

# **Pilzbelastung der Raumluft hochgedämmter Häuser – baubiologische Aspekte**

Dipl.-Biol. Ilka Toepfer, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer  
HAWK Hildesheim

## **1 Einleitung**

Seit der Energiekrise der 70er Jahre geht der Trend zur Energieeinsparung, der unsere Bauweise stark verändert hat. Die Entwicklung hochgedämmter Häuser führt bei manueller Fensterlüftung zu Problemen mit der Gewährleistung einer guten Raumluftqualität. Daher werden zunehmend Lüftungsanlagen vor allem auch in Einfamilienhäusern eingebaut. Da hier im Gegensatz zur Klimaanlage keine Befeuchtung und Kühlung der Luft stattfindet, geht man davon aus, dass Probleme mit mikrobiellen Kontaminationen ausgeschlossen sind. Es fehlen aber die Langzeiterfahrungen und Messungen, die diese Annahme absichern.

Im vorliegenden Forschungsprojekt, gefördert durch die AGIP des Landes Niedersachsen, Projekt F.A.-Nr. 2002.483 wurde der Einfluss der Lüftungsart – mechanisch oder manuell – auf das Vorhandensein von Mikroorganismen in der Raumluft beobachtet. Ferner wurden Untersuchungen zu der Filterqualität und entstehenden Pilzbelastungen im Filtermaterial der Lüftungsanlagen durchgeführt.

Schimmelpilze können verschiedene Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben und sind daher im Innenraum oder im Zuluftbereich einer Lüftungsanlage über das natürliche Maß hinaus nicht zu tolerieren. Einige Pilze können Infektionen, so genannte Mykosen, beim Menschen verursachen. Allerdings sind diese Pilze fakultativ-pathogen, d. h. die Erkrankung erfolgt nicht zwangsläufig. Meist sind immungeschwächte Menschen betroffen. Zu diesem Personenkreis gehören AIDS-Erkrankte, Transplantationspatienten, Krebspatienten in Strahlen- oder Chemotherapie, Diabetiker, Alkoholiker und teilweise auch Schwangere.

Die häufigere Art der Erkrankung ist die allergische Reaktion auf Schimmelpilze. Jeder Pilz kann zur Ausbildung einer Allergie führen und der Pilz muss dazu nicht mehr lebensfähig sein. Auch inaktive und abgestorbene Pilzsporen sowie ihre Fragmente sind noch allergen. Die Art der Symptome ist individuell verschieden und reicht von Augen- und Schleimhautreizungen über Erkältungssymptome bis hin zum allergischen Asthma.

Einige Pilze produzieren unter bestimmten Lebensbedingungen sogenannte Mykotoxine (Pilzgifte). Die Wirkung dieser Gifte ist aus dem Bereich der Lebensmittelforschung hinlänglich bekannt. Allerdings bezieht sich diese Forschung auf die Wirkung nach oraler Aufnahme, z. B. mit verdorbener Nahrung. Umstritten diskutiert wird in der Literatur die Wirkung nach inhalativer Aufnahme, z. B. in Innenräumen mit Pilzbefall. Einige Fallstudien (Di Paolo et al. 1983, Douwes et al. 1997, Rylander et al. 1983) weisen aber daraufhin, dass zumindest bei sehr hohen Toxin-Konzentrationen nach Inhalation ähnliche Erkrankungen erfolgen wie nach oraler Aufnahme. Mykotoxine wirken je nach Substanz z. B. karzinogen, akut toxisch, mutagen, immunsuppressiv oder teratogen.

Auch andere Bestandteile von Pilzen, wie z. B.  $\beta$ -1,3-Glucan, können zu unspezifischen Symptomen führen.  $\beta$ -1,3-Glucan ist ein Zellwandbestandteil von Pilzen und hat ähnlich wie Endotoxine von Bakterien eine inflammatorische und immunmodulatorische Wirkung.

Mikrobiell gebildete, flüchtige, organische Verbindungen (MVOCs = microbial volatile organic compound) sind für den muffigen Geruch verantwortlich, den ein Pilzbefall ausströmen kann. Sie verursachen somit hauptsächlich eine Geruchsbelästigung. Die Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen werden in der Literatur sehr kontrovers diskutiert.

Abgesehen von den Mykosen können alle anderen Erkrankungen auch dann erfolgen, wenn der Pilz selbst inaktiv, abgestorben oder sogar bereits in der Zersetzung ist.

## **2 Mikrobielle Belastung von Lüftungsanlagen**

### **2.1 Mikrobiologische Untersuchungsmethoden**

#### *Luftkeimmessung:*

Die direkte Impaktion von Keimen aus der Luft erfolgt auf feste Nährböden mit einem automatischen Luftprobenahmegerät (Merck MAS 100) bei einem Luftdurchsatz von 100 l/min und einem Gesamtvolumen von 50 l Luft/Probe. Die Anzucht der Mikroorganismen erfolgt direkt auf Festmedien (Malz und DG18) bei 18 °C und 37 °C für mindestens 5 Tage. Ausgewertet werden die koloniebildenden Einheiten (KBE). Die verschiedenen Keime werden isoliert und mikroskopisch bestimmt.

#### *Kontaktprobe:*

Ein steriler Samtstempel wird auf die zu beprobende Oberfläche und anschließend auf einen Nährboden gedrückt. Die darauf gewachsenen Mikroorganismen werden isoliert und mikroskopisch bestimmt. Somit kann z. B. ein Vergleich mit den in der Luft vorkommenden Arten angestellt werden.

#### *Nachweis von MVOCs:*

MVOCs (microbial volatile organic compounds) sind mikrobiell gebildete flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen, die z. B. für den muffigen, erdigen Geruch von Pilzen verantwortlich sind. Ihr Nachweis wird als Hinweis auf nicht zugänglichen oder versteckten Pilzbefall eingesetzt.

Die MVOCs werden aktiv mit Hilfe einer Handpumpe auf Tenax-Adsorptionsröhrchen gebracht (Durchzug von 2 l Luft). Die Bestimmung der Konzentration erfolgt bei der Firma Eukos, Umweltanalytik Nord in Plön, mit Hilfe der Thermodesorptionstechnik. Als Analyseverfahren wird hierzu die Kapillargaschromatographie mit massenselektivem Detektor (GC/MSD) eingesetzt.

#### *Untersuchung von Staub und Filtern:*

Der Staub wird gesiebt (< 63 µm-Fraktion) und mit dem Feinstaub eine Verdünnungsreihe in 0,9 % NaCl / 0,1 % TWEEN 80 - Lösung angesetzt. Je 100 µl der verschiedenen Verdünnungen werden auf je 4 DG18- und Malznährböden ausplattiert. Je eine Platte pro Nährboden und Verdünnung wird bei 37 °C, die anderen bei 18 °C inkubiert. Ausgewertet werden die koloniebildenden Einheiten (KBE) pro g Staub. Die verschiedenen Keime werden isoliert und mikroskopisch bestimmt.

Der Feinstaub sowie die Filtermatten aus den Lüftungsanlagen wurden mittels immunologischer Fertig-Testkits auf den Gehalt an Ochratoxin A und Aflatoxinen untersucht. Diese Testkits (Veratox) kommen von der Firma NEOGEN und sind für den Nachweis der Toxine in Lebensmitteln wie Kaffee und Getreide vorgesehen.

Ferner wurden einige Staubproben an die Bundesanstalt für Fleischforschung in Kulmbach zu Herrn Prof. Garreis eingeschickt. Dort erfolgte eine Analyse der Proben auf Ochratoxin A mittels HPLC-Fluoreszenzdetektion (**high performance liquid chromatography**).

*Bewertung der Ergebnisse der Luftkeimmessungen:*

Es existieren keine verbindlichen Grenz- oder Richtwerte. Zur Bewertung von Werten zu koloniebildenden Einheiten gibt die Fachliteratur unterschiedliche, z. T. widersprüchliche Auskünfte.

Die Auswertung erfolgt nach dem "Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen" des Umweltbundesamtes Berlin, 2002. Zusammengefasst gelten folgende Grundsätze:

1. Die KBE-Zahlen von Außenluftreferenzprobe und Raumluftprobe sind zu vergleichen.  
*Die Werte für die Raumluft sollten nicht deutlich oberhalb der Werte für die Außenluftreferenzprobe liegen, um als unauffällig angesprochen werden zu können.*
2. Das Gattungs- bzw. Artenspektrum von Raumluftprobe und Außenluftreferenzprobe ist zu vergleichen.  
*Das Spektrum der Raumluftprobe sollte dem der Außenluftreferenzprobe entsprechen, bzw. sollten keine zusätzlichen Arten auftreten, um von einer unauffälligen Probe sprechen zu können.*
3. Die Raumluftprobe ist auf das Vorhandensein von möglicherweise humanpathogenen oder anders gesundheitsgefährdenden Pilzen zu untersuchen.  
*In der Raumluftprobe sollten keine humanpathogenen Pilze enthalten sein. Nicht humanpathogene Pilze mit einem Gesundheitsrisiko sollten nur geringfügig oder gar nicht in der Luft enthalten sein.*

## 2.2 Lüftungsanlagen in bewohnten Häusern

### 2.2.1 Vorstellung der Häuser

Im Verlauf des Projektes wurden drei bewohnte Häuser im Jahreszyklus untersucht. Zwei der Häuser sind mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Das dritte Haus ohne Lüftungsanlage dient als Vergleichshaus. Aufgrund der unterschiedlichen Familienstruktur und der daraus resultierenden Raumnutzung sind die Ergebnisse nur eingeschränkt vergleichbar. Haus 1 und 3 haben eine sehr ähnliche Nutzerstruktur und keine Haustiere, so dass bei diesen Häusern der Vergleich am besten möglich ist.

#### *Haus 1:*

- Standort: Gifhorn
- Lüftungsanlage von Bosch-Junkers, LW 200
- Baujahr 2001
- 2 Erwachsene, 1 Kind, ein Elternteil berufstätig
- keine Haustiere

#### *Haus 2:*

- 3-I-Haus
- Standort: Celle
- Lüftungsanlage von Bosch-Junkers, LP 225
- Baujahr 2001/2002, Erstbezug Februar 2002
- 2 Erwachsene, 2 Jugendliche, beide Elternteile berufstätig
- 2 Hunde, 5 Katzen

#### *Haus 3:*

- Standort: Celle
- Manuelle Fensterlüftung
- Baujahr ca. 1994, Bezug durch die derzeit dort wohnende Familie: Februar 2002
- 2 Erwachsene, 1 Kind, ein Elternteil berufstätig
- keine Haustiere

## 2.2.2 Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen

Die Häuser wurden vierteljährlich über einen Jahreszyklus beprobt. Aufgrund der natürlichen und jahreszeitlich bedingten Schwankungen des Keimgehaltes in der Außenluft und der klimatischen Schwankungen wurden die Häuser somit unter verschiedenen Bedingungen untersucht.

Probenahmeterminale:

- 20.08.2003
- 28.11.2003
- 05.03.2004
- 11.06.2004

Bei den Häusern 1 und 2 (mit Lüftungsanlagen) wurden folgende Probenorte für die Luftkeimmessungen gewählt:

- Außenluft
- Zuluft unmittelbar hinter der Filterstufe (Bezeichnung: RLT Zuluft)
- Zuluft unmittelbar im Lüftungsauslass eines Raumes
- Raumluft desselben Raumes (Wohn- bzw. Kinderzimmer)

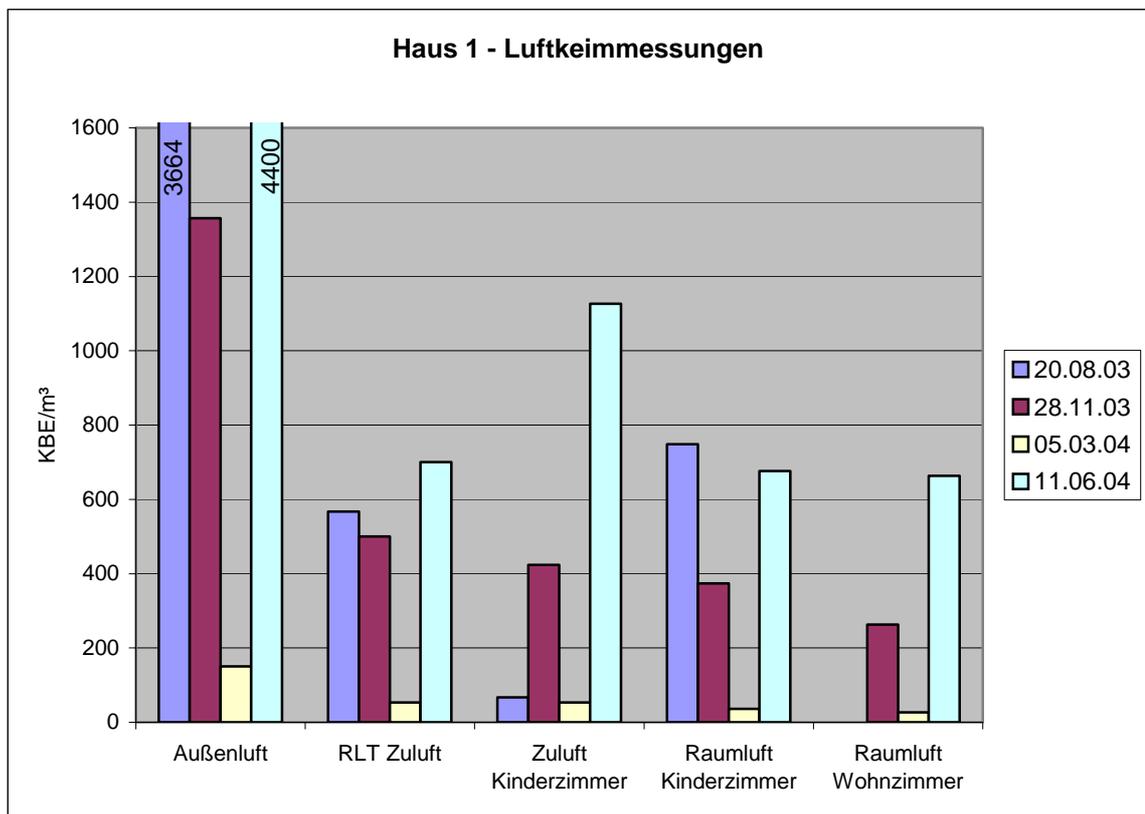
Bei Haus 3 ohne Lüftungsanlage wurde die Außenluft im Vergleich zur Raumluft von Wohn- und Schlafzimmer beprobt.

### **Haus 1:**

Zum Zeitpunkt der ersten Probenahme im August 2003 waren die Filter der Lüftungsanlage bereits ca. 2 Jahre in Benutzung und bisher nur zweimal ausgeklopft und abgesaugt worden. Ein Wechsel der Filter wurde aus Kostengründen nicht vorgenommen. Im Oktober 2003 wurden durch den Eigentümer selbst zwei Alurahmen angefertigt, in die je eine entsprechend zugeschnittene Filtermatte eingespannt werden kann. Die Filtermatte wird von der Rolle abgeschnitten. Seither wird seitens des Eigentümers ca. alle 6 Monate ein Filterwechsel vorgenommen. Die Qualität der Filtermatte ist nicht bekannt. Die alten, bis dahin genutzten Filter wurden weggeschmissen und standen für eine Untersuchung nicht mehr zu Verfügung.



**Abb. 1 + 2:** Abluftfilter der Lüftungsanlage in Haus 1. Im linken Bild ist der 2 Jahre alte, vom Hersteller vorgesehene Filter zu sehen. Im rechten Bild ist der selbstgebaute Filterrahmen mit einer zugeschnittenen Filtermatte von der Rolle abgebildet.



**Abb. 3:** Werte der Luftkeimmessungen in Haus 1 im Vergleich. Die Werte sind als koloniebildende Einheiten (KBE) pro  $m^3$  Luft angegeben. Der Wert der Außenluft vom 20.08.03 liegt im Mittel bei 3664 KBE/ $m^3$  und der vom 11.06.04 bei 4400 KBE/ $m^3$ . Um die anderen Werte besser vergleichen zu können, wurde die Skala auf einen kleineren Bereich festgelegt.

Wie in Abb. 3 zu sehen, kommt es bei allen Messungen zu einer deutlichen Reduktion der Keime im Vergleich zur Außenluft. Quantitativ beurteilt können alle Proben als unbelastet eingestuft werden. Bei der Messung am 11.06.04 weist die Probe aus der Zuluft vom Kinderzimmer im Vergleich zur Zuluft hinter der Filterstufe (RLT Zuluft) sowie zur Raumluft erhöhte Keimkonzentration

nen auf. An diesem Tag wurde einige Stunden vor der Probenahme der Filter gewechselt. Durch das Ausbauen des Filters kann es zum Ablösen von Sporen aus dem Filtermaterial gekommen sein, die dann im Zuluftkanal nachgewiesen wurden.

Zusätzlich werden die Proben qualitativ beurteilt, d. h. es wird ermittelt, welche Pilzarten in welcher Konzentration im Vergleich zur Außenluft vorkommen. Das Artenspektrum sollte sich nur geringfügig oder gar nicht von dem der Außenluft unterscheiden. Das Artenspektrum der Luftproben ist in Tab. A1 im Anhang dargestellt. Im Zuluftbereich sowie in der Raumluft konnten geringe Abweichungen des Artenspektrums festgestellt werden. Bei der Probenahme am 28.11.03 wurde in der Zuluft und Raumluft des Kinderzimmers der Pilz *Geotrichum candidum* mit bis zu 100 KBE/m<sup>3</sup> nachgewiesen. In der Außenluftprobe des selben Tages war dieser Pilz nicht vorhanden. Bei einem Abstrich des Zuluftkanals im Kinderzimmer kam *Aspergillus niger* mit bis zu 4 KBE / 30 cm<sup>2</sup> vor. Bei folgenden Messungen konnten diese Pilze nicht mehr nachgewiesen werden.

Bei den Probenahmen wurde der jeweils vorhandene Staubsaugerbeutel mitgenommen und der Hausstaub auf lebensfähige Keime untersucht. Die Staubprobe vom 05.03.04 war wahrscheinlich mit einer laborbedingten Kontamination belastet und muss daher aus der Beurteilung herausgenommen werden.

Zwei von drei Staubproben weisen erhöhte Konzentrationen an Pilzen auf (s. Tab. A2, Anhang). In beiden Proben handelt es sich um diverse *Aspergillus*-Arten. Nach dem Bewertungsschema des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg (2001) ist aufgrund der Konzentrationen eine Innenraumquelle für diese Pilze nicht auszuschließen. Pilzsporen sedimentieren je nach Größe, Form und Gewicht unterschiedlich schnell. Bei einer raumseitigen Pilzbelastung (z. B. besiedelte Wandflächen, Kontamination innerhalb einer Lüftungsanlage) kommt es im Staub zur Anreicherung von Pilzsporen über die Hintergrundbelastung hinaus. Im Haus konnte allerdings kein Pilzbefall oder eine andere Quelle für Pilze festgestellt werden.

*Aspergillus*-Arten haben ein relativ hohes gesundheitsschädigendes Potential und sollten daher im Innenraum nicht in erhöhten Konzentrationen vorkommen.

Wie in der Einleitung beschrieben, können einige Pilzarten unter bestimmten Lebensbedingungen so genannte Mykotoxine bilden. *Aspergillus versicolor* kann Sterigmatocystin produzieren, das ein wichtiges Zwischenprodukt der Aflatoxin-Synthese darstellt (Reiß, 1998). Dieses Toxin gilt als karzinogen und kann tiefgreifende Schäden an Leber und Niere hervorrufen. Ein Nachweis von Sterigmatocystin in den Staubproben war nicht möglich, da es für dieses Toxin keinen immunologischen Fertigttest auf dem Markt gibt und der in Auftrag gegebene Antikörper noch nicht vorlag.

Aflatoxine werden hauptsächlich von *Aspergillus flavus* und *Aspergillus parasiticus* hergestellt. Keine der nachgewiesenen *Aspergillus*-Arten gehört zu den direkten Aflatoxin-Produzenten. Dennoch konnten in der vierten Staubprobe (Juni 04) 0,2 ng/g Aflatoxine nachgewiesen werden. Es handelt sich um eine sehr geringe Konzentration. Die ersten drei Staubproben enthalten keine Aflatoxine. Aflatoxine wirken gegenüber Warmblütlern akut toxisch, mutagen, carcinogen, immun-suppressiv und teratogen (Reiß, 1998).

*Aspergillus niger* und *Eurotium herbariorum* (gehört zur *Aspergillus glaucus* Gruppe) können Ochratoxin A bilden, das im Tierversuch Schädigungen der Nieren und bei höheren Dosen krankhafte Veränderungen im Darmtrakt, in der Leber und im Lymphgewebe verursacht (Reiß, 1998). Dieses Toxin wurde sowohl mit einem immunologischen Fertigtest als auch über HPLC (s. Abschn. 2.1) in den Staubproben nachgewiesen. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Nachweisverfahren stimmen nicht überein. Der Nachweis im immunologischen Test gilt als empfindlicher als der Nachweis über HPLC, aber diese Tatsache erklärt nicht die unterschiedlichen Ergebnisse der Probe vom 28.11.03. Bei der ersten Probe konnten in beiden Nachweisverfahren geringe Mengen Ochratoxin A nachgewiesen werden. In der Probe vom November 2003 wurde eine wesentlich höhere Toxin-Konzentration im immunologischen Test festgestellt und im Nachweis über die HPLC war das Toxin unterhalb der Nachweisgrenze. Da solche Untersuchungen auch von anderen Instituten bisher nur vereinzelt durchgeführt wurden, fehlt es an Erfahrungen, wie die Werte zu interpretieren sind. An dieser Stelle besteht noch reichlich Forschungsbedarf.

Mykotoxine liegen auch in inaktiven oder abgetöteten Pilzbestandteilen sowie an Sporenfragmenten vor. Sofern in einer Staubprobe keine Toxinbildner als lebensfähige Keime nachgewiesen wurden, gilt das noch nicht als Beweis, dass auch keine Mykotoxine vorkommen können. An dieser Stelle fehlt eine geeignete Methode, im Staub die Gesamtzellzahl – also auch abgetötete oder inaktive Zellen und Sporen – aufzufinden. Aus diesem Grund ist es nicht außergewöhnlich, dass das Vorkommen der potentiellen Ochratoxin-Produzenten nicht mit den nachgewiesenen Konzentrationen an Ochratoxin A übereinstimmt. Genauso verhält es sich mit Aflatoxin und den entsprechenden Aflatoxin-Bildnern. Diese Feststellung wird durch eine Studie von Tuomi et al. (2000) bestätigt. Darin wurden 79 verschimmelte Oberflächenmaterialien auf 17 Mykotoxine untersucht (Nachweis über HPLC). In einigen Fällen wurden toxinogene Pilze, aber nicht ihre Mykotoxine nachgewiesen und umgekehrt.

| Datum der Probenahme | Immunologischer Schnelltest (ng/g) | HPLC (ng/g) | Vorkommen von Ochratoxin A – Produzenten                      |
|----------------------|------------------------------------|-------------|---|
| 20.08.03             | 2                                  | 0,1         | <i>Aspergillus glaucus series</i>                             |
| 28.11.03             | 10                                 | < NG        | -   |
| 05.03.04             | 5                                  | < NG        | <i>Aspergillus niger</i> (Kontamination?)                     |
| 11.06.04             | 2                                  | n. g.       | <i>Aspergillus glaucus series</i><br><i>Aspergillus niger</i> |

**Tab. 1:** Konzentration von Ochratoxin A im Hausstaub aus Haus 1 und das Vorkommen lebensfähiger Toxin-Produzenten. Der Nachweis erfolgte zum einen mit einem immunologischen Fertigtest und zum anderen über die HPLC (s. 2.1. Methoden).

NG: Nachweisgrenze

n. g.: nicht gemessen (die Staubproben vom Juni 04 konnten nicht mehr eingeschickt werden).

## **Haus 2:**

Die Filter der Lüftungsanlage wurden seit dem Erstbezug (Februar 2002) nicht gewechselt, sondern nur einmal ausgewaschen. Die Filter klemmen in Metallrahmen. Durch das Herausnehmen und vom Hersteller nicht vorgesehene Waschen hat sich das Filtermaterial soweit verzogen, dass es nicht mehr fest im Rahmen sitzt. Es ist nicht zu verhindern, dass die Außenluft teilweise ungefiltert am Filtermaterial vorbeiströmt. Die Filter wurden bei sämtlichen Probenahmen in schlechtem Zustand vorgefunden. Besonders bei der Probenahme am 05.03.04 konnten starke Verschmutzungen mit Staub in beiden Filtern festgestellt werden. Aufgrund der nicht durchgeführten Filterwechsel sowie der schlecht sitzenden Filtermatten ist die Lüftungsanlage insgesamt stark mit Staub verschmutzt (s. Abb. 5).

Der Kauf von neuen Filtern wurde – wie bei Haus 1 – aus Kostengründen bisher nicht vorgenommen. Im März 2004 teilte der Eigentümer mit, dass er neue Filter bestellt hat, um während des Waschens des einen Filterpaares das jeweils andere Filterpaar einsetzen zu können.

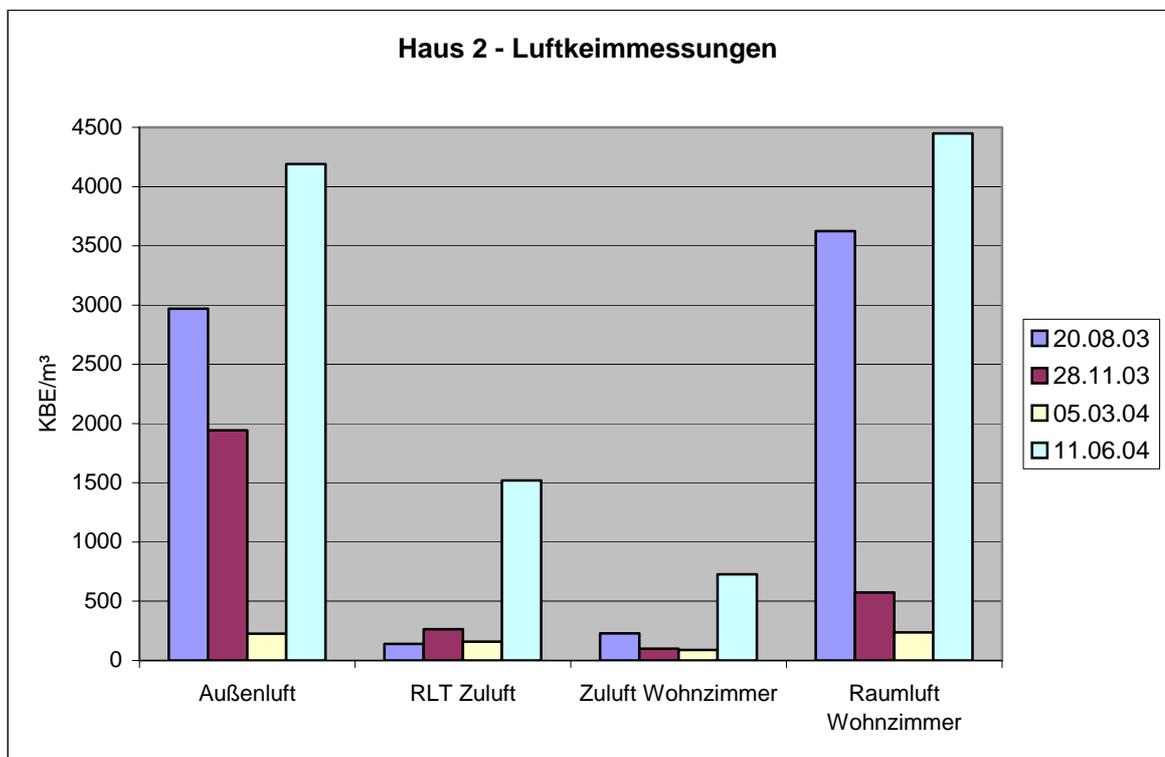
Seit Erstbezug haben sich um die Lüftungsauslässe herum Staubränder gebildet (s. Abb. 6). Sie lassen sich wegwischen und bilden sich innerhalb von ca. 3 bis 4 Wochen neu. Bei den Probenahmen wurden jeweils Kontaktproben dieser Staubränder genommen.



**Abb. 4 + 5:** Im linken Bild ist der Zuluftfilter nach ca. zweijähriger Standzeit und zweimaligem Waschen abgebildet. Rechts erkennt man innerhalb der Lüftungsanlage von Haus 2 die dichten Staablagerungen besonders im Zuluftbereich (s. Pfeil).



**Abb. 6 und 7:** Um den Lüftungsauslass im Wohnzimmer bilden sich regelmäßig dunkle Staubränder, die stark Sporen-haltig sind (rechts: Stempelprobe vom 28.11.03 auf DG18-Nährboden).



**Abb. 8:** Werte der Luftkeimmessungen in Haus 2 im Vergleich. Die Werte sind als koloniebildende Einheiten (KBE) pro  $m^3$  Luft angegeben. Die Werte der Raumluft vom Wohnzimmer sind unter Vorbehalt zu sehen, da hier bis kurz vor der Probenahme gelüftet wurde.

Wie bei Haus 1 kommt es im Verlauf der Lüftungsanlage zu einer deutlichen Reduktion der Anzahl an Mikroorganismen (s. Abb. 8). Die Werte der Raumluft aus dem Wohnzimmer können nicht bewertet werden, da bei drei Probenahmen trotz vorherigem Hinweis die Fenster bis kurz vor der Messung geöffnet waren. Ferner leben im Haushalt 2 Hunde und 5 Katzen, die sich scheinbar relativ viel im Wohnzimmer aufhalten. Beides führt zu einer starken Beeinflussung der Raumluft, so dass die Auswirkungen der Lüftungsanlage auf die Raumluftqualität nicht festgestellt werden können.

In allen vier Luftproben aus dem Bereich des Zuluftventilators (RLT Zuluft) ist *Aspergillus glaucus series* mit 5 bis 40 KBE/m<sup>3</sup> nachweisbar (s. Tab. A4, Anhang). Dieser Pilz ist auch auf den Zuluftfiltern und in den Staubrändern um die Lüftungsauslässe bei je zwei Probenahmen festzustellen (s. Tab. A5, Anhang). Es handelt sich noch nicht um bedenkliche Konzentrationen, aber das Potential für eine gesundheitsschädigende Belastung ist vorhanden.

Es konnten außerdem noch weitere Pilzarten in den Zuluftbereichen festgestellt werden, die zur gleichen Zeit nicht in der Außenluft enthalten waren. Demnach kam es bei allen vier Untersuchungen zu Verschiebungen des Artenspektrums, allerdings nur in geringer Konzentration.

Die Staubränder um die Lüftungsauslässe enthalten hohe Konzentrationen an Pilzsporen, die aus der Lüftungsanlage kommen müssen. Darunter befinden sich auch Pilzarten mit einem hohen gesundheitsschädigenden Potential wie z. B. *Aspergillus niger* und *Aspergillus glaucus*.

Bei den Hausstaubproben verhält es sich ähnlich wie bei Haus 1. Die Probe vom 05.03.04 wird aufgrund einer laborbedingten Kontamination aus der Bewertung herausgenommen. Die erste und vierte Probe enthalten erhöhte Konzentrationen an *Aspergillus*- und *Penicillium*-Arten. Bei der zweiten Probe sind zumindest bei der Inkubation bei 37 °C leicht erhöhte Konzentration an *Aspergillus*-Arten aufgetreten (s. Tab. A6, Anhang). Wie bei Haus 1 kann eine Innenraumquelle für diese Pilze z. B. in Form eines Befalls an der Wand ausgeschlossen werden.

Wie bereits bei Haus 1 erklärt, wurden die Staubproben auf den Gehalt an Ochratoxin A und Aflatoxinen untersucht. In drei Staubproben wurden über den immunologischen Schnelltest jeweils 2 ng/g Ochratoxin A nachgewiesen (s. Tab. 2). In den untersuchten Proben kommen *Aspergillus niger* und *Aspergillus glaucus series* (*Eurotium sp.*) als Produzenten für Ochratoxin A infrage. Mittels HPLC wurde in den beiden untersuchten Staubproben kein Ochratoxin detektiert.

Aflatoxine kommen wiederum nur in der vierten Staubprobe (Juni 2004) mit 0,8 ng/g vor. Auch hier wurden keine lebensfähigen Aflatoxin-Produzenten nachgewiesen.

| Datum der Probenahme | Immunologischer Schnelltest (ng/g) | HPLC (ng/g)       | Vorkommen von Ochratoxin A – Produzenten     |
|----------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| 20.08.03             | 2                                  | < NG              | <i>Aspergillus niger</i>                     |
| 28.11.03             | 2                                  | < NG              | <i>Aspergillus niger</i>                     |
| 05.03.04             | zu wenig Material                  | zu wenig Material | <i>Aspergillus niger</i><br>(Kontamination?) |
| 11.06.04             | 2                                  | n. g.             | <i>Aspergillus glaucus series</i>            |

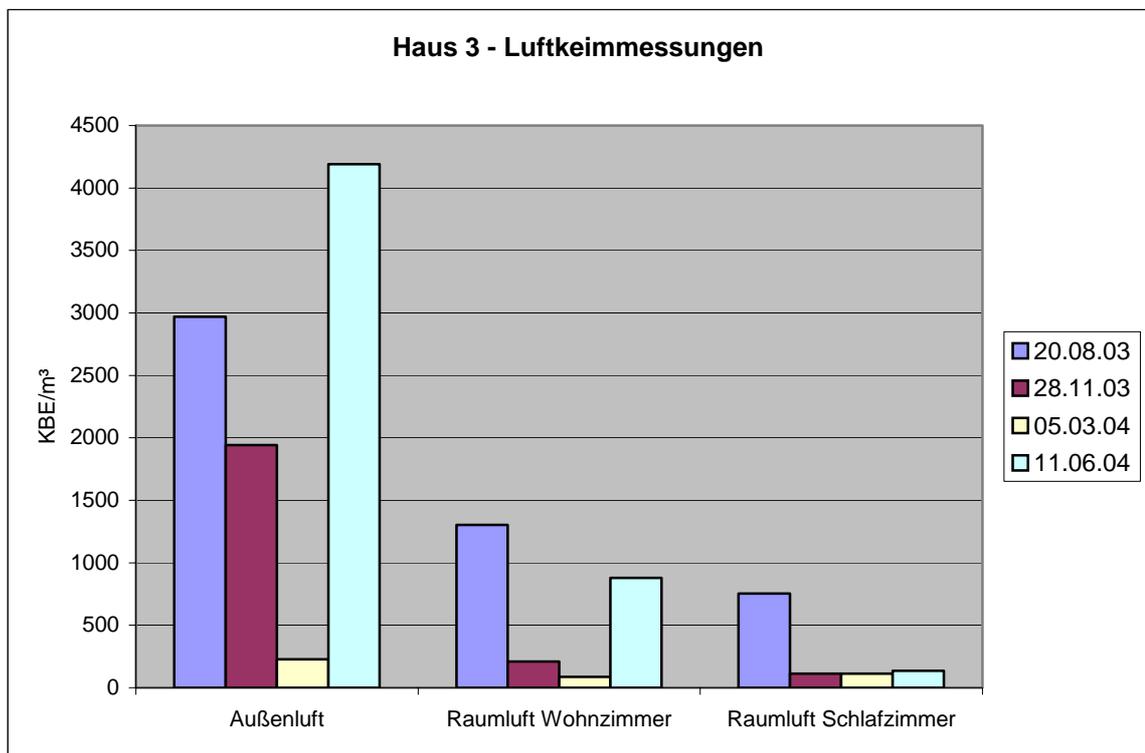
**Tab. 2:** Konzentration von Ochratoxin A im Hausstaub aus Haus 2 und das Vorkommen lebensfähiger Toxin-Produzenten. Der Nachweis erfolgte zum einen mit einem immunologischen Fertigtest und zum anderen über die HPLC (s. 2.1. Methoden).

NG: Nachweisgrenze

n. g.: nicht gemessen (die Staubproben vom Juni 04 konnten nicht mehr eingereicht werden).

### Haus 3:

Bei Haus 3 handelt es sich um das Referenzhaus ohne Lüftungsanlage. Von der Familienstruktur und den Nutzungsbedingungen sowie von der Lage her ist ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Haus 1 möglich.



**Abb. 9:** Werte der Luftkeimmessungen in Haus 3 im Vergleich. Die Werte sind als koloniebildende Einheiten (KBE) pro m<sup>3</sup> Luft angegeben.

Auch ohne Filterung der Luft durch eine Lüftungsanlage kommt es zur deutlichen Reduktion des Keimgehaltes im Innenraum im Vergleich zur Außenluft (s. Abb. 9).

Die Abweichungen des Artenspektrums im Innenraum von dem der Außenluft fallen bei Haus 3 geringer aus als bei Haus 1 und 2 (s. Tab. A7, Anhang). Es sind nur vereinzelt Keime in sehr geringen Konzentrationen nachweisbar, die zum Zeitpunkt der Probenahme nicht in der Außenluft vorkommen.

Bei den Staubproben sind lebensfähige Pilze nur in Konzentrationen nachweisbar, die einer normalen Hintergrundbelastung entsprechen. Die bei den anderen beiden Haushalten erhöhten Werte von *Aspergillus*- und *Penicillium*-Arten konnten bei den Proben aus Haus 3 nicht beobachtet werden. Ausgenommen ist auch hier wieder die Probe vom 05.03.04 (aufgrund laborbedingter Kontamination).

Der Nachweis von Ochratoxin A führte beim immunologischen Nachweis zum gleichen Ergebnis wie bei Haus 2. In den drei untersuchten Staubproben wurde die Substanz mit 2 ng/g nachgewiesen. Mittels HPLC konnten in den ersten beiden Proben geringe Mengen Ochratoxin A gefunden werden. Die entsprechenden toxinogenen Pilze kommen als lebensfähige Keime nur in geringer Konzentration vor.

Aflatoxine konnten in keiner der Proben nachgewiesen werden.

| Datum der Probenahme | Immunologischer Schnelltest (ng/g) | HPLC (ng/g)       | Vorkommen von Ochratoxin A – Produzenten   |
|----------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| 20.08.03             | 2                                  | 0,18              | -  |
| 28.11.03             | 2                                  | 0,19              | <i>Aspergillus niger</i> (geringe Konz.)   |
| 05.03.04             | zu wenig Material                  | zu wenig Material | <i>Aspergillus niger</i> (Kontamination?)  |
| 11.06.04             | 2                                  | n. g.             | <i>Aspergillus glaucus series</i><br><i>Aspergillus niger</i><br>(beide in geringer Konzentration) |

**Tab. 3:** Konzentration von Ochratoxin A im Hausstaub aus Haus 3 und das Vorkommen lebensfähiger Toxin-Produzenten. Der Nachweis erfolgte zum einen mit einem immunologischen Fertigtest und zum anderen über die HPLC (s. 2.1. Methoden).

n. g.: nicht gemessen (die Staubproben vom Juni 04 konnten nicht mehr eingereicht werden).

### **Filter:**

Von den Filtern in Haus 1 wurden zu unterschiedlichen Standzeiten Kontaktproben angefertigt: nach 5 Stunden sowie nach 4 und 18 Wochen (Ergebnisse s. Tab. A3, Anhang). Bereits nach 5 Stunden ist die Vorderseite des Zuluftfilters dicht mit Pilzsporen belegt. Die Rückseite weist zum gleichen Zeitpunkt weniger als die Hälfte an Sporen pro Probenfläche auf. Nach 4 Wochen ist der Zuluftfilter optisch beurteilt immer noch relativ gering verschmutzt. Die Stempelproben der Vorderseite zeigen allerdings massive Belastungen mit Pilzsporen.

Filter haben die Funktion, Pilzsporen und andere Partikel zurückzuhalten. Aus diesem Grund sind Sporen auf der Filteroberfläche zu erwarten. Die Kontaktproben der Rückseite der Filter zeigen, dass Pilzsporen durch die Grobfilter hindurchkommen und somit auch in die Zuluftschächte und in die Raumluft gelangen. Da im weiteren Verlauf der Anlage nur geringe Konzentrationen von Pilzsporen nachweisbar sind, ist eine gesundheitliche Beeinträchtigung des Raumnutzers zunächst auszuschließen. Auch bei der Fensterlüftung werden Pilzsporen von außen eingetragen und das Immunsystem kann diese Pilze abwehren. Es stellt sich allerdings die Frage, ob die Anreicherung

mit Pilzsporen im Filter auch zu einer Anreicherung mit Mykotoxinen und Allergenen führt und inwieweit diese Substanzen durch die Filter hindurch in die Zuluft bzw. Raumluft gelangen.

Die Zuluft-Filtermatten aus Haus 1 und 2 wurden wie der Staub mittels immunologischer Schnelltests auf Ochratoxin A und Aflatoxine untersucht. Wie in Tab. 4 zu sehen, sind keine Aflatoxine, aber 2 bzw. 5 ng/g Ochratoxin A enthalten. Potenzielle Toxinbildern für Ochratoxin A konnten in den Kontaktproben ebenfalls nachgewiesen werden. Im Gegensatz zum Staub kommt es hier zu einer Übereinstimmung zwischen vorhandenen toxinogenen Pilzen und dem Vorkommen von Ochratoxin A.

| Zuluft-filter | Ochratoxin A (ng/g) | Vorkommen von Ochratoxin A – Produzenten                      | Aflatoxine (ng/g) | Vorkommen von Aflatoxin – Produzenten |
|---------------|---------------------|---|-------------------|---------------------------------------|
| Haus 1        | 2                   | <i>Aspergillus glaucus series</i>                             | 0                 | -                                     |
| Haus 2        | 5                   | <i>Aspergillus glaucus series</i><br><i>Aspergillus niger</i> | 0                 | -                                     |

**Tab. 4:** Konzentration von Ochratoxin A und Aflatoxinen in den Zuluftfiltern von Haus 1 und 2 sowie das Vorkommen von potenziellen Toxin-Produzenten (Nachweis als lebensfähiger Keim) im jeweiligen Filter.

Pilze produzieren flüchtige organische Stoffwechselprodukte, so genannte MVOCs (microbial volatile organic compounds), deren gesundheitliche Relevanz in der Literatur sehr kontrovers diskutiert wird. Diese Verbindungen wurden bei den Probenahmen kurz hinter der Filterstufe im Zuluftstrom gemessen. In Haus 1 kann eine Zunahme der Konzentration dieser Verbindungen mit der Standzeit der Filter beobachtet werden (s. Tab. 5). Die Summenkonzentration der 8 Hauptindikatoren weist am 11.06.04 bereits auf einen verdeckten Schimmelpilzbefall hin (Bewertung nach Keller et al., 2003). Obwohl an diesem Tag der Filter ca. 5 Stunden vor der Probenahme gewechselt wurde, ist die Konzentration der MVOCs noch relativ hoch. Am gleichen Tag konnten im Zuluftbereich des Kinderzimmers erhöhte Keimzahlen im Vergleich zur Raumluft und zur Zuluft unmittelbar hinter der Filterstufe nachgewiesen werden (s. Abb. 3). Durch den Filterwechsel kam es scheinbar zu einer Freisetzung zahlreicher Sporen und Stoffwechselprodukten, die auch im weiteren Zuluftverlauf messbar sind.

Die Messung der MVOCs zeigt, dass Stoffwechselprodukte von den Pilzen im Filter abgegeben werden. Daher muss man davon ausgehen, dass neben den MVOCs auch andere Verbindungen sowie Fragmente von Pilzen in die Zuluft und somit auch in die Raumluft gelangen. Durch die Anreicherung der Pilze mit den Wochen nimmt auch die Abgabe der Stoffwechselprodukte zu.

Diese Beobachtungen konnten in Haus 2 nicht gemacht werden, da kein frischer Filter über eine längere Standzeit beprobt werden konnte. Wie oben beschrieben, wurden die Filter regelmäßig gewaschen.

|  |          |           |                          |
|--|----------|-----------|--------------------------|
| <b>Datum der Probenahme</b>  | 28.11.03 | 05.03.04  | 11.06.04                 |
| <b>Standzeit der Filter</b>  | 4 Wochen | 18 Wochen | 32 Wochen/<br>5 Stunden* |
| <b>Summenkonzentration der<br/>8 Hauptindikatoren (ng/m<sup>3</sup>)</b> | 200      | 420       | 1.445                    |

*Tab. 5: Summenkonzentration der 8 Hauptindikatoren von MVOCs, gemessen in Haus 1 direkt hinter dem Zuluftfilter. Von 15 untersuchten Verbindungen gelten 8 als Hauptindikatoren für den Nachweis von Schimmelpilzen (Konzentrationen aller Verbindungen s. Tab. A4, Anhang). Ihre Beurteilung erfolgt über die Summenkonzentration nach Keller et al., 2003: MVOC-Summe  $\geq$  95. Perzentil (427 ng/m<sup>3</sup>), aber  $\leq$  99. Perzentil (1504 ng/m<sup>3</sup>): ein verdeckter Schimmelpilzbefall kann nicht ausgeschlossen werden.*

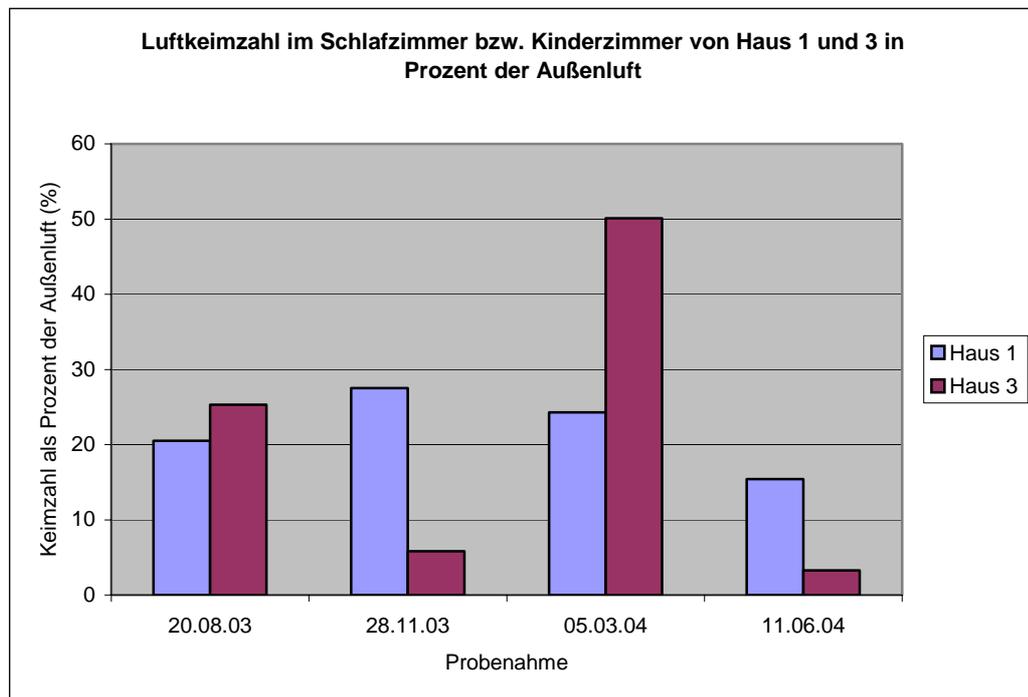
*\*: Die Filter wurden 5 Stunden vor der Probenahme gewechselt. Die Standzeit des Filters vor dem Wechsel betrug 32 Wochen. Man muss davon ausgehen, dass zum Zeitpunkt der Messung noch Verbindungen aus dem alten Filter nachweisbar sind.*

### 2.2.3 Schlussfolgerungen

Grundsätzlich weist die Raumluft in Haus 1 und 3 rein quantitativ gesehen keine Belastungen mit Schimmelpilzen auf.

Der Vergleich der Keimzahlen in der Raumluft von den Häusern 1 und 3 zeigt, dass es unabhängig von der Lüftungsart (mechanisch oder manuell) zu einer Reduktion der Luftkeime gegenüber der Außenluft kommt. Wie in Abb. 10 zu sehen, ist die Luftkeimzahl im Kinderzimmer von Haus 1 relativ gleichbleibend über die Jahreszeiten. Die Werte im Schlafzimmer von Haus 3 schwanken hingegen stärker. Da es sich um bewohnte Häuser handelt, hat nicht nur die Lüftungsart einen Einfluss auf die Luftkeimzahlen sondern auch die Nutzungsgewohnheiten der Bewohner. Daher ist eine Interpretation nur unter Vorbehalt möglich.

Haus 2 kann in diesen Vergleich nicht einbezogen werden, da hier bis kurz vor den Probenahmen jeweils das Fenster geöffnet war und sich mehrere Haustiere im Wohnraum aufhielten.



**Abb. 10:** Vergleich der Luftkeimzahlen im Kinderzimmer von Haus 1 und im Schlafzimmer von Haus 3 (ehemaliges Kinderzimmer) als Prozentangabe der Außenluft.

Die Luftproben aus den Häusern 1 und 2 (mit Lüftungsanlagen) zeigen im Vergleich zur jeweiligen Außenluft schwache, aber eindeutige Abweichungen des Artenspektrums. Die Konzentrationen der einzelnen Pilzarten sind allerdings zu niedrig, um von einer Belastung zu sprechen. Es geht auch keine gesundheitliche Gefährdung von diesen Pilzen in den festgestellten Konzentrationen aus. In Haus 3 sind die Abweichungen des Artenspektrums weniger eindeutig und die Konzentrationen der abweichenden Pilzarten geringer. Es besteht daher der Verdacht, dass die Lüftungsanlage zu einer (geringen) Veränderung der Artenzusammensetzung in der Zuluft und Raumluft führen kann. Die Filtergängigkeit von Pilzsporen hängt von ihrer Beschaffenheit und Größe ab, so dass es durch die Filter in Abhängigkeit der Pilzart zu einer Selektion kommt (Flückiger et al. 2000). Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass es auf oder im Filter zu einer Vermehrung bestimmter Pilzarten kommt, deren Sporen dann in der Luft nachweisbar sind.

Besonders in Haus 2 konnte beobachtet werden, dass mangelnde Wartung und unterlassene Filterwechsel zu starken Verschmutzungen innerhalb der Lüftungsanlage führen, die sich auch auf den Innenraum auswirken können. Der Staub, der aus der Anlage austritt, ist mit Pilzsporen angereichert (s. Staubränder um Lüftungsauslass in Haus 2), unter denen sich gesundheitsrelevante Arten befinden. Auch die Filteruntersuchungen zeigen, dass Pilzsporen in die Anlage geraten. Die massiven Staubablagerungen innerhalb der Lüftungsanlage liefern genügend Nährstoffe für ein Pilzwachstum. Somit ist zumindest das Potenzial für eine Verkeimung gegeben. Bei erhöhter Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum kann es demnach theoretisch zu einer Verkeimung der Anlage kommen.

Die Untersuchungen eines Zuluftfilters in Haus 1 über den Verlauf seiner Standzeit lässt folgende Schlussfolgerungen zu. Je länger die Filter in der Anlage verbleiben, desto mehr Pilzsporen rei-

chern sich im Filtermaterial an und gelangen auch durch die Filter hindurch. Von diesen Pilzen gehen flüchtige Stoffwechselprodukte (MVOCs) aus, deren Konzentration mit der Standzeit der Filter zunimmt. Ferner konnte in der Filtermatte Ochratoxin A nachgewiesen werden. Daher muss man davon ausgehen, dass auch gesundheitsschädigende Stoffwechselprodukte von den Pilzsporen in den Filtern abgegeben werden, die bei lang überzogenen Standzeiten der Filter empfindliche Personen belasten können. Dies zeigt, dass ein regelmäßiger Filterwechsel dringend erforderlich ist.

Die Frage, was auf und in den Filtern passiert, konnte im Projektrahmen nicht ausreichend beleuchtet werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass Pilze bei erhöhter Feuchtigkeit im Filter wachsen. Zum anderen deuten Untersuchungen (Senkpiel et al., 2001) darauf hin, dass die durch den Filter strömende Luft einen Stressfaktor für die Pilze darstellt. Dieser Stress mindert die Keimfähigkeit der Sporen. Auch die mechanische Einwirkung durch das Aufprallen auf dem Filtermaterial kann die Sporen negativ beeinflussen. Möritz et al. (2001) konnten nachweisen, dass Bakterien und größerer Endotoxinpartikel (Zellwandbestandteile von Bakterien) von mehr als 0,45 µm bis zu 90 % durch eine Feinfilterstufe zurückgehalten werden. Kleinere Endotoxinpartikel hingegen sind filtergängig. Auch in der Studie von Möritz et al. (2001) konnte festgestellt werden, dass Bakterien aufgrund des Luftstroms nicht auf den Filtern wachsen. Allerdings führt ihr Absterben zu einer vermehrten Endotoxinfreisetzung, die sich in Abhängigkeit von der Partikelgröße auf dem Filter anreichern oder durch die Filter hindurch gehen. Ähnlich verhält es sich bei Pilzen. Allergene und Mykotoxine kommen nicht nur innerhalb der Sporen vor, sondern sind auch an Sporenfragmenten gebunden und wirksam (Gabrio et al., 2003). Sofern die Partikel klein genug sind, gelangen sie ebenfalls in die Raumluft.

Zwei der Staubproben aus Haus 1 und drei der Staubproben aus Haus 2 weisen erhöhte Konzentrationen an *Aspergillus*- und teilweise auch *Penicillium*-Arten auf, die auf eine Innenraumquelle schließen lassen. Die Staubproben aus Haus 3 enthalten Konzentrationen an Pilzen, die einer normalen Hintergrundbelastung entsprechen.

Für die Erklärung der Befunde im Hausstaub aus Haus 1 und 2 kommen folgende mögliche Ursachen in Betracht:

- Einbringen von Sporen von außen aufgrund der Nähe zum Wald.  
Da sich alle drei Häuser in unmittelbarer Nähe zum Wald befinden, müssten auch die Staubproben aus Haus 3 belastet sein.
- Mangelnde Hygiene beim Umgang mit (biologischen) Abfällen.
- Pilzbefall an Bauteilen im Innenraum.  
Nach Auskunft der Bewohner liegt in allen drei Häusern kein Schimmelpilzbefall vor. Eigene Beobachtungen bestätigen dies.
- Verschimmelte Erde in Blumentöpfen.  
Auch in Haus 3 gibt es Topfpflanzen.
- Anreicherung durch die Lüftungsanlage

Da wie bei der Raumluft auch beim Staub die Zusammensetzung des Staubes durch die Nutzungsgewohnheiten und die Einrichtung beeinflusst werden, kann die genaue Ursache für die Belastungen nicht geklärt werden. Die Ursachen, die zu einer erhöhten Schimmelpilzkonzentration in einer Staubprobe geführt haben, können nur selten anhand der Schimmelpilzzusammensetzung sicher analysiert werden (Trautmann und Gabrio, 2003).

Der Nachweis von Ochratoxin A und Aflatoxinen im Hausstaub der Häuser zeigt, dass die Toxine in einigen Staubproben vorkommen. Allerdings ist eine Interpretation der Ergebnisse nur schwer möglich.

Der Nachweis von Mykotoxinen im Staub wurde bisher nur in einzelnen Fallstudien durchgeführt (Kasel et al. 1999, Richard et al., 1999). Daher existieren bisher keine standardisierten Methoden und es liegen wenig Erfahrungen zur Interpretation der Werte vor. Es ist nicht bekannt, welche Konzentration einer normalen Hintergrundbelastung entspricht und ab wann eine gesundheitlich schädliche Belastung vorliegt.

Die Mykotoxin-Synthese ist sehr von den Lebensbedingungen abhängig. Sowohl das Substrat als auch Feuchtigkeit und Temperatur sowie weitere Faktoren beeinflussen das Ausmaß der Produktion. Das Vorliegen einer Pilzbelastung ist daher nicht gleichbedeutend mit der Anwesenheit der Toxine, die der entsprechende Pilz synthetisieren kann. Welche Mengen eines Toxins gebildet werden, hängt unter anderem auch von der Pilzart ab; z. B. enthält eine Spore von *Penicillium verrucosum* die zehnfache Menge Ochratoxin A im Gegensatz zu einer Spore von *Aspergillus ochraceus* (Skaug et al. 2000). Auch diese Tatsachen erschweren die Auswertung der Ergebnisse.

### 3 Literatur

- [1] DIN 1946, Teil 6: Lüftung von Wohnungen, Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregeln), Ausgabe 10/1998
- [2] Di Paolo, N., Guarnieri, A., Loi, F., Sacchi, G., Mangiarotti, A. M., Di Paolo, M., 1993: Acute renal failure from inhalation of mycotoxins. *Nephron* 64, S. 621 – 625.
- [3] Douwes, J., Dubbeld, H., van Zwieten, L., Wouters, I., Doekes, G., Heederik, D. Steerenberg, P., 1997: Work related acute and (sub-)chronic airways inflammation assessed by nasal lavage in compost workers. *Ann. Agric. Environ. Med.* 4, S. 149 – 151.
- [4] Flückiger, B., 1997: Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Registern. ETH Zürich, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie.
- [5] Flückiger, B., Koller, T., Monn, C., 2000: Comparison of airborne spore concentrations and fungal allergen content. *Aerobiologia* 16, S. 393 – 396.

- 
- [6] Gabrio, T., Grüner, C., Trautmann, C., Sedlbauer, K., 2003: Schimmelpilze in Innenräumen – gesundheitliche Aspekte. In: Bauphysik-Kalender 2003, Ernst & Sohn Verlag, S. 531 – 565.
- [7] Gertis, K., Erhorn, H., Reiß, J., 1997: Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden. Proceedings Bauphysik-Kongress Berlin, S. 241 – 253.
- [8] IBN, Institut für Baubiologie und Ökologie Neubeuern, 1999: Luft und Schadstoffe, Lehrheft 13.
- [9] Kasel, U., Wichmann, G., Bleck, M., 1999: Ochratoxin A im Hausstaub. Umweltmed Forsch Prax 4 (5), S. 301 – 303.
- [10] Keller, R., Reinhardt-Benitez, S., Böge, K.-P., Döringer, K., Eilers, J., Laußmann, D., Mergener, H.-J., Ohgke, H., Schleibinger, H., Schmidt, A., Senkpiel, K., Walker, G., Weiß, R., Butte, W., 2003: Hintergrundwerte von flüchtigen Schimmelpilzmetaboliten in unbelasteten Wohngebäuden. In: Keller, R., Senkpiel, K., Samson, R.A., Hoekstra, E.S.: Schutzmaßnahmen vor mikrobiellen Belastungen des Innenraums, Lübeck, September 2003.
- [11] Kruppa, B., Veer, I., Rüden, H., 1993: Experimentelle Untersuchungen zur Frage der aerogenen Übertragung von Luftmikroorganismen bei hybriden Heizsystemen. Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik 114, Heft 1, S. 5 – 10.
- [12] Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, 2001: Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. Arbeitskreis „Qualitätssicherung – Schimmelpilze in Innenräumen“, 14.12.2001.
- [13] Lotz, A., Hammacher, P., 2001: Schimmelschäden vermeiden. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.
- [14] Möritz, M., Peters, H., Nipko, B., Weist, K., Rüden, H., 2001: Mikroorganismen und Endotoxine in Raumlufttechnischen Anlagen. Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik 122, Heft 1, S. 3 – 15.
- [15] Pitzurra, M. et al., 2000: Microbial environmental monitoring of stone cultural heritage. Proceedings of the 9<sup>th</sup> international congress on deterioration and conservation of stone, p. 483 – 491.
- [16] Recknagel, Sprenger, Hönnmann, 1993: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 66. Auflage, Oldenbourg Verlag München Wien.
- [17] Reiß, J., 1998: Schimmelpilze – Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 2. Auflage, Springer Verlag.
- [18] Reiß, J., Erhorn, H., Ohl, J., 2001: Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei der Fensterlüftung, Sonderdruck aus HLH 52, Heft 8, S. 22 – 26.

- 
- [19] Richard, J., Plattner, R., May, J., Liska, S., 1999: The occurrence of Ochratoxin A in dust collected from a problem household. *Mycopathologia* 146, S. 99 – 103.
- [20] Rylander, R., Lundholm, M., Clark, C. S., 1983: Exposure to aerosols of microorganisms and toxins during handling of sewage sludge. In: Wallis, P. M., Lehmann, D. L. (ed.): *Biological health risks of sludge disposal to land in cold climate*. University of Calgary Press, S. 69 – 78.
- [21] Sedlbauer, K., Oswald, D., König, N., 1998: Schimmelgefahr bei offenen Luftkreisläufen – Vorstellung einer Prognosemethode auf der Basis von Fuzzy-Algorithmen. *Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik* 119, Heft 5, S. 240 – 247.
- [22] Sedlbauer, K., Krus, M., 2003: Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. *Bauphysik-Kalender 2003*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 435 – 530.
- [23] Senkpiel, K., Küther, M., Ohgke, H., 2001: Personen- und arbeitsplatzbezogene Luftqualitätskontrollen. *Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik* 122, Heft 1, S. 16 – 22.
- [24] Skaug, M. A., Eduard, W., Størmer, F. C., 2000: Ochratoxin A in airborne dust and fungal conidia. *Mycopathologia* 151, S. 93 – 98.
- [25] Trautmann, C., 2001: Schimmelpilzbefall in Wohnungen. In: Verband der Bausachverständigen Norddeutschland e. V., VBN: *Topthema Schimmelpilze*. Sonderheft, S. 5 – 22.
- [26] Trautmann, C., Gabrio, T., 2003: Schimmelpilzanalytik im Hausstaub. In: *Tagungsband 7. Pilztagung des VDB „sicher erkennen – sicher sanieren“ vom 27. – 28.06.2003*, Stuttgart, S. 15 – 22.
- [27] Tuomi, T., Reijula, K., Johnsson, T., Hemminki, K., Hintikka, E.-L., Lindroos, O., Kalso, S., Koukila-Kähkölä, P., Mussalo-Rauhamaa, H., Haahtela, T., 2000: Mycotoxins in crude building materials from water-damaged buildings. *Appl Environ Microbiology* 66, No. 5, S. 1899 – 1904.
- [28] Umweltbundesamt Berlin, 2002: *Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen*. Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes.
- [29] Zöld, A., 1990: Mindestluftwechsel im praktischen Test. *HLH - Heizung, Lüftung, Haustechnik*, Band 41, Heft 7, S. 620 – 622.