feuchte, gegebenenfalls desinfizierende Reinigung aus, um sie wieder- bzw. weiterverwenden zu können.

Stark mit Schimmelpilzen befallene Einrichtungsgegenstände mit Polsterung (Sessel, Sofa) sind meist nicht mit vertretbarem Aufwand sinnvoll zu reinigen und sollten daher im Normalfall entsorgt werden. Befallene Haushaltstextilien (Teppiche, Vorhänge) sind ebenfalls in der Regel nur mit großem Aufwand sachgerecht zu sanieren, sodass je nach Anschaffungskosten eine Entsorgung vorzuziehen ist. Tapeten und sonstige Wandbekleidungen sind möglichst nass abzulösen und zu entsorgen. Ist das Annässen der Oberflächen nicht angebracht, kann der Schimmelpilzbewuchs zur Vermeidung von Stäuben auch mit Dispersionsgrundiermittel oder Klebefolie fixiert werden.

Nicht mehr verwendbare befallene/bewachsene Gegenstände sind sofort in reißfesten Foliensäcken luft- und staubdicht zu verpacken und mit dem Hausmüll zu entsorgen.

Befallene Oberflächen von noch verwendbaren Bauteilen/Gegenständen sind möglichst nass zu reinigen oder mit einem BIA-baumustergeprüften Industriesauger mit Filterklasse H (ältere Bezeichnung: K1) bzw. HEPA2-Filter (siehe Fußnote nächste Seite) abzusaugen.

---

<sup>2</sup> HEPA = **H**igh-**E**fficiency-**P**articulate-**A**ir (für Staubsauger: Filter der Klasse H 12 nach DIN EN 1822)

Sind Putzoberflächen mit Schimmelpilzen befallen, muss überprüft werden, woher das Wasser kommt oder kam, das zum Schaden führte. Ist bzw. war der Putz längerfristig durchfeuchtet, so muss die gesamte befallene Putzlage in der Fläche großzügig entfernt werden. Ob und in welchem Maße der Putz entfernt werden muss, hängt u.a. von der Art des Putzes, der sich darauf befindlichen Tapete oder Farbe und der Zeit der Durchfeuchtung ab.

Hat Oberflächenkondensation dazu geführt, dass es zu einem Schimmelpilzwachstum an der Oberfläche gekommen ist, muss der Putz nicht in jedem Fall entfernt werden, da der Schimmel nicht in den trockenen Putz eindringt.

## **6.20 Reinigung**

Die Art und Weise der Reinigung von mit Schimmelpilzen befallenem Material ist stark vom Umfang des Befalls und den Eigenschaften des Materials (Rauhigkeit, Porosität, Wahrscheinlichkeit der Ausbreitung des Befalls) abhängig. Aus hygienischen Gründen kann die Verwendung biozider/fungizider Produkte mit Langzeit- bzw. Depotwirkung in Innenräumen grundsätzlich nicht empfohlen werden. Hingegen kann die Reinigung mit einem Dampfreinigungsgerät sinnvoll sein. Nach einer solchen Reinigung ist für rasche Trocknung zu sorgen.

Kleinere intakte Putzoberflächen können mit 70 - 80%igem Alkohol bzw. Isopropanol desinfizierend gereinigt werden. Aufgrund der Brand- und Explosionsgefahr, die von diesen Substanzen ausgeht, können nur kleinere Flächen auf diese Weise gereinigt werden.

In Ausnahmefällen kann auch eine Behandlung mit Chlorbleichlauge unter Beachtung der entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen angeraten sein. Beim Durchführen dieser Arbeiten ist zu bedenken, dass vorübergehend Chlorgas entstehen kann. Bei Einsatz von Chlorbleichlauge ist der Raum erst freizugeben, wenn kein Chlorgeruch mehr wahrzunehmen ist (siehe Betriebsanweisung).

Bei Reinigungsarbeiten empfiehlt es sich, nicht saure Reinigungsmittel einzusetzen, da diese durch alkalische Baustoffe neutralisiert und letztlich dem Baustoff nur Wasser und bei organischen Säuren auch Nährstoffe zugeführt werden. Überdies können saure Reinigungsmittel auch Gefügeschäden an Baustoffen verursachen.

Die folgende Tabelle 8 enthält eine Übersicht und Einschätzung gebräuchlicher Reinigungsverfahren für verschiedene Oberflächen.

**Tab. 8:** Eignung der Reinigungsverfahren für unterschiedliche Oberflächen

Reinigungsverfahren	Oberfläche		
	glatt, nicht saugend	porös	textil
trocken wischen/abfegen	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet
nass abwaschen	geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Dampfreinigung	bedingt geeignet	geeignet	nicht geeignet
Waschmaschine	nicht geeignet	nicht geeignet	bedingt geeignet
Sprüh-Extraktion	nicht geeignet	geeignet	geeignet
Storch Hochdruck-Krake	nicht geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Absaugen (K1-, H-Filter)	bedingt geeignet	bedingt geeignet	bedingt geeignet

### 6.21 Desinfizierende Reinigung im Zusammenhang mit einer Bautrocknung

Vor einer Bautrocknung, die aufgrund eines massiven Wasserschadens durch mikrobiologisch belastetes Wasser oder einer Hochwasserkatastrophe vorgenommen wird, empfiehlt sich häufig auch eine desinfizierende Reinigung befallener Oberflächen. Chlorbleichlauge oder Wasserstoffperoxid können hierfür geeignet sein, wobei zu beachten ist, dass solche Maßnahmen eine Schädigung des Baukörpers bedingen können. Entsprechende Bestimmungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes sind einzuhalten.

Von der Verwendung von Fungiziden wird hingegen abgeraten, da diese in der Praxis oft unwirksam sind und die Ursache für erneute gesundheitliche Belastungen der Nutzer sein können.

### 6.22 Trocknung feuchter Bausubstanz

Feuchteschäden können oft so groß sein, dass sie nur durch Lüftung nicht behoben werden können. In solchen Fällen ist häufig eine technische Trocknung erforderlich. In welcher Form die technische Trocknung durchgeführt wird richtet sich u.a. nach der Größe und Art des Wasserschadens, der Art der Bauausführung und des durchfeuchteten Baumaterials sowie der Art der Nutzung. Von entscheidender Bedeutung ist, dass mit der Trocknung so schnell als möglich begonnen wird. Um entscheiden zu können, welche Art der Trocknung zu wählen ist und ob eine Trocknung überhaupt sinnvoll ist, ist abzuklären, ob und in welchem Maße das zu trocknende Baumaterial mikrobiologisch (z.B. mit Schimmelpilzen) belastet ist. Mi-

kobiologisch belastetes Baumaterial ist vor allem dann zu erwarten, wenn der Schaden auf das Eindringen von mikrobiologisch verunreinigtem Wasser zurückzuführen ist, wenn ein Alt-schaden vorliegt (z.B. Eindringen von Sickerwasser) oder wenn es sich um organisches Baumaterial handelt. Sind nur Oberflächen mikrobiologisch befallen, kann es sinnvoll sein, eine desinfizierende Reinigung durchzuführen. Sind Hohlräume wie Trittschalldämmungen befallen, ist eine desinfizierende Reinigung in der Regel nicht möglich, dann sind entweder spezielle Techniken anzuwenden oder das befallene Material ist auszubauen.

Bei der Entscheidung ob eine technische Trocknung sinnvoll ist, sollte man sich an folgenden Punkten orientieren:

- Art, Größe und Alter des Schadens
- Art der Nutzung
- Gesundheitszustand der Nutzer
- Art der zur Verfügung stehenden Trocknungsgeräte

Wird eine technische Trocknung unter laufender Nutzung der entsprechenden Räume durchgeführt, ist diese Entscheidung mit besonderer Verantwortung zu überdenken. Es ist sicher zu stellen, dass es zu keiner verstärkten Belastung der Raumluft in dem Objekt mit Schimmelpilzsporen und anderen Mikroorganismen kommt. Dies gilt insbesondere für sensible Objekte wie Krankenhäuser, Kindergärten, Altenheime Schulen usw..

Sind die zu trocknenden Bauteile mit Schimmelpilzen befallen, ist darauf zu achten, dass die Schimmelpilzsporen nicht im gesamten Gebäude verteilt werden!

Bei alten Häusern sind aufgrund von Kriegs- und Brandschäden sowie Umbauten z.T. viele Veränderungen an der Bausubstanz vorgenommen worden, die in den seltensten Fällen dokumentiert wurden. Vor Beginn einer technischen Trocknung ist daher immer zuerst abzuklären, welche Baumaterialien verwendet wurden. Zur Füllung von Deckenkonstruktionen wurde z.B. Sand, Schlacke, Spreu, Lehmwickel oder Schutt verwendet. Die Zusammensetzung und gegebenenfalls die Schimmelpilzbelastung dieser Füllungen ist vor der technischen Trocknung zu überprüfen.

Gips an alten Wänden muss auf Haftung überprüft werden, da er sich aufgrund von Wassereinwirkung in Einzelfällen vom Mauerwerk löst.

Eine technische Trocknung von bestimmten Baumaterialien wie Holzwerkstoffplatten, Papier und Pappen ist meist nicht sinnvoll.

Bei einer Hitzetrocknung (z.B. mit Warmluft) ist darauf zu achten, dass das Material nicht nur oberflächlich sondern auch in der Tiefe trocken ist. Zu solch einem Problem kann es z.B. kommen, wenn eine aufgrund eines Wasserleitungsschadens durchfeuchtete Wand zu kurz getrocknet wird. Die Feuchte aus den oberen warmen Materialschichten diffundiert z.T. in kältere Wandschichten. Wird die Trocknung zu früh abgebrochen, diffundiert die Feuchte anschließend wieder in die gesamte Wand. Besonders schwierig ist die Trocknung von Bauteilen, die z.B. aufgrund von Fliesen ein- bzw. zweiseitig wasserundurchlässig sind.

Eine technische Trocknung gilt als erfolgreich abgeschlossen, wenn das gesamte Bauteil wieder eine normale Ausgleichsfeuchte besitzt, dies ist messtechnisch zu überprüfen. Außerdem ist zu überprüfen, dass das Objekt nicht aufgrund der Trocknung aktiv bzw. passiv mikrobiologisch (z.B. mit Schimmelpilzsporen) belastet wurde. Gegebenenfalls ist es notwendig, vor dem Wiederaufbau eine Feinreinigung vorzunehmen.

### 6.23 Trocknen durch Lüftung bei Kleinstschäden

Um Feuchte bei Kleinstschäden aus einem Raum abzuführen, kann Lüftung in vielen Fällen eine einfache und wirksame Maßnahme darstellen. Vor allem im Winter enthält die Außenluft trotz hoher relativer Feuchte eine geringe absolute Feuchte. Bei Lüftung im Winter wird die relative Feuchte im Raum stark erniedrigt. Tabelle 9 verdeutlicht, wie bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen und einer typischen relativen Außenluftfeuchte von 80% die entsprechenden relativen Feuchten der Innenraumluft, wenn sie auf jeweils 20°C erwärmt sind, abnehmen. So wird beispielsweise bei -10°C Außentemperatur durch die Erwärmung auf 20°C die Luftfeuchte auf 9% gesenkt.

**Tab. 9:** Temperatur – Feuchteverhältnisse

<b>Außentemperatur [°C]</b>	<b>Relative Feuchte außen [%]</b>	<b>Absolute Feuchte <sup>1)</sup> [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Relative Innen- luftfeuchte bei 20 C [%]</b>
-10	80	1,7	9
0		3,9	21
10		7,5	42
20		13,5	80

1) Absolute Feuchte ist außen und innen als gleich angenommen

Eine Lüftung im Sommer sollte generell nur dann durchgeführt werden, wenn die Temperatur im Gebäude höher liegt als draußen. Dies ist insbesondere in Kellern und Souterrainwohnungen oftmals schwierig. Ist diese Bedingung nicht gegeben, müssen die Fenster geschlossen bleiben! Ggf. kann oder sollte sogar durch Beheizen (auch bei warmer Witterung) die Temperatur künstlich angehoben werden, um per Lüftung Feuchte abtransportieren zu können. Es kann sinnvoll sein, in solchen Fällen eine bezüglich der Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse elektronisch geregelte kontrollierte Lüftung vorzunehmen.

## **6.24 Technische Trocknung**

Für eine technische Trocknung ist eine besondere Sachkunde erforderlich. Generell sollte die Trocknung so schnell wie möglich begonnen werden!

### Trocknungsverfahren

Folgende Verfahren werden u.a. zur technischen Trocknung genutzt:

- Kondensationstrocknung
- Adsorptionstrocknung
- Mikrowellentrocknung

(es kommen z.T. noch weitere Trocknungsverfahren auf der Basis von Wärmestrahlung zur Anwendung)

### Technische Trocknung von Fußbodenkonstruktionen

Die technische Trocknung wird häufig zur Unterestrichtrocknung eingesetzt. Wobei folgende Varianten zur Anwendung kommen:

- das Druckverfahren (Dieses Verfahren sollte nur dann eingesetzt werden, wenn Schimmelbefall ausgeschlossen werden kann!)
- das Saugverfahren
- das Saug-/Druckverfahren

Beim Druckverfahren wird die im Bautrockner getrocknete Luft mittels eines Seitenkanalverdichters über Einblasöffnungen (z.B. Bohrungen im Estrich) unter den Estrich in die Trittschalldämmung geblasen. Die trockene Luft reichert sich mit der Feuchte aus den Baumaterialien an und gelangt über Austrittsöffnungen in den Raum, daher ist dieses Verfahren zur Trocknung von mit Schimmelpilzen befallenen Materialien ungeeignet!

Beim saugenden Verfahren wird die Luft aus der Trittschalldämmung angesaugt. Die mittels eines Bautrockners heruntergetrockneten Raumlufte wird über eine Einblasöffnung unter den Estrich gesaugt. Diese Luft reichert sich in der Trittschalldämmung mit Feuchte an. Die in der abgesaugten Luft vorhandene Feuchte und die gegebenenfalls vorhandenen Schimmelpilzsporen werden direkt nach außen geleitet bzw. über einen nachgeschalteten Filter ausgefiltert.

Beim Saug-/Druckverfahren wird wie beim saugenden Verfahren die Luft durch geschaffene Öffnungen unter dem Estrich gesaugt. Parallel dazu wird getrocknete Luft unter Druck in die Trittschalldämmung eingeblasen. Der Saug-Volumenstrom muss bei diesem Verfahren größer sein als der Druck-Volumenstrom.

Je nach den örtlichen Gegebenheiten werden die Einblasöffnungen entweder von oben über die Fußbodenkonstruktion oder von unten über die Deckenkonstruktion unter den Estrich gebohrt. Die Anzahl der Einblasöffnungen müssen je Gebäude bzw. je Raumaufteilung vor Ort bestimmt werden.

Die Art und Weise wie die technische Trocknung durchgeführt werden soll, hängt vom Alter und von der Art des Wasserschadens ab. Ein aktueller massiver Schaden mit mikrobiologisch nicht belastetem Wasser, bei dem kurzfristig mit der Trocknung begonnen wird, ist als unproblematischer einzuschätzen als ein älterer Schaden, ein falsch sanierter Vorschaden oder ein Schaden mit mikrobiologisch belastetem Wasser. In den beiden letzten Fällen sollte, da mit hoher Sicherheit eine mikrobiologische Belastung vorliegt, in der Regel nach dem Saug- oder nach dem Saug-/Druckverfahren getrocknet werden. Generell ist zu prüfen, ob ein solcher Schaden überhaupt getrocknet werden kann.

Die Entscheidung wie die technische Trocknung durchzuführen ist, ist auch vom Aufbau der Fußboden- und der Deckenkonstruktion sowie von der Art des Oberflächenmaterials abhängig.

Der Erfolg der Trocknung muss über eine geeignete Bestimmung der Feuchte kontrolliert werden. Liegt der Wassergehalt unter der normalen Materialausgleichsfeuchte, kann die Trocknung als erfolgreich abgeschlossen gelten.

## **6.25 Oberflächen/Gegenstände ohne Befall**

Einrichtungs-/Ausstattungsgegenstände aus schimmelpilzbelasteten Objekten ohne sichtbaren Befall sind umgehend zu reinigen. Soweit diese durchfeuchtet sind, sind sie sofort zu trocknen. Während der Trocknung ist zu beobachten, ob ein Bewuchs auftritt.

Textile Gegenstände ohne Befall sind möglichst sofort zu waschen. Teppiche und Polstermöbel sind vorzugsweise mit einem Sprühextraktionsreinigungsgerät ganzflächig warm bzw. heiß zu reinigen. Bei Polsterungen und Stofftieren ist im Zweifelsfall zu kontrollieren, ob diese mit Schimmelpilzen belastet sind, wobei das Prinzip der Verhältnismäßigkeit zu beachten ist. So ist zu überprüfen, inwieweit eine Entsorgung nicht sinnvoller ist.

## **6.26 Wiederaufbau**

Vor dem Wiederaufbau sind die entsprechenden Oberflächen zu reinigen. Beim Wiederaufbau des Objektes sind die jeweiligen spezifischen Gegebenheiten zu bedenken. Es ist darauf zu achten, dass die angewandten Sanierungstechniken und die verwendeten Baumaterialien kein erneutes Schimmelpilzwachstum fördern, sondern sie sollten es vielmehr hemmen bzw. vermeiden.

Zur Vermeidung von erneutem Schimmelbefall sind entsprechende Baukonstruktionen und die fachgerechte Bauausführung von großer Bedeutung. Aber auch die Auswahl der verwendeten Baumaterialien spielt hierbei eine Rolle, da sie die Schimmelpilzbildung hemmen können.

Über die Auswahl der verwendeten Baumaterialien kann Einfluss auf die Nährstoffgrundlage für Schimmelpilze genommen werden. Im Falle von Kondensationsfeuchte ist die oberste Schicht, wie z.B. die Tapeten und der Anstrich, von entscheidender Bedeutung, wobei organische Materialien anfälliger sind als anorganische. Dieser Unterschied verwischt allerdings, wenn die Bauteiloberflächen bzw. die Beschichtungen verschmutzt sind. Verunreinigungen mit organischen Bestandteilen, wie Staub, Fette usw. können ausreichend Nährstoffe für Schimmelpilze enthalten. Bei stark verschmutzten Bauteiloberflächen spielt der Untergrund kaum eine Rolle.

Auch auf kalkhaltigen Baustoffen mit zeitweise hohem pH-Wert, die eigentlich schimmelpilzhemmend sind, kann ein Schimmelpilzwachstum nicht ausgeschlossen werden, da es in erster Linie auf den pH-Wert des eigentlichen Nährbodens (z.B. Staubablagerungen) ankommt, der auf Bauteiloberflächen in ausreichender Menge zur Verfügung stehen kann.

Hygroskopische Materialien wie Calcium-Silikat-Platten haben im Zusammenhang mit Schimmelpilzwachstum einen protektiven Effekt, da sie kurzfristig hohe Raumlufffeuchtigkeiten quasi „abpuffern“ können, sofern sie nicht verputzt, gemalert oder anderweitig diffusionshemmend beschichtet wurden.

Bevor möglicherweise neu verputzte Bauteile wieder tapeziert bzw. gestrichen werden, ist darauf zu achten, dass sie zuvor ausgetrocknet sind. Detaillierte Empfehlungen, wie der Wiederaufbau durchzuführen ist, können nicht gegeben werden. Es ist aber darauf zu achten, dass durch die Baumaßnahme selbst und durch die spätere Nutzung längerfristige Materialfeuchtebelastungen vermieden werden.

Es ist aber stets zu bedenken, dass selbst die Auswahl des optimalsten Baustoffs das „Schimmelpilzproblem“ nicht löst, wenn die Ursache des Schimmelpilzbefalls, die Feuchte auf bzw. im Bauwerk, nicht behoben wird.

Auf dem Markt werden die unterschiedlichsten Verfahren, Materialien und Mittel zur Beseitigung von Schimmelschäden angeboten, wobei dem Anwender oft suggeriert wird, dass diese bei jedem Schimmelschaden angewendet werden können. Vor ihrer Anwendung sollte man stets prüfen;

- ob der Vertreter genau beschreibt, in welchem konkreten Fall dieses Verfahren, Materialien bzw. Mittel wie angewandt werden sollen und wann von einer Anwendung abgeraten wird
- ob der Vertreter belegen kann, dass sein Produkt unter Praxisbedingungen wirksam ist, Laboruntersuchungen allein sind kein Beleg für die Wirksamkeit
- ob der Vertreter den Nutzer darauf aufmerksam macht, dass unabhängig von seinem Produkt die allgemeinen Regeln wie z.B. Behebung der Ursachen des Schimmelpilzbefalls, Entfernung schimmelpilzbefallenen Materials, Reinigung nach einer Sanierung zu beachten sind.

Erfolgt dies alles nicht, ist davon auszugehen, dass der Vertreter mit der Schimmelpilzproblematik nicht vertraut ist.

## 6.27 Feinreinigung des Objektes

Zur Sanierung gehört auch die abschließende Feinreinigung, die zum Ziel hat, die Staub- bzw. Aerosolbelastung und damit die im Staub bzw. in den Aerosolen enthaltenen Sporen zu reduzieren.

Nach der bautechnischen Instandsetzung und gegebenenfalls der Beseitigung von kleineren Abschottungen und Abdeckungen erfolgt die Feinreinigung aller Oberflächen in den betroffenen Räumen. Die Feinreinigung ist unter möglichst geringer Staub- bzw. Aerosolverwirbelung und hoher Effektivität bezüglich der Staub- bzw. Aerosolreduzierung durchzuführen. Glatte, feuchtigkeitsunempfindliche Materialien sind feucht abzuwischen, wobei für eine ra-

sche Austrocknung zu sorgen ist. Raue Oberflächen sind unter Verwendung von H- bzw. HEPA-Filtern abzusaugen.

Bei größeren Sanierungen kann es hilfreich sein, wenn während der Feinreinigung durch ein Luftaustauschgerät die Luftwechselrate erhöht und durch einen HEPA-Raumluftfilter die Schimmelpilzkonzentration in der Raumluft reduziert wird.

Erst nach der erfolgreichen Abnahme der Feinreinigung werden Abschottungen der Sanierungsbereiche gegen unbelastete Räume abgebaut.

## 6.28 Abnahme des Bauwerks

Bei der Abnahme des Bauwerks sind dem Nutzer Hinweise über erforderliche Änderungen des Nutzungsverhaltens (z.B. Lüftungs- und Heizverhalten, Aufstellen von Möbeln) zu geben. Je nach Art und Schwere des Schimmelpilzschadens sind gegebenenfalls Sanierungskontrollmessungen (bauphysikalisch, mikrobiologisch) durchzuführen.

Sanierungskontrollmessungen werden aus folgenden Gründen durchgeführt:

- Kontrolle, ob das Objekt aufgrund der Sanierungsarbeiten nicht höher wie allgemein üblich mit Schimmelpilzsporen belastet ist - **Reinheitskontrolle**
- Kontrolle, ob die Ursache für den Schimmelpilzschaden, der Anlass für die Sanierung war, behoben worden ist - **Ursachenbeseitigungskontrolle**

## 6.29 Reinheitskontrolle

Bei der Sanierung kann es je nach angewandter Technik zu einer relevanten Belastung des sanierten Objektes mit Schimmelpilzsporen kommen und der Wirkungsgrad der gegebenenfalls durchgeführten Reinigung zur Reduzierung des Objektes mit Schimmelpilzsporen kann je nach angewandter Technik sehr unterschiedlich sein. Daher ist je nach Größe des vorliegenden Schadens und der Wahrscheinlichkeit, dass nach der Sanierung mit einer relevanten Schimmelpilzbelastung zu rechnen ist, eine Reinheitskontrolle durchzuführen. Werden bei der Sanierung technische Maßnahmen eingesetzt, die die Verbreitung von Schimmelpilzsporen verhindern sollen, kann gegebenenfalls z.B. durch eine online Feinstaubmessung oder durch begleitende Luftmessungen während der Sanierung belegt werden, dass es bei der Sanierung zu keiner relevanten Verbreitung von Schimmelpilzsporen im Objekt gekommen ist. Bei einem solchen Vorgehen ist sicherzustellen, dass alle Sanierungsprozesse, bei denen es zu einer relevanten Schimmelpilzsporenfreisetzung kommt, messtechnisch verfolgt werden.

Wird die Reinheitskontrolle erst nach Abschluss der Sanierung durchgeführt, richtet sich die Art der Messung und ob es erforderlich ist eine Messung vorzunehmen, nach dem Umfang und der Art der Sanierung. Durch eine Bestimmung der Schimmelpilzkonzentration in der Luft bzw. im Hausstaub wird die allgemeine Belastung des Objektes mit Schimmelpilzsporen kontrolliert. Die Messungen sind unter Nutzungsbedingungen durchzuführen. Welches Verfahren genutzt wird richtet sich u.a. nach dem durchgeführten Sanierungsverfahren. Wurde bei der Sanierung eine Desinfektion vorgenommen, ist die Sanierungskontrollmessung mit Hilfe der Bestimmung der Gesamtsporenzahl in Bezug zur Außenluft durchzuführen. Im anderen Fall ist die Bestimmung der Luftkeimzahl in Bezug zur Außenluft vorzuziehen, wobei die Aussagekraft der Sanierungskontrollmessung erhöht wird, wenn die Schimmelpilzarten des ursprünglichen Schadens bekannt sind.

Aus der Überprüfung von Materialoberflächen kann nicht auf die allgemeine Reinheit eines Objekts geschlossen werden. Die Überprüfung neu eingebauter Materialien ermöglicht in der Regel keine Aussagen über die Güte der Sanierung.

### **6.30 Ursachenbeseitigungskontrolle**

Kann durch bauphysikalische Untersuchungen bzw. Berechnungen nicht zweifelsfrei belegt werden, dass die Ursache des Schimmelpilzschadens beseitigt worden ist, ist von Fall zu Fall zu entscheiden, inwieweit eine mikrobiologische Überprüfung des Sanierungserfolges durchzuführen ist. Die Art und der Zeitpunkt der Untersuchung richtet sich vor allem nach der Ursache und der Art des Schadens. War z.B. eine Wärmebrücke die Ursache für den Schimmelpilzschaden, sind die Untersuchungen frühestens im darauffolgenden Winter vorzunehmen. In diesem Fall ist zu kontrollieren, ob die Oberfläche der ursprünglichen Schadensstelle wieder aktiv mit Schimmelpilzen befallen ist. In der Regel kommt diesbezüglich dem Folienkontakt-Verfahren und der Direktmikroskopie die größte Bedeutung zu, da zweifelsfrei festzustellen ist, ob wieder ein aktiver Schimmelpilzschaden vorliegt.

War die Bauwerksabdichtung mangelhaft und eindringende Feuchtigkeit Ursache des Schimmelpilzschadens, so ist zu untersuchen, ob das entsprechende Material aufgrund erneut eindringender Feuchtigkeit wieder mit Schimmelpilzen befallen ist.

### **6.31 Literatur**

[1] Umweltbundesamt (2002) Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen

- [2] Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg (2001) Abgestimmte Ergebnisprotokolle der Arbeitsgruppe „Analytische Qualitätssicherung im Bereich der Innenraumluftmessung biologischer Schadstoffe“ am Landesgesundheitsamt Baden Württemberg 14.12.2001 (überarbeitet Dezember 2004), Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement
- [3] Gefährdungsbeurteilungen durch biologische Arbeitsstoffe bei der Gebäudesanierung - Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung nach Biostoffverordnung (BioStoffV); BG BAU, Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft

## 7 Verzeichnis der Referenten

**Herr Dr. Heribert Bischoff**

Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit  
Veterinärstraße 2, 85764 Oberschleißheim  
Email: heribert.bischoff@lgl.bayern.de

**Frau Dr. Iris Zöllner**

Hoppenlaustr. 7, 70174 Stuttgart  
Regierungspräsidium Stuttgart - Landesgesundheitsamt  
Abteilung 9  
Email: Iris.zoellner@rps.bwl.de

**Frau PD Dr. Bernadette Eberlein-König**

Klinik und Poliklinik für Dermatologie und Allergologie am Biederstein des  
Klinikums rechts der Isar der Technischen Universität München  
Biedersteiner Str. 29, 80802 München  
Email: Eberlein-koenig@lrz.tu-muenchen.de

**Herr Prof. Dr. Guido Fischer**

Institut für Hygiene und Umweltmedizin der RWTH Aachen am Klinikum Aachen  
Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen  
Email: Guido.Fischer@post.rwth-aachen.de

**Herr Dr. Thomas Gabrio**

Regierungspräsidium Stuttgart - Landesgesundheitsamt  
Abteilung 9  
Wiederholdstr. 15, 70174 Stuttgart  
Email: thomas.gabrio@rps.bwl.de

**Frau PD Dr. Katja Radon**

Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Arbeitsgruppe Arbeits- und Umweltepidemiologie & NetTeaching  
Ziemssenstr. 1, 80336 München  
Email: Katja.radon@med.uni-muenchen.de

**Herr Dr. Christoph Trautmann**

Umweltmykologie Dr. Dill und Dr. Trautmann GbR  
Zossener Str. 56-58, 10961 Berlin  
Email: mail@umweltmykologie.de

## **Notizen**

## **Andere Veröffentlichungen in der Reihe „Materialien zur Umweltmedizin“**

Erstmals im Jahr 2001 hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz eine Reihe „Gesundheit und Umwelt – Materialien zur Umweltmedizin“ herausgegeben. Diese Reihe wird, beginnend mit dem Band 9, durch das Sachgebiet Umweltmedizin des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) fortgeführt.

Die Materialien zur Umweltmedizin dienen der allgemeinen Information und im Besonderen der Fachinformation der bayerischen Gesundheitsbehörden zu Themen aus den Bereichen Umweltmedizin, Umwelthygiene, Umwelttoxikologie und Umweltepidemiologie.

### **Bisher sind in dieser Schriftenreihe folgende Bände erschienen:**

- Band 1 Mobilfunk: Ein Gesundheitsrisiko ? (2001)
- Band 2 PCB – Polychlorierte Biphenyle (2001)
- Band 3 Fortbildung Umweltmedizin (Material der Fortbildung der Bayerischen Akademie für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin am 20./21.11.2001)
- Band 4 Untersuchung und Bewertung der PCB-Belastung von Schülern und Lehrern in der Georg-Ledebour-Schule, Nürnberg (2002)
- Band 5 Aufgaben bei der Altlastenbehandlung (Material der Fortbildung der Akademien für Gesundheit, Ernährung und Verbraucherschutz am 19./21.11.2002)
- Band 6 Schutz vor der Entstehung allergischer Krankheiten: Protektive Faktoren des bäuerlichen Lebens (2003)
- Band 7 Umwelt und Gesundheit im Kindesalter. Ergebnisse einer Zusatzerhebung im Rahmen der Schuleingangsuntersuchung 2001/2002 in 6 Gesundheitsämtern (2004)
- Band 8 Projektbericht Schuleingangsuntersuchungen 2003: Umwelt und Gesundheit (2004)
- Band 9 Grundlagen und Bewertungen im Rahmen des Human-Biomonitorings (2005)
- Band 10 Longitudinale Kohortenstudie zur Erfassung akuter pulmonaler, kardialer und hämatologischer/hämostaseologischer Wirkungen von Feinstaub unter realen Umweltbedingungen (CorPuScula) (2005)
- Band 11 Umweltmedizinische Bedeutung von Dieselruß / Feinstaub
- Band 12 Kind und Umwelt - Teilprojekt Umweltperzeption und reale Risiken (2005)
- Band 13 Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 1 (2005)
- Band 14 Literaturstudie zu Acrylamid und aromatischen Aminen (2006)

sowie der vorliegende

- Band 15 Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 2 (2007)



91058 **Erlangen**  
Eggenreuther Weg 43  
Telefon: 09131/764-0



85764 **Oberschleißheim**  
Veterinärstraße 2  
Telefon: 089/31560-0



97082 **Würzburg**  
Luitpoldstraße 1  
Telefon: 0931/41993-0



80538 **München**  
Pfarrstraße 3  
Telefon: 089/2184-0

[www.lgl.bayern.de](http://www.lgl.bayern.de)

**Bayerisches Landesamt für  
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit**  
Eggenreuther Weg 43, 91058 Erlangen

Telefon: 09131/764-0  
Telefax: 09131/764-102

E-Mail: [poststelle@lgl.bayern.de](mailto:poststelle@lgl.bayern.de)  
Internet: [www.lgl.bayern.de](http://www.lgl.bayern.de)

Druck: Print Com, Erlangen

ISSN 1862-8052 (Print Ausgabe)  
ISSN 1862-9601 (Online Ausgabe)  
ISBN 978-3-939652-09-0 (Print Ausgabe)  
ISBN 978-3-939652-10-6 (Online Ausgabe)