

# Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft

Schriftenreihe zum Schutz von Gesundheit und Umwelt bei baulichen Anlagen

## Sonderband der WaBoLu-Innenraumtage 2020



### 10 Jahre Wahlpflichtfach Wohnmedizin an der Hochschule

10 years of elective subject "Indoor environmental medicine" at the university – experiences and results  
*Pilgramm, Manfred*

### Raumluftbelastung durch aliphatische Kohlenwasserstoffe – Fallbeispiel Schule

Indoor air contamination by aliphatic hydrocarbons: a case study of classrooms  
*Weese, Florian*

### Zeitliche und räumliche Schwankungen der Formaldehydkonzentration in Klassenräumen

Temporal and spatial fluctuations of formaldehyde concentration in classrooms  
*Tirler, Werner; Natolino, Fabrizio; Donegá, Massimo*

### Gezielte Beeinflussung der Innenraumluftqualität durch Sorptionsmaterialien

Targeted influencing of indoor air quality by means of sorption materials  
*Stratev, Daniel; Habla, Elisabeth; Fürhapper, Christina; Weigl, Martin*

### Abschottung von Schimmelschäden durch Bauteile – eine kritische Betrachtung

Indoor mold: A critical look on barrier properties of customary building components  
*Thumulla, Jörg; Kroczeck, Carmen*

**WaBoLu**  
Wasser Boden Luft

**Umwelt**   
Bundesamt

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Fachgebiet II 1.3 „Innenraumhygiene,  
gesundheitsbezogene Umweltbelastungen“  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)  
facebook [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
twitter [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)  
YouTube [/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/umweltbundesamt)  
Instagram [/umweltbundesamt](https://www.instagram.com/umweltbundesamt)

zusammen mit dem

Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene e.V.  
Rosenthaler Weg 62  
13127 Berlin  
Tel: +49 30-64496217  
verein@wabolu.de  
Internet: [www.wabolu.de](http://www.wabolu.de)

Stand: Dezember 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Das vorliegende Werk steht als Schriftenreihe  
Nr. 170 in der Online-Bibliothek des Vereins für  
Wasser-, Boden- und Lufthygiene e.V. (WaBoLu)  
zur Verfügung: <https://wabolu.de/nr-170/>

**Redaktion:**

Wolfram Birmili, Anja Daniels und  
Ana Maria Scutaru

**Korrektorat:**

Dr. Doris Kliem, Urbach

**Umschlaggestaltung:**

WMTP Wendt-Media Text-Processing GmbH,  
Weinheimer Straße 6, 69488 Birkenau

**Umschlagbild:**

iStock.com/Aleksandra Zlatkovic

**Satz:**

WMTP Wendt-Media Text-Processing GmbH,  
Weinheimer Straße 6, 69488 Birkenau

# Inhalt

---

## Editorial

### **WaBoLu-Innenraumtage 2020**

6

Wolfram Birmili, Anja Daniels, Ana Maria Scutaru

## Fachbeiträge

### **10 Jahre Wahlpflichtfach Wohnmedizin an der Hochschule – Erfahrungen und Ergebnisse**

7

**10 years of elective subject “Indoor environmental medicine” at the university – experiences and results**

Prof. Dr. med. M. Pilgramm

Der Beitrag zeigt die Entwicklung des Wahlpflichtfaches Wohnmedizin im Bereich der Detmolder Schule (Hochschule für Architektur, Innenarchitektur und Stadtplanung, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe [TH OWL]) auf. Da dieses Fach bisher nur an einer Hochschule in Deutschland gelehrt wird, soll das Interesse an einer weiteren Verbreitung geweckt werden. Das Wahlpflichtfach Wohnmedizin wird seit 2010 gelehrt. Bis Ende des Sommersemesters 2020 haben 1.217 Studierende ihr Studium im Bachelorstudiengang sowie 231 Studierende im Masterstudiengang abgeschlossen. Das Fach wird im Bachelor- sowie im Masterstudiengang jeweils mit 4 Wochenstunden (Vorlesung und Praktikum) gelehrt. Bei bestandener Klausur werden 4 Credit Points angerechnet.

The article shows the development of the elective subject “Indoor environmental medicine” in the area of the School Detmold (University of Architecture, Interior Design and Urban Planning, Technical University – East Westphalia). Since this subject has so far only been taught at one university in Germany, interest in further spread shall be aroused. The elective subject “Indoor environmental medicine” has been taught since 2010. By the end of the 2020 summer semester, 1.217 students had completed their bachelor’s degree and 231 students had completed their master’s degree. The subject is taught 4 hours a week in the bachelor’s degree, (lectures and internship) and in the master’s degree. If the test is passed, 4 credit points are awarded.

### **Raumluftbelastung durch aliphatische Kohlenwasserstoffe: Fallbeispiel Schule Indoor air contamination by aliphatic hydrocarbons: a case study of classrooms**

15

MSc. Florian Weese

Raumluftmessungen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) in 2 Klassenräumen einer Schule ergaben in beiden Fällen eine Überschreitung des vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) angegebenen, toxikologisch abgeleiteten Richtwert I von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Summe an Alkanen, Isoalkanen und Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ). Zum Auffinden der Raumluftbelastungsquelle sollten jedoch neben Untersuchungen der vorhandenen Bausubstanz auch alternative Quellen mit einbezogen werden.

Indoor air measurements for volatile organic compounds (VOC) were carried out in two classrooms of a school. It was found that in both cases the toxicologically derived guideline value I of  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for the sum of alkanes, isoalkanes and cycloalkanes ( $C9$  to  $C14$ ) given by the German Committee on Indoor Guide Values (AIR) was exceeded. To find the source of indoor air pollution, alternative sources should be included in addition to investigations of the existing building fabric.

## Zeitliche und räumliche Schwankungen der Formaldehydkonzentration in Klassenräumen

25

### Temporal and spatial fluctuations of formaldehyde concentration in classrooms

Dr. rer. nat. Werner Tirler, Dr. med. Fabrizio Natolino, Massimo Donegá

Die Formaldehydkonzentration in Klassenräumen kann jahreszeitlich bedingt stark schwanken. Ein an einem zentralen Punkt im Klassenraum gemessener Formaldehydwert muss nicht immer für den ganzen Raum gelten. Durch Verwenden von Passivsammlern kann die räumliche Verteilung der Formaldehydkonzentration auch ohne großen Mehraufwand an mehreren Stellen innerhalb eines Klassenraums gemessen werden. Aufgrund der Raumnutzung während des Schulbetriebs unter der Woche können die Werte im Vergleich zu einer Nichtnutzung am Wochenende stark abweichen.

Formaldehyde concentrations in classrooms can strongly change with season. A formaldehyde concentration measured at a central point of the room is not necessarily the same as in other parts of the room. By using passive samplers, it is possible to sample in different locations in a room using a reasonable amount of resources. The use of the classroom during the week can lead to different measurement results compared to the weekend period.

## Gezielte Beeinflussung der Innenraumluftqualität durch Sorptionsmaterialien

31

### Targeted influencing of indoor air quality by means of sorption materials

Dr. Daniel Stratev, Mag. Elisabeth Habla, DI(FH) Christina Fürhapper, Dr. Martin Weigl

Erhöhte Innenraumluftkonzentrationen von VOC (engl.: volatile organic compounds) und niedermolekularen Carbonylverbindungen (z. B. Formaldehyd), aber auch andere Emissionen, wie z. B. Ammoniak, treten in Wohnobjekten zu spezifischen Zeitpunkten während der Nutzung auf und sind üblicherweise bau-, werkstoff- oder situationsspezifisch.

Wenn das reine Ablüften dieser Substanzen zu langsam geschieht oder gezielt darauf Einfluss genommen werden möchte, können Sorptionsmaterialien zum Einsatz kommen. Es wurde dazu für Lehmputz und auch für sogenannte Scavenger-Materialien das Sorptionsverhalten von in der Innenraumluft auffindbaren Verbindungen untersucht.

Sowohl für Lehmputz als auch für die Scavenger Aktivkohle und Silikagel wurde dabei ein hohes Potenzial zur Innenraumluft-Qualitätsverbesserung identifiziert.

Increased concentrations of VOC (volatile organic compounds) and low molecular weight carbonyl compounds (e. g. formaldehyde), but also other emissions, such as ammonia, occur in indoor air at residential properties at specific times during use and are mostly construction, material or situation specific.

If the pure venting of these substances happens too slowly or if you want to influence it in a targeted manner, sorption materials can be used. For this purpose, the sorption behaviour of typical compounds that can be found in indoor air was investigated for clay plaster and for so-called scavenger materials.

A high potential for improving indoor air quality was identified for both clay plaster and for the scavengers activated carbon and silica gel.

**Abschottung von Schimmelschäden durch Bauteile – eine kritische Betrachtung**

51

**Indoor mold: a critical look on barrier properties of customary building components**

Dipl.-Chem. Jörg Thumulla, Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Carmen Krocze

Schimmelpilzwachstum in Innenräumen stellt ein potenzielles Gesundheitsrisiko für die Nutzer dar. In feuchtegeschädigten Innenräumen liegen eine Kombination gesundheitsbeeinflussender biogener Schadstoffe, darunter Schimmelpilzsporen, Hyphenfragmente, Stoffwechselprodukte (Mycotoxine, Endotoxine usw.), sowie eine erhöhte Präsenz von Insekten und Staubmilben vor. Darüber hinaus können Schimmelpilzmetabolite relevante Gerüche verursachen. Die Exposition über die Luft ist wahrscheinlich der bedeutendste Expositionsweg für biogene Schadstoffe.

Im Falle von Schimmelpilzschäden muss entschieden werden, ob eine Sanierung, eine Abschottung oder ein Rückbau erforderlich ist, um die Schimmelpilzbelastung zu beseitigen und das Gesundheitsrisiko zu verringern. Viele Baustoffe sind luft- und partikeldicht und lassen eine wirksame Abschottung gegenüber Schadstoffen, z. B. aus Schimmelschäden, vermuten. Die Tücke liegt jedoch im Detail der Anschlüsse einzelner Bauteile, um eine tatsächliche Dichtigkeit im schadstoffbelasteten Gebäudebestand zu erreichen.

In einem 2019 veröffentlichten Forschungsbericht des Aachener Instituts für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik wurden mittels Prüfkammertests bauübliche Bauteile wie z. B. Gipskartonwände oder Estrich-Randdämmstreifen auf Partikeldichtigkeit geprüft. Die Autoren des Forschungsberichtes kommen aufgrund ihrer Labor-Versuchsergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass in schimmelgeschädigten Gebäuden übliche Bauteile eine ausreichende Luft- und Partikeldichtigkeit aufweisen, um als Abschottung zu fungieren. Bezüglich der Dichtigkeit gegenüber gas- und partikelförmigen biogenen Schadstoffen hegen wir große Zweifel an der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Baupraxis.

In diesem Artikel geben wir daher einen kritischen Überblick über die Untersuchungsergebnisse dieses Forschungsberichtes und belegen mit Beispielen aus unserer Gutachterpraxis, dass die Ergebnisse der durchgeführten Prüfkammertests nicht von der Theorie auf die Praxis übertragbar sind und dass bauübliche Bauteile wie z. B. Gipskartonwände oder Estrich-Randdämmstreifen in der Praxis keine ausreichende Abschottungswirkung gegenüber Schimmelpilzen, ihren Gerüchen und Stoffwechselprodukten aufweisen.

Indoor mold growth is a potential health risk. In water-damaged indoor environments a combination of health-affecting factors is present including mold spores, hyphal fragments, metabolic products (mycotoxins, endotoxins etc.) as well as an increased presence of insects and dust mites. Additionally, mold metabolites can cause relevant odors. Airborne exposure is likely the most significant route of mold exposure in water-damaged indoor environments. In case of mold damage, one needs to decide whether remediation, sealing (masking) or restoration is required to prevent mold exposure and reduce the health risk of residents.

A report published in 2019 by the Aachen Institute for Research into Building damage and Applied building physics suggested that – based on test chamber tests – typical building components such as gypsum plasterboard walls or perimeter insulation strips are sufficiently tight against air and particles to act as a sealing in mold damaged buildings that prevents mold spores, hyphal fragments and bioaerosols etc. to reach the indoor air.

Although some building materials show airtightness as well as tightness against particles, we show in this work that the results of the chamber tests regarding particle density of building components cannot be adopted from theory to building practice. Additionally, we present practical examples that customary building materials and components do not have sufficient airtight barrier and sealing properties against mold, odors and bioaerosols.

Die Fachbeiträge stehen als Schriftenreihe Nr. 170 in der Online-Bibliothek des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene e.V. (WaBoLu) zur Verfügung: <https://wabolu.de/nr-170/> (Open Access).

# Sonderband

## WaBoLu-Innenraumtage 2020

---

**L**iebe Leserinnen und Leser,

leider konnten die für Mai 2020 angesetzten WaBoLu-Innenraumtage aufgrund der Covid-19-Pandemie nicht stattfinden. Es fiel uns als Organisationsteam vom Umweltbundesamt und auch dem veranstaltenden Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene e. V., vertreten durch Herrn Burkhard Klaus, äußerst schwer, diese seit 26 Jahren jährlich stattfindende Veranstaltung abzusagen, zumal uns wieder viele Zusagen für Vorträge erreicht haben und das Programm bereits bis ins Detail fertiggestellt war.

Als kleinen Ersatz und um die Wartezeit bis zur nächsten Tagung 2021 zu überbrücken, haben wir uns entschieden, in Zusammenarbeit mit der Schriftenreihe „Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft“ einen Sonderband mit einigen der geplanten Vortragsthemen zu veröffentlichen. Allen für 2020 vorgesehenen Referentinnen und Referenten wurde angeboten, ihr Thema in anspruchsvoller Form auszuarbeiten und für diesen Sonderband einzureichen. Die hier nun vorgestellten Artikel sind das Ergebnis dieses Prozesses. Die Themen reichen von Erfahrungsberichten im Bereich der Wohnmedizin über Messungen und Vermeidung von VOC bis zur Bewertung von Sanierungsmaßnahmen bei Schimmelschäden.

Wir hoffen, dass dieser Sonderband dazu beitragen kann, die Verbindung zwischen den Fachkolleginnen und Fachkollegen im anwendungsbezogenen Bereich der Innenraumforschung auch über dieses schwierige Jahr hinweg aufrechtzuerhalten.

Im Mai 2021 wird es in jedem Fall eine neue Auflage der WaBoLu-Innenraumtage als Plattform für den Wissens-

austausch geben. Auch dann möchten wir wieder anbieten, Vorträge der Innenraumtage als schriftliche Ausarbeitungen zu veröffentlichen. Dies soll die Arbeit auf den WaBoLu-Tagen in der Literatur verankern und auch helfen, neue Teilnehmerkreise für die Tagung zu gewinnen. Daher würden wir uns über Ihre Teilnahme an den WaBoLu-Innenraumtagen im nächsten Jahr (10. bis 12. Mai 2021) sehr freuen, egal, ob es eine Präsenz-, Online- oder Hybridveranstaltung werden wird.

Das Organisationsteam des UBA  
Wolfram Birmili, Anja Daniels, Ana Maria Scutaru  
Fachgebiet II 1.3 „Innenraumhygiene“ im Umweltbundesamt



---

Kontaktdaten:  
Dr. Wolfram Birmili  
Fachgebiet II 1.3, Innenraumhygiene,  
gesundheitsbezogene Umweltbelastungen  
Umweltbundesamt  
Corrensplatz 1  
14195 Berlin  
E-Mail: wolfram.birmili@uba.de  
Tel.: (030) 8903-1306

---

# **10 Jahre Wahlpflichtfach Wohnmedizin an der Hochschule – Erfahrungen und Ergebnisse**

**10 years of elective subject “Indoor environmental medicine”  
at the university – experiences and results**

---

Der Beitrag zeigt die Entwicklung des Wahlpflichtfaches Wohnmedizin im Bereich der Detmolder Schule (Hochschule für Architektur, Innenarchitektur und Stadtplanung, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe [TH OWL]) auf. Da dieses Fach bisher nur an einer Hochschule in Deutschland gelehrt wird, soll das Interesse an einer weiteren Verbreitung geweckt werden. Das Wahlpflichtfach Wohnmedizin wird seit 2010 gelehrt. Bis Ende des Sommersemesters 2020 haben 1.217 Studierende ihr Studium im Bachelorstudiengang sowie 231 Studierende im Masterstudiengang abgeschlossen. Das Fach wird im Bachelor- sowie im Masterstudiengang jeweils mit 4 Wochenstunden (Vorlesung und Praktikum) gelehrt. Bei bestandener Klausur werden 4 Credit Points angerechnet.

The article shows the development of the elective subject “Indoor environmental medicine” in the area of the School Detmold (University of Architecture, Interior Design and Urban Planning, Technical University – East Westphalia). Since this subject has so far only been taught at one university in Germany, interest in further spread shall be aroused. The elective subject “Indoor environmental medicine” has been taught since 2010. By the end of the 2020 summer semester, 1.217 students had completed their bachelor’s degree and 231 students had completed their master’s degree. The subject is taught 4 hours a week in the bachelor’s degree, (lectures and internship) and in the master’s degree. If the test is passed, 4 credit points are awarded.

■ PROF. DR. MED. M. PILGRAMM  
Lehrgebiet Wohnmedizin Fachbereich I, TH OWL, Detmold/Lemgo, manfred.pilgramm@th-owl.de

**W**arum ist die Lehre der Wohnmedizin wichtig? Seit Anfang 1987 bin ich als Hals-Nasen-Ohren- (HNO-) Arzt tätig, seit 1993 in leitender Position. Schwerpunkte

unserer HNO-Praxis und -Klinik (mit 52 Mitarbeitenden) sind Operationen im HNO-ärztlichen Fachbereich. Pro Jahr werden etwa 2.000 Operationen durchgeführt. Der

Einrichtung geht es gut, sie wächst von Jahr zu Jahr. Alle Mitarbeitenden sind durchweg zufrieden und die Kündigungsrate ist sehr niedrig.

Seit etwa 2005 befindet sich jedoch in einem Gewissenskonflikt. In dieser Zeit wurde mir bewusst und teilweise durch unsere Patienten bzw. deren Eltern vor Augen geführt, dass wir recht häufig bestimmte Rezidivoperationen (mehrrechte Operationen an gleicher Stelle, z. B. Nasen- und Nasennebenhöhlen) mit nur sehr mäßigem Erfolg durchführen. Das half zwar dem Umsatz der Einrichtung, führte aber nicht selten zu frustrierten Patienten.

Zwei Beispiele:

- Rezidivierendes Nasenbluten bei Kindern (Gefäße im Bereich des Locus Kiesselbachii beidseits): Immer wieder durchgeführte Koagulationen oder Laserbehandlungen hatten häufig nicht den gewünschten Erfolg.
- Rezidivierende polypöse Veränderungen in der Nase und den Nasennebenhöhlen: Mikrochirurgische Rezidivoperationen sind nicht selten erfolglos.

Durch die Eltern der kleinen Patienten (Nasenbluten) sowie durch die Patienten selbst (Nasenpolypen) wurde ich darauf aufmerksam gemacht, dass ein längerer Klimawechsel (z. B. Nordsee) sich sehr positiv auf das Rezidivverhalten auswirkt. Zur gleichen Zeit wurde von der Ärztekammer Westfalen-Lippe die curriculare Fortbildung Umweltmedizin angeboten, die ich mit einem Praktikum (Begleitung eines Baubiologen) absolvierte. Dieses 40-stündige Praktikum bestand aus Besichtigungen von Innenräumen mit unterschiedlichen Anforderungen (Wohnungen, Hallen und Großgebäuden) sowie der Mitarbeit bei den durchzuführenden Befragungen und Messungen.

Im Rahmen dieses Praktikums traf ich in stark verrauchten und verpilzten Wohnungen zufälligerweise Patienten an, die ich schon mehrfach operiert hatte. Dabei handelte es sich meist um „rauchende“ Familien mit Kleinkindern, die von immer wieder auftretenden Blutungen aus der Nase (chronische Entzündung der Nasenschleimhaut) berichteten, sowie Erwachsene mit kontinuierlich auftretender Polypenbildung in Nase und Nasennebenhöhlen (chronische Pansinusitis).



**Abb. 1:** Einzimmerwohnung eines mehrfach an den Nasennebenhöhlen operierten Patienten; starke Verpilzung der Wände, hauptsächlich bedingt durch ausbleibende Lüftung

Abb. 1 zeigt die Einzimmerwohnung eines mehrfach an den Nasennebenhöhlen operierten Patienten mit sichtbarer, ausgeprägter Verpilzung in der Nähe des Bettes.

Spätestens zu diesem Zeitpunkt wurde mir ein möglicher Zusammenhang zwischen der Innenraumlufthygiene und gesundheitlichen Beschwerden bewusst.

Daraufhin wurde das Therapiemanagement bei den genannten Erkrankungen umgestellt. Bei allen in Frage kommenden Patienten bzw. deren Eltern wurde eine wohnmedizinische Anamnese erhoben und die Patienten eingehend aufgeklärt. Ihnen wurde geraten, das Rauchen zuhause einzustellen, und es wurde ihnen eine Lüftungsanweisung für die Wohnräume übergeben (z. B. 3-mal täglich Stoßlüften für 10 Minuten). Darüber hinaus wurde aufgrund der nun ausführlichen Anamnese ein Allergietest auf mögliche positive allergische Reaktionen durchgeführt. Dadurch sanken die Operationszahlen kurzfristig, die Patienten wa-



**Abb. 2:** Detmolder Schule (Foto: TH OWL – Schelpmeier)

ren zufriedener als zuvor, was letztendlich mittelfristig zu einer weiteren Zunahme des Patientendurchsatzes führte. Viel höher als erwartet war in den allermeisten Fällen die Dankbarkeit der angesprochenen Patienten. Nicht nur, dass der geplante operative Eingriff verhindert werden konnte, sondern auch, dass ihnen wohl zum ersten Mal etwas über ein gesundes Wohnmanagement nahegebracht wurde.

Über meine positiven Erfahrungen berichtete ich auf mehreren regionalen Symposien, so dass ich von der TH OWL angesprochen wurde: „Wer Umweltmedizin praktiziert, kann auch Wohnmedizin lehren!?” (Prof. Dipl. Ing. Ernst Thevis, Detmold)

## Studiengang Wohnmedizin

Im Wintersemester 2010/11 begann ich mit der Übernahme des Lehrgebietes Wohnmedizin.

Ziel dieses Wahlpflichtfaches ist es, den interessierten Studierenden ein Gefühl dafür zu geben, warum immer häufiger Bewohner von Wohnungen und Häusern über

Kopfschmerzen, Druckgefühl im Bereich des Kopfes, Augentränen, entzündliche Veränderungen im Nasen- und Rachenbereich, anhaltendes Husteln sowie Schwindelsymptome klagen. Die Studierenden sollen unter anderem Möglichkeiten erlernen, um eine beratende Funktion bei Umzug und Neubau einnehmen zu können. Darüber hinaus sollen sie mit der Fähigkeit ausgestattet werden, wohnmedizinische Probleme von psychischen Problemen unterscheiden zu können.

## Voraussetzungen

Die Lehre findet im Fachbereich I der TH OWL (Architektur, Innenarchitektur, Stadtplanung) statt (siehe Abb. 2).

Das Fach Wohnmedizin wird als Wahlpflichtfach ab dem 2./3. Fachsemester mit 4 Wochenstunden im Bachelorbereich und ab dem 2. Fachsemester mit 4 Wochenstunden im Masterbereich angeboten. Die vorhandene wohnmedizinische Literatur (Wohnmedizin und Bauhygiene der letzten 48 Jahre (Fiedler et al., 1962 bis 2010) sowie die einführenden Werke von Fiedler und Mitarbeitern (Fiedler, 1997)) sind zügig bewältigt. Dabei zeigte sich, dass eine

sinnvolle und nachhaltige Lehre nur in Kooperation mit einem Bausachverständigen bzw. Baubiologen möglich ist.

Der Baubiologe hat die Aufgabe, die physikalischen und chemischen Problematiken zu erklären und gleichzeitig, eventuell auch praktisch, die notwendigen Messungen zu zeigen und durchzuführen.

Das jeweilige Semester wird in 16 Lehrtermine aufgeteilt, der 17. Termin dient zur Durchführung der Klausurprüfung (Multiple Choice (Pilgramm/Fiedler, 2013)). Mit Bestehen der Klausur ist das Wahlpflichtfach bestanden. Je nach Studiengang haben die Studierenden die Pflicht, mehrere Wahlpflichtfächer erfolgreich abzuschließen.

Im Wintersemester 2010/11 wurde mit dem Bachelorstudiengang begonnen, im Wintersemester 2013/14 kam der Masterstudiengang dazu. Diese Erweiterung des Angebotes geschah auf Vorschlag vieler Studierenden, die sich weiterhin hauptsächlich praktisch mit der Materie Wohnmedizin beschäftigen wollten.

Sehr schnell kann eine „Philosophie“ für das neue Angebot gefunden werden: „Die Medizin kann immer mehr Krankheiten erkennen und heilen, Architektur und Innenarchitektur können immer mehr Krankheiten verhindern“ (Pilgramm, 2012, S. 39).

Ziel ist es, in den Vorlesungen die althergebrachte Meinung zu diskutieren: „Geht es einem in einer Wohnung schlecht, so sind in der Regel die Psyche oder die Pilze schuld daran.“

Befragt man Studierende vor Beginn des Wahlpflichtfaches Wohnmedizin bezüglich ihres Wissens zur Wohnmedizin, so bekommt man in der Regel die oben dargestellte Antwort. Doch die im Verlauf des Semesters gelehrt Lerninhalte und die geführten Diskussionen mit den Studierenden zeigen, dass die Wohnmedizin aus weit mehr als der Psyche und Pilzen besteht.

Die Studierenden geben sehr gute Beurteilungen über alle Semester für dieses Fach ab (Bewertungen in Durchschnitt 1,2).

Bevor ich den Vertrag mit der Hochschule abschließend gezeichnet habe, war es mir wichtig, neben der vorhandenen Fachliteratur das allgemein verständliche Werk von Fiedler „Alles über gesundes Wohnen“ zu studieren bzw. Prof. Fiedler zu einem eingehenden Gespräch in Berlin zu

besuchen (Fiedler, 1997). Prof. Fiedler zählt zu den Lichtfiguren der Wohnmedizin in Europa, sein Wissen in diesem Fach ist nahezu vollständig und seine Unterstützung in den ersten Semestern war äußerst wertvoll. Erst durch sein Wohlwollen entschloss ich mich, das Wahlpflichtfach zu übernehmen.

### Entwicklung der Studierendenzahlen

Im Fachbereich I der Hochschule steht den Studierenden eine Vielzahl von Wahlpflichtfächern zur Verfügung, von denen nur eine begrenzte Zahl besucht werden muss.

Somit gibt die Dekanatsleitung eine Teilnehmerzahl von 20 Studierenden pro Semester vor, überlässt es aber den Lehrenden, bei größerem Interesse eine höhere Studierendenzahl zuzulassen.

Das Wintersemester 2010/11 begann mit 17 Studierenden, das Wintersemester 2019/20 bereits mit 84 Studierenden. Die durchschnittliche Studierendenzahl lag in diesen Jahren bei 61. Die Zusammensetzung der Teilgebiete ist nahezu identisch: 60 % Innenarchitektur, 20 % Architektur, 20 % Stadtplanung. Ebenso verhält sich in etwa die Verteilung der Geschlechter: 85 bis 90 % weiblich, 10 bis 15 % nicht weiblich.

Im Studienfach Innenarchitektur ist die Mehrzahl der Studierenden weiblich, was größtenteils die hohe „Frauenquote“ im Wahlpflichtfach Wohnmedizin erklären kann. Im Gegensatz zu fast allen anderen Fächern, in denen man konstruieren, strukturieren und organisieren muss, lernt man im Fach Wohnmedizin Sachverhalte, die nicht nur mit Architektur und Innenarchitektur in Beziehung stehen.

Befragt man Studierende vor Beginn des Wahlpflichtfaches Wohnmedizin über ihre Berufsziele, die sie vor Beginn des Studiums hatten, so erklären über 35 %, dass sie eigentlich Medizin studieren wollten, dies aber aufgrund von Numerus-clausus-Problemen und eventueller Praktika („Ich kann kein Blut sehen!“) nicht umgesetzt haben.

80 % der Studierenden bestehen die Abschlussklausur mit einer über die Jahre ermittelten Durchschnittsnote von 2,3 (Benotungsmöglichkeiten 1,0 bis 4,0). Etwa 10 % der Studierenden beenden das Wahlpflichtfach vorzeitig

und etwa 10 % bestehen die Abschlussklausur nicht (Pilgramm, Fragensammlung von 2010 bis 2018).

### Semesteraufteilung

Von Anfang an war es mein Ziel, zum einen möglichst viele Gastdozenten und Dozentinnen im Rahmen ihres Spezialgebietes zu gewinnen, zum anderen mindestens eine neue Vorlesung pro Semester im jeweiligen Austausch anzubieten. Die Auswahl der Gastdozenten und -dozentinnen erfolgte aufgrund von Vorträgen auf Symposien und Kongressen sowie durch persönliche Bewerbung von Dozenten und Dozentinnen zu ihrem Spezialgebiet. Tabelle 1 zeigt den Vorlesungsbetrieb des Wintersemesters 2012/13 (Pilgramm et al., Vorlesungssammlung 2012 bis 2020).

Folgende Themen wurden in den Vorlesungen danach ergänzt:

- a) Wohnen und Gerüche,
- b) Wohnen mit Haustieren,
- c) Erste Hilfe zuhause,
- d) Wohnmedizinisch und baubiologisch gerechter Umbau eines Hauses,
- e) Interessante Fälle aus der Wohnmedizin,
- f) Wohngifte aus baubiologischer und wohnmedizinischer Sicht,
- g) Wohnmedizinische Aspekte in Altenheimen,
- h) Nanotechnologie – unsere Zukunft?,
- i) Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung,
- j) Flüchtige organische Veränderungen in der Raumluft,
- k) Aufgaben und Möglichkeiten eines Institutes für Innenraumtoxikologie,
- l) Wohnmedizinische Forschung: der Naphthalin-Geruchstest,
- m) Die Wohnung als Stressor,
- n) Die Detmolder Riechstudie,
- o) Das kranke Haus,
- p) Wohnmedizinische Symposien (1. bis 9.),
- q) Juristische Aufarbeitung von wohnmedizinischen Problemen (Pilgramm et al., Vorlesungssammlung 2012 bis 2020).

**Tabelle 1:** Vorlesungsreihe mit Gästen im Wintersemester 2012/13

Termin	Thema	Dozent/ Gastdozent
1	Wohnmedizin – was ist das?	Pilgramm/Detmold
2	Umweltbezogene Gesundheitsstörungen	Pilgramm/Detmold
3	Tagesablauf in einer wohnmedizinischen Ambulanz	Schütz/Freiburg
4	Wohnmedizin – was ist das?	Pilgramm/Detmold; Fiedler/Berlin
5	Wohnmedizinische Prophylaxe vor unserer Zeit (Exkursion)	Michels/Detmold
6	Wohnen, Hören, Schallschutz	Pilgramm/Detmold
7	Flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft	Hurrass / damals Freiburg
8	Wohnmedizinische Diagnostik für jedermann – die wohnmedizinische Checkliste	Pilgramm/Detmold
9	Wohnmedizinische Diagnostik für jedermann, Teil 2 – Das Umweltmobil	Jockel/Detmold
10	Pilze	Jockel/Detmold
11	Elektrosmog – eine kritische Auseinandersetzung	Jockel/Detmold
12	Erdstrahlen und Rutengehen – eine kritische Auseinandersetzung	Jockel/Detmold
13	Praktische Übungen, z. B. VOCs in Kosmetika	Pilgramm/Detmold; Jockel/Detmold
14	Sick building syndrome, building related illness	Pilgramm/Detmold
15	Architekt und Wohnung – Wohnpychologie	Pilgramm/Detmold
16	Zusammenfassung der Semesterinhalte	Pilgramm/Detmold
17	Klausur	Pilgramm/NN

VOC Volatile Organic Compounds

Die Erarbeitung der neugeschaffenen Vorlesungen erfolgte ausschließlich auf Vorschlag der Studierenden.

Seit dem Wintersemester 2011/12 wird jährlich ein Wohnmedizinisches Symposium am 2. Novemberwochenende durchgeführt (siehe Tabelle 2). Es handelt sich hier um eine Veranstaltung der TH OWL für Studierende, Architekten, Innenarchitekten, Stadtplaner, Baubiologen, Sachverständige, Designer, Juristen, Pädagogen und Journalisten sowie am Thema interessierte Wissenschaftler und Bürger. Seit 3 Jahren werden durch die Teilnehmenden des Symposiums im Rahmen eines kumulativen Moduls die Vortragsthemen für das Folgejahr ausgewählt.

<b>Tabelle 2:</b> Wohnmedizinische Symposien 2011 bis 2020	
<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>
<b>2011</b>	Gesunde Architektur
<b>2012</b>	Interdisziplinäre Wohnmedizin in der Praxis
<b>2013</b>	Wohnmedizin und ihre Grenzen?!
<b>2014</b>	Fortschritte in der Wohnmedizin
<b>2015</b>	Wohnmedizin im Innenraum
<b>2016</b>	Forschung in der Wohnmedizin – Gegenwart und Zukunft
<b>2017</b>	Holz als Baustoff in der Wohnmedizin
<b>2018</b>	Gesunde Baustoffe
<b>2019</b>	Neues aus der Wohnmedizin
<b>2020</b>	10 Jahre Wohnmedizinisches Symposium – was hat sich in dieser Zeit wohnmedizinisch verändert?

Die interdisziplinäre Teilnehmerzahl ist steigend (im Jahr 2019: 164 Teilnehmende) (Pilgramm, Wohnmedizinische Symposien 2011 bis 2019).

### Bachelorarbeiten

Alle Studierenden im Bachelorstudiengang müssen zum Abschluss ihres Bachelorstudiums eine Arbeit vorlegen. Für diese Arbeit können sie sich einen Betreuenden wählen, welcher Professor oder Professorin an der Hochschule sein muss. Die Betreuenden können Themen vorschlagen

oder ein Thema zusammen mit dem oder der Studierenden erarbeiten. Die Bearbeitungsdauer bis zum Abschluss sollte ein Semester nicht übersteigen. Jede Arbeit muss von 2 Referenten (Professor und Co-Referent) beurteilt werden. Als Co-Referenten, die auch intensiv an der Betreuung beteiligt sind, können Bausachverständige, Baubiologen sowie auch qualifizierte Mitarbeiter von Fachinstituten tätig sein.

Folgende Themen wurden als Erst- bzw. Zweitprüfer begleitet:

- Ausbau und Einrichtung einer Krankenhausstation,
- Erarbeitung einer wohnmedizinischen Checkliste (mehrere Arbeiten) (Mix et al., 2017; Checkliste für gesundes Wohnen, 2020),
- Umbau eines Hauses nach wohnmedizinischen Gesichtspunkten,
- Giftstoffsuche beim Hausumbau,
- Das gesunde Hotelzimmer,
- Veränderung der Farbführung auf einer psychiatrischen Station,
- Gesundes Wohnen, Besonderheiten beim Neubau.

### Masterstudiengang

Vom Wintersemester 2013/14 bis zum Wintersemester 2016/17 wurde das Wahlpflichtfach Wohnmedizin für Fortgeschrittene im Masterstudiengang angeboten. Die Teilnehmerzahl schwankte zwischen 14 und 26 Teilnehmenden. Zu jedem Semester musste ein spezielles Thema nach theoretischer Einleitung und Hinführung in Gruppen (meist 4 Studierende) bewältigt werden. Die jeweiligen Bewertungen erfolgten nach schriftlicher und mündlicher Präsentation.

Folgende Themen standen zur Auswahl:

- Wohnmedizinische und baubiologische Untersuchungen eines Hotels,
- Wohnmedizinische und baubiologische Untersuchung von Kindergärten,
- Wohnmedizinische und baubiologische Untersuchung von Altenheimen,

- Wohnmedizinische und baubiologische Untersuchungen von Gaststätten,
- Wohnmedizinische und baubiologische Untersuchung von Altbauten.

Folgende Masterarbeiten wurden als Erstprüfer begleitet:

- Ökologisches Bauen,
- Architektur und Medizin,
- Checkliste gesundes Wohnen,
- Holz und seine Wirkung auf das Herz-Kreislauf-System.

Für die Masterarbeit zählt Ähnliches wie für die Bachelorarbeit. Die Arbeit sollte jedoch einen experimentellen Charakter haben. Im Gegensatz zur Bachelorarbeit kann sich die Erarbeitung der Masterarbeit über mehr als ein Semester hinziehen.

## Erfolge

Die folgenden Tatsachen freuen mich sehr und sind mit ein Grund dafür, dass ich nach Vollendung des 65. Lebensjahres die Tätigkeit weiterführen werde (Erlaubnis erteilt):

- Die Studierendenzahl nimmt auch noch nach 10 Jahren zu.
- Die Vortragasanfragen in wissenschaftlichen und halbwissenschaftlichen Bereichen nehmen zu (Pilgramm/Fiedler, 2013; Fiedler et al., 2018).
- Die Symposien werden immer besser besucht, Sponsoren melden sich teilweise selbstständig.
- Die positiven Rückmeldungen von Alumni bezüglich des Einsatzes von wohnmedizinischen Ideen bei ihren beruflichen Tätigkeiten nehmen zu.

In immer mehr großen Architekturbüros (auch international) gibt es Unterabteilungen Wohngesundheit. Viele Aufträge haben inzwischen schon bei der Bewerbung den Gesundheitsaspekt integriert und somit – laut Alumni – viel bessere Chancen bei der Auftragsvergabe.

## Misserfolge, Kritikpunkte oder mögliche Schwachstellen

An folgenden Tatsachen sollte weiter gearbeitet werden:

- Das Fach unterscheidet sich von den typischen Lehrvorlagen der Architektur und Innenarchitektur sehr, zumal die bekannten Fächer den Gesundheitsaspekt ausklammern, der jedoch immer mehr an Interesse bei den Studierenden gewinnt. Die Beliebtheit des Faches stößt daher manchmal auf Kritik in der Kollegenschaft, hauptsächlich wegen des häufig hohen Andrangs der Studierenden zum Fach selbst und auch zur Präsentation des Faches z. B. am Tag der offenen Tür der Hochschule.
- Architektur und Innenarchitektur verkörpern meist etwas Schönes und Sauberes. Die Wohnmedizin zeigt manchmal etwas Hässliches und Krankmachendes auf, was von manchem in diesem Sinne nicht verstanden wird.
- Die Kritik der HNO-ärztlichen Kollegen: „Schuster, bleib bei deinen Leisten.“ ist durchaus hörbar, es bestehen häufig Zweifel, ob 2 Fächer erfolgreich bewältigt werden können.
- Das Wahlpflichtfach Wohnmedizin wird – nach meiner Information – bisher nur an einer bundesdeutschen Hochschule angeboten.
- Die Nachfolge ist aufgrund der momentan bestehenden Voraussetzungen nicht gesichert.

## Wie könnte die Zukunft aussehen?

Für die weitere erfolgreiche Fortführung des Faches sollten folgende Punkte Beachtung finden:

- Zum einen sollte das Fach Wohnmedizin weiter in den Lehrbetrieb integriert werden, z. B. durch ein größeres Angebot von spezifischen Praktika und Exkursionen.
- Auch sollten die Inhalte verstärkt in große Architekturbüros integriert werden. Dies ist inzwischen erfolgreich begonnen worden, kann jedoch noch stark ausgeweitet werden.

- Darüber hinaus ist es wichtig, das Fach in wissenschaftlichen und gutachterlichen Fragestellungen stärker zu berücksichtigen. Von großem Vorteil wäre hierbei, wenn die vielen Sachverständigengutachter von Architekten oder Innenarchitekten mit wohnmedizinischer Erfahrung unterstützt werden könnten.
- Aufgrund des großen Andrangs der Studierenden wird es in der Zukunft notwendig werden, das Fach Wohnmedizin als Hauptfach in der Ausbildung anzubieten.

### Persönliche Schlussbemerkung

Von 8 bis 10 Wochenstunden (Vorlesungen, Exkursionen, Betreuungen, Symposiumvorbereitungen) im Semester kann man nicht leben. Hat man allerdings eine z. B. ärztliche oder andere Haupttätigkeit (selbstständig oder angestellt), so ist diese Zeit im Umgang mit jungen Leuten sehr bereichernd und genau das Richtige für den häufig problematischen Routinealltag. Das positive Feedback vieler Studierenden ist für mich genauso beglückend wie die Zufriedenheit erfolgreich operierter Patienten.

Neben dem Fach Wohnmedizin gilt inzwischen Ähnliches für das neue Wahlpflichtfach Bauhygiene (Blei, Vorlesung im Wahlpflichtfach Bauhygiene und Innenraumtoxikologie).

### Literaturverzeichnis

- M. Blei: Vorlesung im Wahlpflichtfach Bauhygiene und Innenraumtoxikologie [online]. Internet: [www.th-owl.de/studium/wohnmedizin/bauhygiene/blei](http://www.th-owl.de/studium/wohnmedizin/bauhygiene/blei) [Zugriff: 03.11.2020]
- Checkliste für gesundes Wohnen [online]. TH OWL, Detmolder Schule für Architektur und Innenarchitektur. Internet: [www.checkliste-gesundeswohnen.de](http://www.checkliste-gesundeswohnen.de) [Zugriff: 20.10.2020]
- K. Fiedler: Alles über gesundes Wohnen – Wohnmedizin im Alltag. CH Beck-Verlag München (1997)
- K. Fiedler et al.: Zeitschrift für Wohnmedizin und Bauhygiene (1962 bis 2010). Gesellschaft für Wohnmedizin Jena
- K. Fiedler, M. Pilgramm, M. Blei: Wohnmedizin und Innenraumhygiene. ZAEN Magazin 10 (2018) Nr. 2, S. 35–39
- E. Mix, J. Kirch, K. Hermann, T. Jockel, M. Pilgramm: Entwicklung einer Checkliste für gesundes Wohnen. Wohnmedizin 55 (2017) Nr.1, S. 5–12
- M. Pilgramm: Vorlesung Wohnmedizin – Ein Erfahrungsbericht. Wohnmedizin 50 (2012) Nr. 2, S. 38–41
- M. Pilgramm, K. Fiedler: Können Häuser heilen – Baustoffjahrbuch 2013/14. 11. Ausgabe. Verlagshaus Wohlfahrt GmbH Duisburg (2013)
- M. Pilgramm: Wohnmedizin – Bachelor. Fragensammlung von 2010 bis 2018 mit richtigen Antworten [online]. TH OWL, Detmolder Schule für Architektur und Innenarchitektur. Internet: [https://www.th-owl.de/files/webs/gestaltung/\\_migrated/content\\_uploads/Klausurfragen\\_BA\\_-\\_Gesamtzusammenstellung.pdf](https://www.th-owl.de/files/webs/gestaltung/_migrated/content_uploads/Klausurfragen_BA_-_Gesamtzusammenstellung.pdf) [Zugriff: 20.10.2020]
- M. Pilgramm. Wohnmedizinische Symposien an der TH OWL 2011 bis 2019 [Stick auf Anforderung]
- M. Pilgramm u.a.: Vorlesungssammlung Wohnmedizin 2012 bis 2020 (30 Vorlesungen zum Thema) [Stick auf Anforderung]

# Raumluftbelastung durch aliphatische Kohlenwasserstoffe: Fallbeispiel Schule

**Indoor air contamination by aliphatic hydrocarbons:  
a case study of classrooms**

---

Raumluftmessungen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) in 2 Klassenräumen einer Schule ergaben in beiden Fällen eine Überschreitung des vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) angegebenen, toxikologisch abgeleiteten Richtwert I von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Summe an Alkanen, Isoalkanen und Cycloalkanen ( $\text{C}_9$  bis  $\text{C}_{14}$ ). Zum Auffinden der Raumluftbelastungsquelle sollten jedoch neben Untersuchungen der vorhandenen Bausubstanz auch alternative Quellen mit einbezogen werden.

Indoor air measurements for volatile organic compounds (VOC) were carried out in two classrooms of a school. It was found that in both cases the toxicologically derived guideline value I of  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for the sum of alkanes, isoalkanes and cycloalkanes ( $\text{C}9$  to  $\text{C}14$ ) given by the German Committee on Indoor Guide Values (AIR) was exceeded. To find the source of indoor air pollution, alternative sources should be included in addition to investigations of the existing building fabric.

■ MSC. FLORIAN WEESE  
ALAB GmbH Analyselabor in Berlin; Sachverständiger für Innenraumschadstoffe

**A**lkane – auch gesättigte Kohlenwasserstoffe genannt – sind chemisch recht stabile Chemikalien und werden in der Regel als Substanzgemische (aromatenearme Kohlenwasserstoffgemische unter Produktnamen wie Testbenzin, „White Spirit“, Naptha usw.) eingesetzt. Zur Gruppe der Alkane gehören die n-Alkane, die Isoaliphäten

(Isoalkane, i-Alkane) und die Cycloalkane. Alkane sind wesentliche Bestandteile der als Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bezeichneten Fraktionen des Erdöls. Die einzelnen Fraktionen unterschiedlicher Flüchtigkeit sind als Benzine, Kerosine, Dieselöle, Heizöle, Schmieröle, Paraffine und Ceresin im Handel.

## Alkane: Vorkommen und Eigenschaften

Beim Gebäuderück- oder -umbau ist vor allem im Bereich von Werkstätten, Hydraulikanlagen, Maschinenstandorten (Pressen, Drehbänke, Fräsmaschinen usw.) auf Verunreinigungen der Bausubstanz u. a. mit MKW zu achten (BayLfU, 2004). In den relativ schwer flüchtigen Erdölfaktionen wie Heizöl oder Dieselkraftstoff sind neben den geradkettigen Alkanen auch charakteristische verzweigte Alkane enthalten. Diese mikrobiell schwer abbaubaren Alkane werden daher als Indikatoren für Mineralölaltlasten verwendet. Anhand des Alkan-Belastungsprofils in der Raumluft können Hinweise auf MKW wie Dieselkraftstoff oder Heizöl als Quelle einer Belastung mit Alkanen ermittelt werden.

Alkangemische sind gut fettlöslich bzw. fettlösend mit einer geringen Wasserlöslichkeit und einem kaum wahrnehmbaren Geruch. Sie werden u. a. als Lösungsmittel in Farben, Lacken und anderen Beschichtungsmitteln, zur Extraktion und zum Entfetten, als Lösemittel in chemischen Reinigungen, in Auto-, Schuh- und Bodenpflegemitteln sowie in Möbelpolituren eingesetzt. Hexan, Cyclohexan, Oktan, Dekan und Dodekan sind die Namen einiger Einzelstoffe aus dieser Chemikalienfamilie. Petrol-ether, Siedegrenzenbenzin und Testbenzin sind Sammelbezeichnungen für Gemische dieser Substanzen mit unterschiedlichen Siedepunkten. Dämpfe von Alkangemischen reizen die Schleimhäute, können zu Erbrechen führen und in sehr hohen Konzentrationen Lungenentzündung hervorrufen. Aufgrund ihrer Lipophilie können sie in höheren Konzentrationen narkotische und neurotoxische Wirkungen im zentralen und peripheren Nervensystem hervorrufen. In der Raumluft sind sie häufig nachweisbar, meist in etwas geringeren Konzentrationen als die aromatischen Lösemittel. Langkettige Alkane sind Bestandteile von Erdöl bzw. Heizölen.

## Bewertung

Für Innenraumschadstoffe gibt es bislang mit wenigen Ausnahmen keine gesetzlich festgelegten Grenzwerte. Es existieren aber Bewertungskonzepte verschiedener Institutionen, die sich in 2 Gruppen unterteilen lassen:

- toxikologisch abgeleitete Bewertungskonzepte,
- statistisch abgeleitete Bewertungskonzepte.

Bei der toxikologischen Ableitung von Richtwerten geht man meist von Experimenten aus, bei denen Versuchstiere verschiedenen hohen Konzentrationen eines einzelnen Schadstoffes ausgesetzt wurden. Mit Hilfe dieser Versuche wird eine Dosis ermittelt, bei der im Tierversuch keine erkennbaren Gesundheitsschäden wie Organveränderungen oder Stoffwechselstörungen mehr auftreten. Aus den Ergebnissen des Tierversuchs werden dann mit Hilfe sogenannter Unsicherheitsfaktoren Richtwerte für den Menschen berechnet. Für eine Auswahl an Alkanen gibt der AIR, vormals Ad-hoc Arbeitsgruppe, die in Tabelle 1 aufgeführten Richtwert- (RW-)I- und RW-II-Werte an.

**Tabelle 1:** Im Jahr 2005 festgelegte Richtwerte für eine Auswahl an Alkanen

Verbindung	RW I in mg/m <sup>3</sup>	RW II in mg/m <sup>3</sup>
<b>C<sub>9</sub>- bis C<sub>14</sub>-Alkane / Isoalkane (aromatenarm)</b>	0,20	2,00

Die von der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e. V. angegebenen AGÖF-Normalwerte (ANW) und AGÖF-Orientierungswerte (AOW) stellen eine Bewertungshilfe dar (AGÖF, 2013). Statistisch abgeleitete Orientierungswerte werden mit Hilfe der Ergebnisse einer Vielzahl möglichst repräsentativer Raumluftmessungen berechnet. Mit Hilfe statistischer Rechenverfahren werden aus diesen Daten für die einzelnen Schadstoffe Schadstoffbelastungen ermittelt, deren Überschreitung eine Auffälligkeit darstellt. In Tabelle 2 sind die ANW- und AOW-Werte für Alkane zusammengefasst.

**Tabelle 2:** ANW- und AOW-Werte für Alkane

Substanz	ANW in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	AOW in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>n-Hexan</b>	1,8	8,0
<b>n-Heptan</b>	2,0	9,0
<b>n-Octan</b>	1,0	5,0
<b>n-Nonan</b>	0,5	5,0
<b>n-Decan</b>	1,0	11,0
<b>n-Undecan</b>	2,0	14,0
<b>n-Dodecan</b>	1,0	9,0
<b>n-Tridecan</b>	1,0	5,0
<b>n-Tetradecan</b>	1,0	4,0
<b>n-Pentadecan</b>	1,0	3,0
<b>n-Hexadecan</b>	1,0	2,0
<b>n-Heptadecan</b>	0,5	2,0
<b>n-Octadecan</b>	0,5	1,0
<b>2-Methylpentan</b>	1,0	7,0
<b>3-Methylpentan</b>	1,0	4,0
<b>2-Methylhexan</b>	1,0	4,0
<b>3-Methylhexan</b>	1,0	6,3
<b>2,2,4-Trimethylpentan</b>	0,5	1,0
<b>2,2,4,6,6-Pentamethylheptan</b>	0,5	4,8
<b>2,2,4,6,8,8-Heptamethylnonan</b>	0,5	1,0
<b>Methylcyclopantan</b>	0,5	3,0
<b>Cyclohexan</b>	1,0	9,0
<b>Methylcyclohexan</b>	0,5	4,0

ANW Normalwerte der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V.  
AÖW Orientierungswerte der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V.

## Analytik

Die Raumluft- bzw. Luftprobenahmen erfolgten mit Hilfe von mit Tenax TA als Sorptionsmedium gefüllten Sammelförderchen. Für die Analyse mittels Gaschromatografie-Massenspektrometer (GC/MS) wurden die zu untersu-

chenden Substanzen von dem beladenen Tenaxrörchen thermisch desorbiert.

Sofern erhöhte Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen in der Raumluft vorhanden sind, kann es im Chromatogramm zum Auftreten sogenannter Kohlenwasserstoffberge kommen. Diese bestehen in der Regel aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen. Nach den Vorgaben des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT) werden die Flächen aller Peaks addiert und als Toluoläquivalent quantifiziert. Hierbei werden neben den n-Alkanen auch cyclische Kohlenwasserstoffe und andere Aliphäten mit erfasst. Abb. 1 zeigt ein Total Ion Chromatogramm (TIC) im Retentionszeitbereich von 15:00 bis 23:00 Minuten mit einem typischen Muster bei erhöhter Alkankonzentration in der Raumluft (DIBt, 2019).

## Fallbeispiel Schule

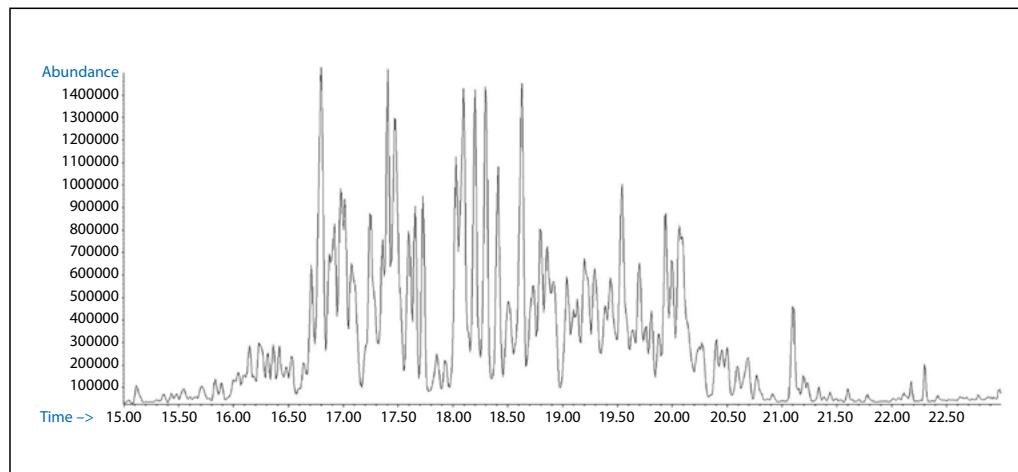
Alkangemische weisen häufig einen nur sehr gering wahrnehmbaren Geruch auf. So klagten in einer neu errichteten Schule mehrere Lehrer und Schüler vermehrt über Kopfschmerzen, obwohl in den betroffenen Räumen kein auffälliger Geruch wahrgenommen werden konnte.

### Angaben zum Gebäude

Das Gebäude wurde Mitte der 2010er-Jahre in Modulbauweise errichtet. Die Betongeschosdecken sind in den Klassenräumen mit Deckenplatten aus Mineralfaser abgehängt. Als Bodenbelag wurde Linoleum, als Wandbelag Glasfasertapete und teilweise Putz mit Dispersionsfarbe verwendet. Die Konvektionsheizkörper befinden sich unterhalb der verbauten Isolierglasfenster mit Gummilippenabdichtungen. Eine raumlufttechnische Anlage (RLT-Anlage) ist nicht vorhanden. Die Lüftung erfolgt ausschließlich über die Fenster.

### Raumluftmessungen

Die untersuchten Unterrichtsräume waren vor Beginn der Probenahmen für einen Zeitraum von mindestens 8 Stun-



**Abb. 1:** TIC (Retentionszeitbereich von 15:00 bis 23:00 Minuten) der Raumluft im Klassenraum A. Aufgetragen wurde die Signalintensität über der Retentionszeit.

den nicht gelüftet worden. Die Probenahmen wurden somit unter sogenannten Ausgleichsbedingungen durchgeführt. In der Raumluft des zum Zeitpunkt der Probenahme ungelüfteten Klassenraums A (EG) lag die Gesamtbelastung mit VOC (TVOC-Wert) mit  $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im oberen Konzentrationsbereich, in der Raumluft des Klassenraums B (1. OG) mit  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im unteren Konzentrationsbereich von  $> 300$  bis  $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , der von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe als hygienisch noch unbedenklich eingestuft ist.

Bei Anwendung der AÖW konnten im Klassenraum A statistisch auffällige Raumluftkonzentrationen für die Substanzen n-Undecan, 2,2,4,4,6,8,8-Heptamethylnonan, Cyclopentan und Methylcyclohexan festgestellt werden. Im Klassenraum B wurde lediglich n-Undecan als statistisch auffällig ermittelt. Als deutlicher Hinweis auf das Vorhandensein weiterer Iso- und Cycloalkane kann das Auftreten von sogenannten Kohlenwasserstoffbergen im TIC der beiden Klassenräume gewertet werden (siehe Abb. 1).

Mit  $586 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wurde der toxikologisch begründete RW I für die Summe der Alkane/Isoalkane/Cycloalkane ( $\text{C}_9$  bis  $\text{C}_{14}$ ) von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in dem Klassenraum A überschritten. Aufgrund der Überschreitung in dem ungelüfteten Raum um den Faktor 2,9 war mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei Einhaltung der Technischen Regel für Arbeitsstätten: Lüftung (ASR A3.6, 2012) mit einer Richtwertüberschreitung zu rechnen.

Bezüglich des Klassenraums B wurde der toxikologisch begründete RW I für die Summe der Alkane/Isoalkane/Cycloalkane ( $\text{C}_9$  bis  $\text{C}_{14}$ ) mit  $362 \mu\text{g}/\text{m}^3$  um den Faktor 1,8 überschritten.

Anhand der Raumluftmessungen konnte somit ein weiterführender Handlungsbedarf hinsichtlich des Auffindens der Raumluftbelastungsquelle mit Alkanen abgeleitet werden.

### Vergleichende Messungen mit dem Fotoionisationsdetektor

TVOC-Messungen (Isobutenäquivalent) mittels Fotoionisationsdetektor (PID) eignen sich vor allem für vergleichende Luftuntersuchungen, z. B. im Rahmen der Quellensuche. Der PID ist ein direktanzeigendes Messgerät, bei dem die Umgebungsluft von einer Pumpe durch eine Messkammer gesaugt und dort dem UV-Licht einer hochenergetischen Gasentladungslampe ausgesetzt wird. Befinden sich Substanzen in der Luft, die durch die UV-Strahlung ionisierbar sind, entsteht im elektrischen Feld der Messkammer ein Stromfluss, der verstärkt und auf dem Display des Gerätes als Luftkonzentration in einer Einheit von  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  angezeigt wird.

Der PID zeigte sowohl in den Klassenräumen A und B als auch auf den Fluren und in einigen Nebenräumen deutlich erhöhte Immissionen von VOC ( $\text{TVOC}_{\text{PID}}$ ) an. Die Werte lagen in einem Bereich von mehreren Tausend  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Weiterhin konnte an einigen Stellen im Gebäude durch unterschiedliche Belastung der Bodenplatte ein geringer Pumpeffekt des Fußbodens festgestellt werden (siehe Abb. 2). Eine nähere Eingrenzung der Raumluftbelastungsquelle konnte anhand der vergleichenden PID-Messungen jedoch nicht vorgenommen werden.

### Oberflächenemissionsprüfungen

Im Rahmen eines zweiten Ortstermins wurden Oberflächenemissionsprüfungen durchgeführt. Hierfür wurde eine Oberflächen-Emissionsprüfzelle verwendet. Es handelt sich um eine mobile Vorrichtung zur Bestimmung flüchtiger Verbindungen, die z. B. von Bauprodukten emittiert werden. Die Emissionsprüfzelle wird auf die zu prüfende Oberfläche aufgesetzt. Die Prüfzelle dichtet die zu untersuchende Oberfläche mit einer elastischen ringförmigen Dichtung gegen die Umgebungsluft ab. Hierüber soll eine Beeinflussung der Messwerte durch möglicherweise belastete Raumluft ausgeschlossen werden. Bei der Prüfung nicht ausreichend glatter Oberflächen (z. B. Glasfaser Tapete) wird die Prüfzelle zusätzlich mit einer emissionsgeprüften plastischen Dichtschnur abgedichtet. Bei der Prüfung an Deckenflächen wurde die Prüfzelle mit Hilfe eines Stativs fixiert. Die Emissionsprüfzelle weist einen Durchmesser von 150 mm (= 0,0177 m<sup>2</sup> Testoberfläche) bei einem Volumen von 35 cm<sup>3</sup> auf. Die Zelle wird mit 700 ml/min gereinigter Zuluft durchspült. Die Abluft der Zelle enthält die VOC, welche von der Testoberfläche abgegeben werden (siehe Abb. 3). Die Ergebnisse der Messungen mittels Oberflächen-Emissionsprüfzelle werden als flächenbezogene Emissionsrate in µg/(m<sup>2</sup>h) angegeben.

In einem ersten Schritt wurde die Oberflächen-Emissionsprüfzelle in Kombination mit dem PID verwendet, um direkt vor Ort Hinweise auf stark VOC emittierende Oberflächen zu erhalten. Für die Oberflächenemissionsprüfung wurde der Ansaugschlauch des PID mit der Abluftöffnung der Oberflächen-Emissionsprüfzelle über einen Teflonschlauch verbunden (siehe Abb. 4). Der mit dem PID gemessene TVOC<sub>PID</sub> ist nur bedingt vergleichbar mit dem mittels GC/MS ermittelten TVOC<sub>GC/MS</sub>, da der PID auf Einzelsubstanzen unterschiedlich empfindlich anspricht.



Abb. 2: PID-Messung zur Ermittlung des TVOC<sub>PID</sub>

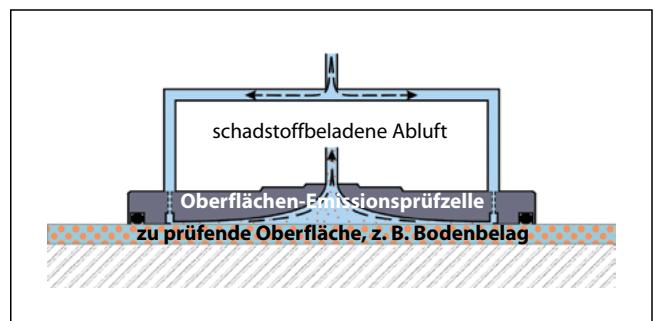


Abb. 3: Querschnitt durch eine Oberflächen-Emissionsprüfzelle

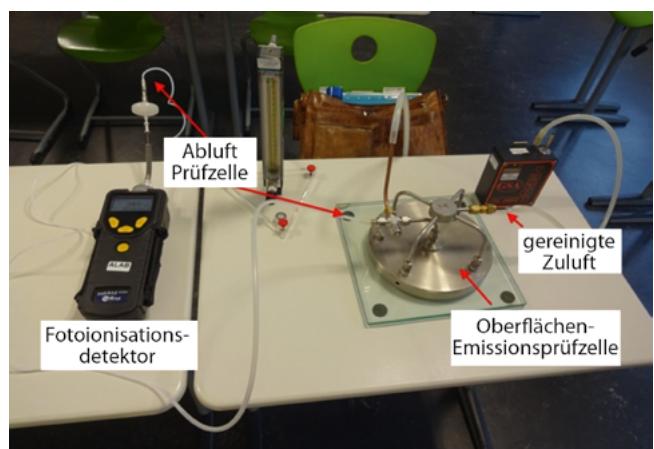


Abb. 4: Messanordnung Oberflächen-Emissionsprüfzelle / PID

Im zweiten Schritt wurden Oberflächenemissionsprüfungen auf VOC mit Hilfe von mit Tenax TA als Sorptionsmedium gefüllten Sammelrörchen durchgeführt.

Die Sammelrörchen wurden mit der Abluftöffnung der Oberflächen-Emissionsprüfzelle verbunden und mit 2 l Abluft beladen (siehe Abb. 5).

Für die Analyse mittels GC/MS wurden die zu untersuchenden Substanzen von dem beladenen Tenaxrörchen thermisch desorbiert. Die quantitative Analyse erfolgte mittels GC/MS.

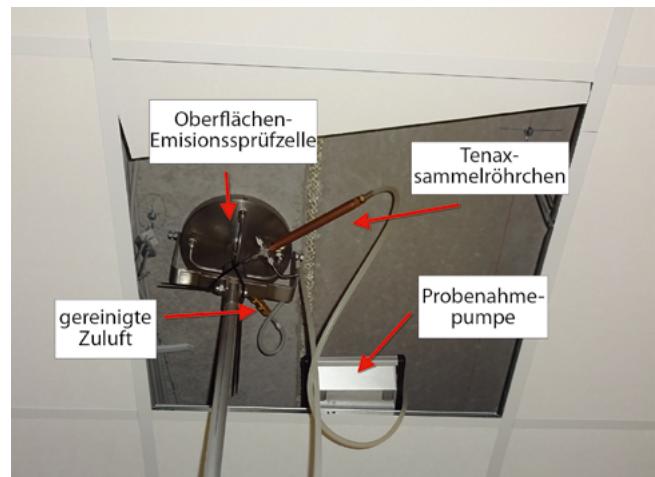
Die Ergebnisse der Oberflächenemissionsprüfungen für den Klassenraum A sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Es wurden insgesamt 6 verschiedene Messpunkte in dem Raum für die Oberflächenprüfungen gewählt, 3 an der Unterseite der Betondecke und jeweils ein Messpunkt an der Außen-, der Innenwand und dem Fußboden.

Auch die Ergebnisse der Oberflächenemissionsprüfungen erbrachten keine nähere Eingrenzung der Raumluftbelastungsquelle. Eine Sekundärkontamination der untersuchten Oberflächen konnte nicht ausgeschlossen werden. Tendenziell scheint die Fußbodenoberfläche die geringsten Emissionen an VOC und insbesondere an Alkanen aufzuweisen.

### Untersuchungen von Materialproben

Ziel der Untersuchungen war die Eingrenzung der Quellbereiche der in der Raumluft mehrerer Räume der Schule in erhöhten Konzentrationen nachgewiesenen Alkane/Iso-alkane/Cycloalkane. Im Rahmen eines dritten Ortstermins wurden im Klassenraum A sowohl an der massiven Außenwand als auch an der Leichtbauinnenwand Bohrkerne entnommen. Zusätzlich wurde eine Probe der Mineralwolle aus der Leichtbauwand untersucht. Die Bohrkerne wurden mit Hilfe einer Diamantbohrkrone (Bohrkern Außenwand) bzw. einer Lochsäge (Bohrkern Leichtbauwand) mit Durchmessern von ca. 50 mm entnommen. Die Mineralwolle wurde aus dem Zwischenraum der Leichtbauwand mit Hilfe einer Pinzette entnommen (siehe Abb. 6 und 7).

Ein Aliquot des jeweiligen Probenmaterials wurde in einem kleinen Prüfraum auf 60 °C temperiert. Dabei wurde über einen Zeitraum von 2 Stunden gereinigte Luft über



**Abb. 5:** Messanordnung Oberflächen-Emissionsprüfzelle / Tenaxsammelrörchen für GC/MS-Analyse



**Abb. 6:** Probenahme Außenwand Schicht 1



**Abb. 7:** Probenahme Leichtbauwand Gipskarton und Mineralwolle

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Oberflächenemissionsprüfungen im Klassenraum A. Die Angabe der Ergebnisse erfolgt in Mikrogramm Substanz pro Quadratmeter Oberfläche und Stunde ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$ ).

Substanz	MP 1 Betondecke in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	MP 2 Betondecke in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	MP 3 Betondecke in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	MP 4 Außenwand in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	MP 5 Innenwand in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	MP 6 Fußboden in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$	BG in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$
<b>n-Hexan</b>	2	< BG	2	2	2	2	2
<b>n-Heptan</b>	< BG	< BG	< BG	< BG	1	1	1
<b>n-Octan</b>	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1	1
<b>n-Nonan</b>	< BG	< BG	1	1	< BG	1	1
<b>n-Decan</b>	1	1	1	3	1	< BG	1
<b>n-Undecan</b>	10	14	20	35	16	2	1
<b>n-Dodecan</b>	< BG	1	1	1	1	< BG	1
<b>n-Tridecan</b>	1	1	2	2	1	< BG	1
<b>n-Tetradecan</b>	< BG	3	3	n. a.	3	2	1
<b>n-Pentadecan</b>	2	3	2	2	2	2	1
<b>n-Hexadecan</b>	2	2	2	2	2	2	1
<b>n-Heptadecan</b>	1	1	1	1	1	2	1
<b>n-Octadecan</b>	< BG	< BG	< BG	1	< BG	1	1
<b>2,2,4,4,6,8,8-Heptamethylnonan</b>	< BG	1	1	1	< BG	< BG	1
<b>TVOC<sub>GC/MS</sub></b>	480	480	600	680	680	140	
<b>TVOC<sub>PID</sub></b>	824	730	1.129	870	865	126	
<b><math>\Sigma C_9</math> bis <math>C_{14}</math></b>	330	370	460	550	560	40	

< BG unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG)

MP Messpunkt

n. a. nicht auswertbar

TVOC<sub>GC/MS</sub> Gesamtbelastung mit flüchtigen organischen Verbindungen, gemessen mit Gaschromatografie-Massenspektrometer

TVOC<sub>PID</sub> Gesamtbelastung mit flüchtigen organischen Verbindungen, gemessen mittels Fotoionisationsdetektor

die Probe gezogen und die freigesetzten Substanzen wurden auf einem Tenaxrörchen angereichert. Die adsorbier-ten Substanzen wurden von dem beladenen Tenaxrör-chen thermisch desorbiert und mittels GC/MS analysiert.

Die Untersuchung der 2 Schichten (0 bis ca. 5 mm, ca. 5 bis ca. 7,5 mm) des aus der Betonaußenwand des Klassenraumes A entnommenen Bohrkerns ergab keine Hinweise auf eine Belastung des Außenwandaufbaus mit den in der Raumluft nachgewiesenen Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen. Die Außenwand war somit mit sehr hoher Wahr-

scheinlichkeit keine primäre Quelle der in der Raumluft nachgewiesenen Alkane/Isoalkane/Cycloalkane.

Die Untersuchung der beiden Gipskartonschichten (GK-Schichten) der Leichtbauwand (Wand zwischen Klassenraum A und Flur) erbrachte für die Schicht 1 (raumseitige GK-Schicht) eine Konzentration von 30  $\mu\text{g}/\text{kg}$  an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) und für die Schicht 2 (dem Zwischenraum der Leichtbauwand zuge-wandte GK-Schicht) eine Konzentration von 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ). Die dem

Zwischenraum der Leichtbauwand entnommene Mineralwolle wies keine Belastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) auf.

Anhand der Materialuntersuchungen konnten somit keine eindeutigen Hinweise auf die Primärquelle der in der Raumluft vom Klassenraum A nachgewiesenen Alkane/Isoalkane/Cycloalkane ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) gefunden werden.

### Untersuchungen einer Luftprobe aus dem Hohlraum der Leichtbauinnenwand

Nach der Entnahme des Bohrkerns im Klassenraum A aus der Leichtbauinnenwand wurde zusätzlich eine Luftprobe auf Tenaxröhren aus dem Hohlraum hinter der Mineralwolle gezogen. Die Untersuchung der aus dem Zwischenraum der Leichtbauwand entnommenen Luftprobe erbrachte eine deutliche Belastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) von  $1.110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Das Muster der ermittelten Substanzen wies im TIC eine weitestgehende Übereinstimmung mit dem in der Raumluft ermittelten Substanzmuster auf. Im Vergleich zur Raumluft des Klassenraums A konnten in dem Hohlraum der Leichtbauinnenwand deutlich höhere Konzentrationen an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) nachgewiesen werden.

Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wurden die Belastungen der Raumluft und der Luft im Hohlraum der Leichtbauinnenwand durch dieselbe Belastungsquelle verursacht. Da die Untersuchungen der Materialproben keine Schlüsse auf die Primärquelle der erwähnten Substanzen zugelassen haben, war die Ursache der Luft- bzw. Raumluftbelastung weiterhin ungeklärt.

### Untersuchungen eines im Putzraum befindlichen Staubbindemittels

Kurz vor Beendigung des dritten Ortstermins konnte nach erstmaligem Zugang zum Lagerraum der Schule ein Kanister mit Staubbindemittel gesichtet werden, auf dessen Etikett sowohl Kohlenwasserstoffe ( $C_{11}$  bis  $C_{12}$ ) als auch Isoalkane deklariert waren. Laut Produktbeschreibung dient die Flüssigkeit zum Binden von Staub und Schmutz

von allen Bodenbelägen. Eine Probe des flüssigen Staubbindemittels wurde auf Alkane/Isoalkane/Cycloalkane ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) untersucht und das Substanzmuster mit dem Muster der Luftprobe aus dem Hohlraum der Leichtbauinnenwand verglichen.

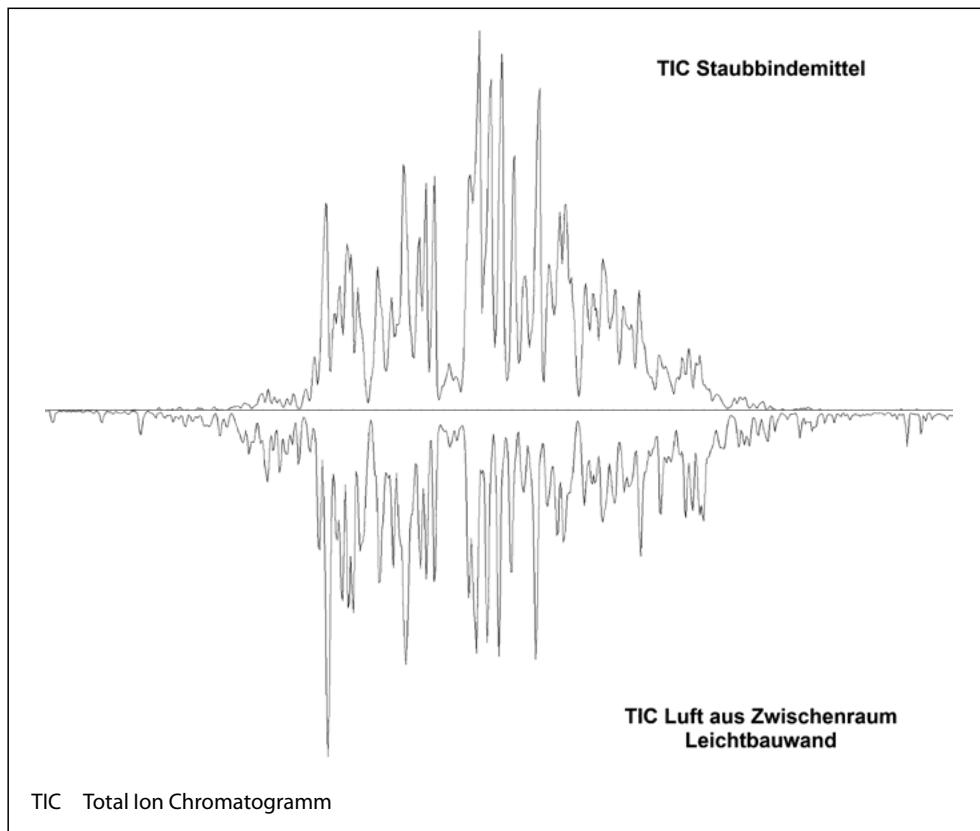
Das untersuchte Staubbindemittel wies für die Summe an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) eine Konzentration von  $5.970.000 \mu\text{g}/\text{kg}$  auf. Abb. 8 zeigt den Vergleich der Substanzmuster im TIC des Staubbindemittels und der analysierten Luftprobe aus dem Hohlraum der Leichtbauinnenwand. Es konnte ein nahezu identisches Muster an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen ermittelt werden.

### Fazit

Aufgrund der festgestellten Übereinstimmungen der Verteilungsmuster der Alkane/Isoalkane/Cycloalkane in der Raumluft von Klassenraum A, in der aus dem Zwischenraum der Leichtbauwand gezogenen Luftprobe und in dem Staubbindemittel ist aus gutachterlicher Sicht mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Ursache der im Klassenraum A nachgewiesenen Raumluftbelastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen der Einsatz des Staubbindemittels oder eines Produktes mit weitestgehend identischer Rezeptur ist.

In dem Zwischenraum der Leichtbauwand (Wand zwischen Klassenraum A und Flur) war im Vergleich zu den Ergebnissen der gezogenen Raumluftprobe eine deutlich höhere Konzentration an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen nachweisbar. Der Zwischenraum der Leichtbauwand ist somit mit hoher Wahrscheinlichkeit ein relevanter Quellbereich der Raumluftbelastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen. Abhängig von Einsatzort und -menge des verwendeten Produktes kann die Existenz weiterer Quellbereiche nicht ausgeschlossen werden. In welchem Umfang das Staubbindemittel eingesetzt wurde, konnte nachträglich nicht mehr ermittelt werden.

Die in dem Zwischenraum der Leichtbauwand nachgewiesene, im Vergleich zur Raumluft des Klassenraums A deutlich höhere Konzentration an Alkanen/Isoalkanen/



**Abb. 8:** Gespiegelte TIC (Retentionszeitbereich von 15:00 bis 23:00 Minuten) der Probe des Staubbindemittels und der aus dem Zwischenraum der Leichtbauwand entnommenen Luftprobe

Cycloalkanen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf eine Anwendung des Staubbindemittels in dem Zwischenraum selbst zurückzuführen. Vermutlich führte die Anwendung des Staubbindemittels temporär zu einer stark erhöhten Konzentration an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen im Klassenraum A. Durch kleine Undichtigkeiten in der Wandbeplankung (z. B. an Steckdosen, Lichtschaltern, Randfugen) kann kontaminierte Raumluft in den Hohlraum der Leichtbauwand eindringen. Werden bei der nächsten Raumlüftung die Fenster kurzzeitig (wenige Minuten) geöffnet, sinkt die Konzentration an Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen in der Raumluft schnell ab, während in dem Hohlraum der Leichtbauwand aufgrund des durch die kleinflächigen Undichtigkeiten deutlich langsameren Luftaustauschs die Luftbelastung nur langsam abnimmt. Nach Schließen der Fenster führt der Transfer von weiterhin stark belasteter Luft aus dem Hohlraum der Leichtbauwand zu einem langsamen Anstieg der Raumluftbelastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen im

Klassenraum A. Der Hohlraum der Leichtbauwand fungiert aufgrund dieser „Pufferwirkung“ somit als Sekundärquelle.

Der Schule wurde empfohlen, die Verwendung von kohlenwasserstoffhaltigen Produkten für die staubbindende Reinigung in dem Schulgebäude umgehend einzustellen. Falls das oben beschriebene Szenario zutrifft, ist ab dem Zeitpunkt des Anwendungsstopps mit einem kontinuierlichen Rückgang der Raumluftbelastung mit Alkanen/Isoalkanen/Cycloalkanen zu rechnen. Es wurde empfohlen, dies durch ein entsprechendes Monitoring zu überprüfen und zu dokumentieren. Im Rahmen des Monitorings sollten in einer repräsentativen Auswahl von Räumen des modularen Schulerweiterungsbau Raumluftmessungen auf Alkane/Isoalkane/Cycloalkane in regelmäßigen Zeitabständen so lange durchgeführt werden, bis der RW I für die Summe der Alkane/Isoalkane/Cycloalkane ( $C_9$  bis  $C_{14}$ ) von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sicher und dauerhaft eingehalten wird.

## Literatur

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der IRK/AOLG (2012): Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas. In: Bundesgesundheitsblatt 55 (2), S. 279–290. DOI 10.1007/s00103-011-1420-0

[Die Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) ist eine Kommission des Umweltbundesamtes (UBA), die 1984 im damaligen Bundesgesundheitsamt (BGA) eingerichtet wurde. Nach Auflösung des BGA 1994 und Überführung des BGA-Instituts für Wasser-, Boden- und Lufthygiene in das UBA 1994 wurde die IRK als UBA-Kommission fortgeführt. Die IRK berät den Präsidenten des UBA sachkundig zu allen Fragen der Innenraumlufthygiene.]

Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e. V. (AGÖF) (2013): AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft. In: Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) (Hrsg.): Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Schadstoffe, Gerüche und schadstoffarmes Bauen. Ergebnisse des 10. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute 2013. AGÖF, Springe-Eldagsen, S. 8–36

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (BayLfU; LfU) (2004): Nutzungsbedingte Kontaminationen. Stand: März 2004. Online verfügbar unter <http://www.lfu.bayern.de/boden/fachinformationen/schadstoffratgeber/suchregister/doc/432.pdf>, zuletzt geprüft am 20.01.2010

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2019): Laborhandbuch der Projektgruppe „Prüf- und Messverfahren zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten“; Referat „Gesundheits- und Umweltschutz“. Stand: 2019. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin

DIN EN ISO 16000-1 (2006): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie. Ausgabe Juni 2006. Beuth, Berlin

Sagunski H, Mangelsdorf I (2005): Richtwerte für die Innenraumluft: Aromatenarme Kohlenwasserstoffgemische (C<sub>9</sub>–C<sub>14</sub>). In: Bundesgesundheitsblatt 48 (7), S. 803–812. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/KWL.pdf>, zuletzt geprüft am 06.02.2017

Schleibinger H, Hott U, Braun P, Marchl D, Rüden H (2003): Recommendations for establishing target values and guidance values for volatile organic compounds (VOC) in indoor air. 7<sup>th</sup> International Conference 7<sup>th</sup>–11<sup>th</sup> December 2003 in Singapore. In: Healthy Buildings, S. 586–592

Technische Regeln für Arbeitsstätten: Lüftung (ASR A3.6). GMBL (2012) Nr. 6, S. 92–97, geänd. GMBL (2013), S. 359. Online verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR-A3-6.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2017

# Zeitliche und räumliche Schwankungen der Formaldehydkonzentration in Klassenräumen

**Temporal and spatial fluctuations of formaldehyde concentration in classrooms**

---

Die Formaldehydkonzentration in Klassenräumen kann jahreszeitlich bedingt stark schwanken. Ein an einem zentralen Punkt im Klassenraum gemessener Formaldehydwert muss nicht immer für den ganzen Raum gelten. Durch Verwenden von Passivsammlern kann die räumliche Verteilung der Formaldehydkonzentration auch ohne großen Mehraufwand an mehreren Stellen innerhalb eines Klassenraums gemessen werden. Aufgrund der Raumnutzung während des Schulbetriebs unter der Woche können die Werte im Vergleich zu einer Nichtnutzung am Wochenende stark abweichen.

Formaldehyde concentrations in classrooms can strongly change with season. A formaldehyde concentration measured at a central point of the room is not necessarily the same as in other parts of the room. By using passive samplers, it is possible to sample in different locations in a room using a reasonable amount of resources. The use of the classroom during the week can lead to different measurement results compared to the weekend period.

■ DR. RER. NAT. WERNER TIRLER, DR. MED. FABRIZIO NATOLINO, MASSIMO DONEGÁ  
Eco Research, Negrellistr. 13, 39100 Bozen, Italien, [w.tirler@eco-research.it](mailto:w.tirler@eco-research.it)

**F**ormaldehyd ist in Innenräumen fast ubiquitär nachzuweisen, wobei die Konzentration im Allgemeinen stark davon abhängt, wie der Wohnraum möbliert worden ist (Saltammer, 2019). Der verbreitete Richtwert von  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (AIR, 2016) wird in der Praxis nicht immer eingehalten. Speziell bei Räumen, die von vielen Personen genutzt werden, kann dies zu gesundheitlichen Problemen führen (WHO, 2010), die auch gesellschaftlich relevant werden können. In den vergangenen Jahren wurden im Raum Bo-

zen Überschreitungen registriert, die im Zusammenhang mit dem Einbau von bearbeiteten Holzpaneelen aufgetreten sind. Sind in diesen Räumen auch Personen untergebracht, die zu einer vulnerablen Bevölkerungsschicht zählen, wie z. B. Senioren oder Kinder, sollte besondere Vorsicht geboten sein. Bei einem Projekt zur Bewertung der Innenraumluftqualität von Schulklassen wurde ein Fokus auch auf zeitliche und räumliche Schwankungen dieses Gebäudeschadstoffs gelegt.

## Formaldehyd

Formaldehyd wird hauptsächlich durch verleimtes Holz bzw. Holzwerkstoffe, die zur Innenraumgestaltung und Möblierung eingesetzt werden, freigesetzt. Des Weiteren können eher in geringerem Umfang auch andere Quellen wie Textilien, Kleber und Reinigungsprodukte/Desinfektionsmittel zur Belastung beitragen. Generell sollte man bedacht sein, die Konzentration von Formaldehyd in Innenräumen sehr niedrig zu halten, da die Kanzerogenität dieses Stoffes als erwiesen gilt (AIR, 2016). Besondere Vorsicht gilt, wenn die Räume öffentlich zugänglich und mit mehreren Personen belegt sind, die womöglich noch eine höhere spezifische Empfindlichkeit (z. B. bei Gesundheitlichen Einrichtungen, Schulen) aufweisen können. Der Vergleich der in den Räumen gemessenen Formaldehydwerte mit den Richtwerten ermöglicht eine Bewertung. Doch wie werden diese Werte erhoben und was sagen sie letztendlich aus?

## Auswahl der zu untersuchenden Schulklassen

Wegen der steigenden Sensibilisierung der letzten Jahre, gerade in Bezug auf Formaldehyd, wurden große Bemühungen gemacht, um eine Reduzierung der Emissionen aus Bauprodukten und Mobiliar zu erreichen. So erreichen neue Produkte, die nach DIN EN 717-1:2005-01 geprüft werden, durchweg günstigere (niedrigere) Werte. Diese Fortschritte werden aber manchmal durch die veränderte Bauweise teilweise wieder zunichtegemacht. Ein der Energieeffizienz verpflichtetes Bauen hat manchmal auch einen niedrigen Luftwechsel zur Folge. Zwar ist seit geraumer Zeit bekannt, dass ein zentraler Punkt der Innenraum-Luftqualität („Über den Luftwechsel in Wohngebäuden“; Pettenkofer, 1958) der Luftaustausch ist, doch gerade in jüngster Zeit wird dies nicht immer besonders berücksichtigt. Deshalb wurden bewusst 3 Schulen ausgewählt, die nach verschiedenen Kriterien gebaut wurden. Die Schulen 1 und 2 wurden erst in den letzten Jahren fertiggestellt, aber nach verschiedenen Kriterien der Energieeffizienz. Bei Schule 2 wurde noch auf eine großzügigere Raumge-

staltung Wert gelegt, aber ohne kontrollierte Lüftungssysteme. Bei Schule 1 wurde alles, was dem Stand der Technik entsprechend an kontrollierten Lüftungssystemen zur Verfügung stand, mit Wärmetauscher und Luftfilter, eingebaut. Zudem waren bei dieser Schule beide Klassenräume im Erdgeschoss und eine Tür ermöglichte einen direkten Zutritt zum Garten. Da bei der ausführlichen Messkampagne im November auch kontinuierlich die Raumluftkonzentration an CO<sub>2</sub> gemessen wurde, konnte auch der rege Gebrauch dieser Möglichkeit nachgewiesen werden und der effektive Luftwechsel war davon beeinflusst. Schule 3 wurde in den 1970er-Jahren errichtet (ohne besondere Berücksichtigung der Energieeffizienz) und es wurden für die damalige Zeit gängige Materialien für den Bau und die Einrichtung verwendet. Bei Schule 1 und 2 wurden ausgewählte und geprüfte Materialien verwendet.

## Planung der Probenahme

Als Standard-Messmethode wird oft eine Probenahme mit einer Pumpe (ISO 16000-3:2011) angewandt. Diese Art der Probenahme konnte bei den von uns untersuchten Klassenräumen nicht angewandt werden, da ein Stören des Unterrichts durch Vorbereitungsarbeiten und durch Pumpengeräusche nicht erwünscht war. Die Messungen sollten so durchgeführt werden, dass sie im normalen Unterricht nicht wahrgenommen werden konnten. Deshalb wurde eine Probenahme mit Passivsampler (ISO 16000-4:2011) durchgeführt.

Durch Verwenden von Passivsammlern konnten sowohl die Probenanzahl als auch die räumliche Verteilung der Probenahmestellen innerhalb des Klassenraums großzügig angelegt werden. Es wurden jeweils 2 Klassenräume pro Schule beprobt. Man entschied sich für 3 Probenahmepunkte innerhalb des Klassenraums, mit Ausnahme von Klasse B, wo nur 2 zur Verfügung standen. Damit sollte einerseits eine repräsentative Probenahme gesichert werden, andererseits sollten auch Informationen gewonnen werden, wie wichtig die Auswahl des Probenahmepunktes innerhalb des Klassenraums wirklich ist. Nach ISO 16000-1:2004 soll, wenn möglich, in der Raummitte

**Tabelle 1:** Temperatur- und Feuchteverlauf während der Messkampagne

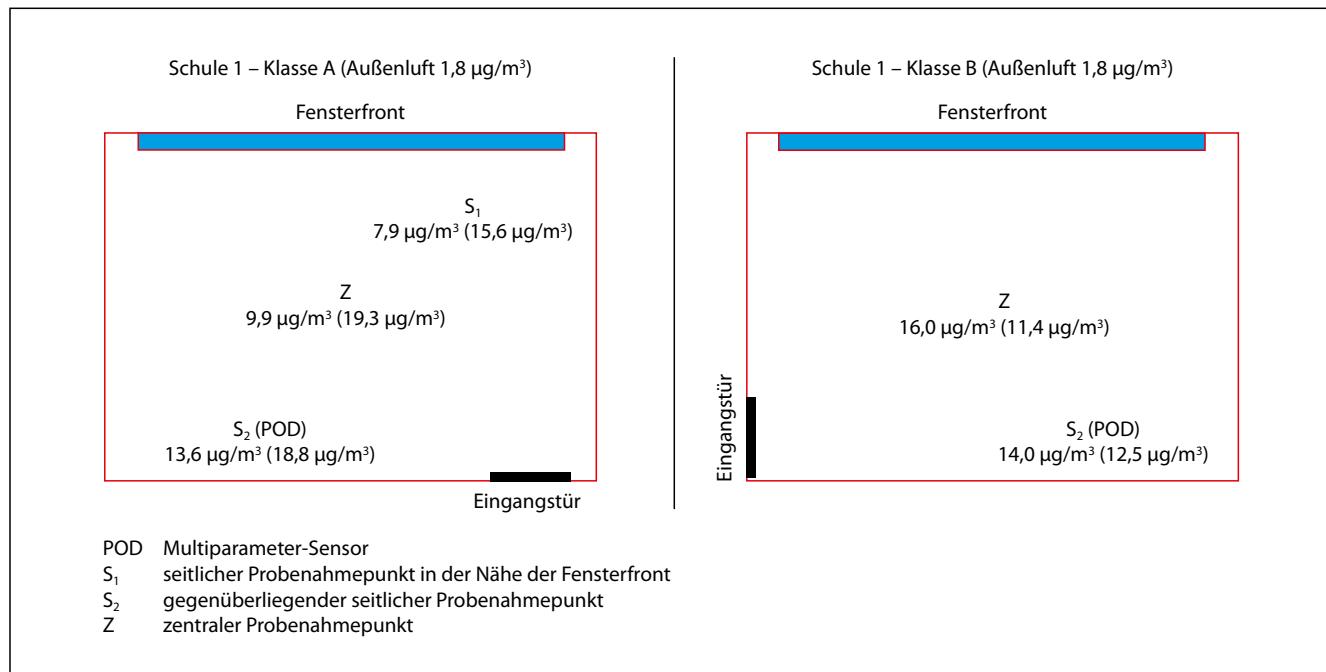
<b>Temperatur und Feuchte in den Klassen</b>		<b>mittlere Temperatur in °C</b>		<b>mittlere Feuchte in %</b>	
		<b>unter der Woche</b>	<b>am Wochenende</b>	<b>unter der Woche</b>	<b>am Wochenende</b>
<b>Schule 1</b>	Klasse A	23,1	21,8	32,5	29,2
	Klasse B	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten
<b>Schule 2</b>	Klasse C	23,2	22,6	38,4	35,7
	Klasse D	22,4	22,1	37,3	35,5
<b>Schule 3</b>	Klasse E	22,7	21,7	33,0	28,2
	Klasse F	23,1	23,2	32,5	27,2

beprobt werden, in einer Höhe von 1,0 bis 1,5 m, und ein Wandabstand von mehr als 1,0 m soll eingehalten werden. Diese Vorgaben sollten kritisch hinterfragt werden, weshalb auch Parallelmessungen an 3 verschiedenen Punkten vorgenommen wurden. Bei Beprobung und Analyse sollte man auch nicht außer Acht lassen, ob eine dem Zweck entsprechende Vorgehensweise gewählt wurde. Wenn man aus logistischen Gründen nur an einer Stelle beproben kann, ist die Vorgehensweise nach ISO 16000-1 natürlich sinnvoll. Durch Verwenden von Passivsammlern ist der Aufwand bei einer Mehrfach-Beprobung aber begrenzt und diese kann auch flexibel eingesetzt werden.

In einer Schulklassenzimmer können unter Umständen genau in der Mitte keine Schüler sitzen, aber doch welche in der Nähe einer Wand. Der zentrale Probenahmepunkt (Z) war in ca. 2 m Höhe über eine Verbindung mit der Decke angebracht. Zwei Passivsammler wurden seitlich, in unmittelbarer Nähe der Wand (< 0,3 m), meist gegenüberliegend, in einer Höhe von ca. 2 m angebracht. Einer dieser seitlichen Probenahmepunkte war näher zur Fensterfront ( $S_1$ ), beim zweiten ( $S_2$ ) wurde zudem auch ein Multiparameter-Sensor (RubiX PoD, [www.rubixsi.com](http://www.rubixsi.com); kurz: POD) angebracht, der für die Raumluftqualität wichtige Parameter kontinuierlich erfassen konnte. So konnten  $\text{CO}_2$ , Temperatur und Feuchtigkeit in Echtzeit gemessen werden und über eine Cloud-basierte Datenbank auch remote abgerufen werden. Die so erhaltenen Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

## Ergebnisse

Zu Beginn der Messkampagnen wurden Anfang Mai 2019 für die Beprobung Passivsammler in die Klassenräume gestellt, um eine erste Übersicht über die Formaldehydbelastung zu bekommen. Die erhobenen Werte waren durchweg sehr niedrig, im Bereich von < 1 bis 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Außentemperatur variierte im Bereich von mindestens 10 bis maximal 23 °C (durchschnittlich 20 °C). Da gerade im Mai die Außentemperatur ideal ist, um Klassenräume auch ständig zu lüften, wurden diese Werte als nicht repräsentativ eingestuft und eine ausführlichere Beprobung wurde auf den Herbst verschoben, wo die Räume auch geheizt werden müssen und ein ständiges Lüften nicht mehr möglich ist. Mitte Oktober – die Außentemperatur variierte dabei im Bereich von mindestens 5 bis maximal 20 °C (durchschnittlich 14 °C) – wurde wieder eine Übersichtsbeprobung in den Klassenräumen durchgeführt und die erhaltenen Werte waren doch signifikant höher, im Bereich von 12 bis 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Im November wurde dann eine ausführlichere Messkampagne gestartet, die eine Formaldehydbeprobung an verschiedenen Punkten in den Klassenräumen vorsah und bei der auch der Multiparameter-Sensor zur Online-Messung von  $\text{CO}_2$ , Temperatur und Feuchte eingesetzt wurde. Es wurde sowohl am Wochenende (16. bis 17. November) wie auch während der Schulwoche (18. bis 22. November) gemessen. Die im November erhaltenen Temperatur- und Feuchte-Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



**Abb. 1:** Formaldehydkonzentrationen in den Klassen A und B der Schule 1

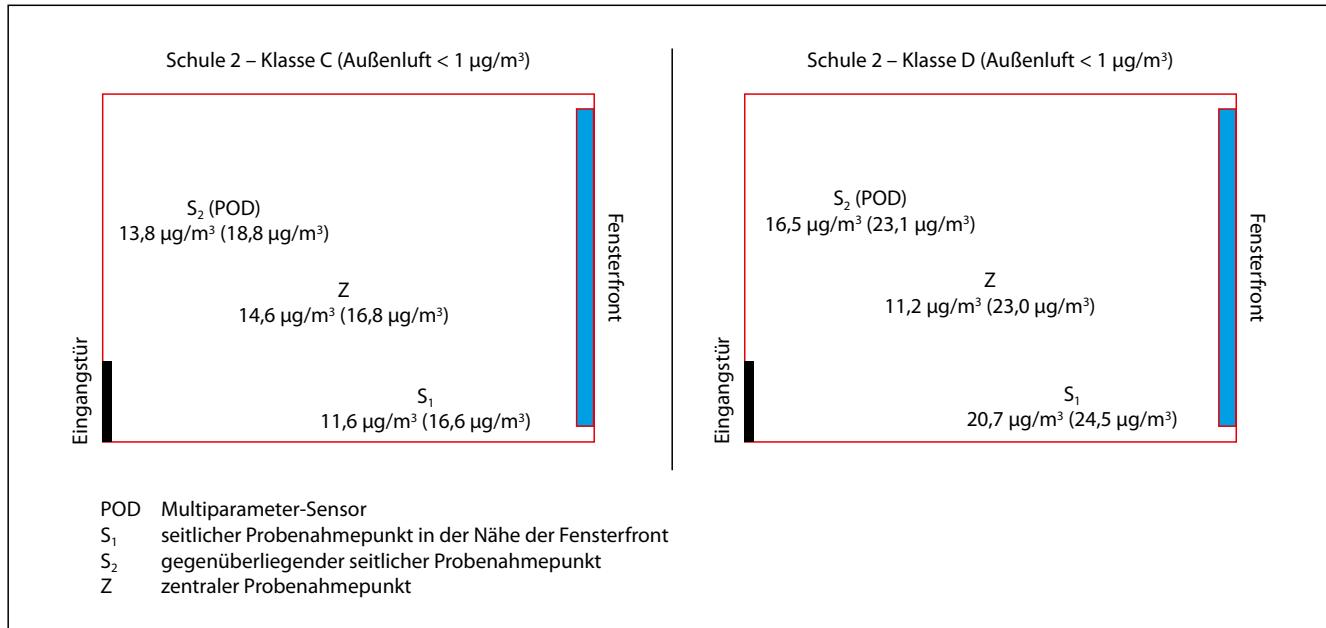
Es wurden 2 Messkampagnen durchgeführt, wobei eine Beprobung während einer Woche normalen Schulbetriebs, von Montag bis Freitag, durchgeführt wurde, die andere über das Wochenende (leere Klasse) erfolgte. Für eine bessere und intuitivere Darstellung der Ergebnisse wurden diese grafisch im Raum zugeordnet, wie in den folgenden, jeweils pro Klasse dargestellten Grafiken ersichtlich ist. Die Ergebnisse der Messkampagne während der Schulwoche sind in den Grafiken beim Beprobungspunkt angeführt, so auch die Ergebnisse der Messkampagne am Wochenende, allerdings in Klammern gesetzt. Alle Werte für Formaldehyd sind in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  angegeben.

Wenn wir Abb. 1 betrachten, die die Ergebnisse für Klassenräume der energieeffizientesten Schule (Schule 1) darstellt, sieht man bei Klasse A, dass während der Schulwoche in den Punkten  $S_1$  und Z niedrigere Werte ( $7,9$  und  $9,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) als am Wochenende ( $15,6$  und  $19,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) erhoben wurden. Beim Punkt  $S_2$ , der Fensterfront weiter abgewandt, und bei der Klasse B war der Unterschied nicht signifikant.

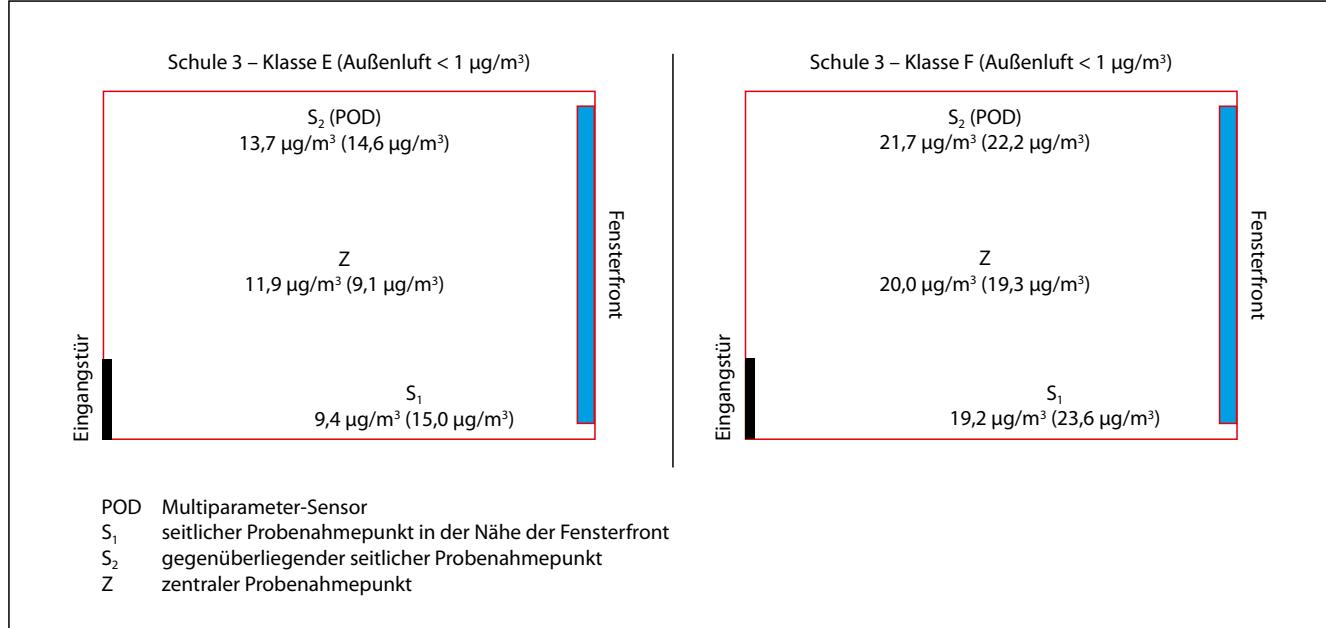
Bei Schule 2, wo auch Kriterien des energieeffizienten Bauens angewandt wurden, kann man eigentlich keinen

eindeutigen Trend ausmachen (siehe Abb. 2). Speziell in Klasse C sind sowohl die örtlichen (verschiedene Probenahmepunkte) wie auch die zeitlichen Schwankungen (Wochenende und unter der Woche) der Messwerte nicht wirklich signifikant verschieden. Die einzige Ausnahme stellt der zentrale Probenahmepunkt (Z) in der Klasse D dar, der während der Schulwoche einen deutlich niedrigeren Wert ( $11,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) als am Wochenende ( $23,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) liefert.

Schule 3, in den 1970er-Jahren erbaut – damals war Energieeffizienz beim Bauen noch kein zentrales Thema –, liefert je nach Klasse ein recht unterschiedliches Bild (siehe Abb. 3). Bei Klasse E ist kein eindeutiger Trend ersichtlich, bei Klasse F sind sogar fast nur identische Werte erhoben worden, unabhängig davon, wo und wann man beprobt hat. Eine Erklärung für diese überraschende Konstanz der Werte kann wahrscheinlich darin zu finden sein, dass Klasse F keine „normale“ Schulklasse ist, sondern der Computerraum, mit einem Personal Computer (PC) am Platz pro Schüler. Ein PC-Server war ebenfalls im Klassenraum und die eingebauten Lüfter konnten eventuell die Luftdurchmischung beeinflusst haben. Erstaunlich ist auch,



**Abb. 2:** Formaldehydkonzentrationen in den Klassen C und D der Schule 2



**Abb. 3:** Formaldehydkonzentrationen in den Klassen E und F der Schule 3

dass die Schwankung der erhobenen Werte in diesem Raum innerhalb der Wiederholpräzision des Verfahrens (innerhalb einer zweifachen Standardabweichung), die mit 15,9 % quantifiziert worden ist, liegt. Dabei sind die Werte weder zeitgleich (am Wochenende und unter der Woche) noch am gleichen Ort (an 3 verschiedenen Punkten im Raum) ermittelt worden.

Die erhobenen Werte ermöglichen nur eine Zeitaufnahme in einer gegebenen Situation und wollen keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Je nach Bauweise und Nutzung können die Werte unterschiedlich schwanken. Eine Beprobung mit Passivsampler ermöglicht, ohne großen Mehraufwand an verschiedenen Punkten in der Klasse zu beproben, und kann so Auskunft über die mögliche Schwankungsbreite der Konzentrationen im Raum liefern.

## Bestimmung anderer Aldehyde

Da bei der gewählten Bestimmungsmethode (Analytik mit Hochleistungsflüssigkeitschromatografie [HPLC] nach Sammlung auf Dinitrophenylhydrazin- [DNPH-]Kartuschen) ohne großen Mehraufwand auch andere Aldehyde mitbestimmt werden können, wurden auch diese berücksichtigt. Außer Formaldehyd wird auch die Summenbewertung mit Acetaldehyd diskutiert bzw. in den Fokus gebracht (Weis, 2017). Durch eine nachträgliche, semiquantitative Auswertung der Proben haben sich Hinweise ergeben, dass neben Acetaldehyd auch Butanal und Hexanal in einer ähnlich hohen Konzentration wie Formaldehyd vorliegen können.

## Fazit

Die Formaldehydkonzentration in Klassenräumen kann jahreszeitlich bedingt stark schwanken. Wenn in der kälteren Jahreszeit durch selteneres Lüften der Luftwechsel niedrig ist, können höhere Formaldehydkonzentrationen die Folge sein. Durch die Raumnutzung während des Schulbetriebs unter der Woche können die Werte im Ver-

gleich zu einer Nichtnutzung am Wochenende variieren, müssen es aber nicht. Eine räumliche Schwankung der Werte in den Klassenräumen konnte beobachtet werden, wobei diese generell unter der Woche bei Schulbetrieb höher ausfallen kann als am Wochenende. Ein durch einen zentralen Beprobungspunkt erhobener Wert muss nicht immer eine repräsentative Aussage über die effektive Formaldehydbelastung in den Schulklassen liefern. Schulgebäude mit erhöhter Energieeffizienz müssen nicht zwangsläufig einen schlechteren Luftwechsel oder eine höhere Formaldehydbelastung aufweisen. Zusätzliche aktive Lüftung und sorgfältige Auswahl der verbauten Materialien können zu vergleichsweise „guter Luftqualität“ führen.

## Danksagung

Die Studie konnte dank finanzieller Unterstützung der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol, nach Landesgesetz vom 13. Dezember 2006, Nr 14, durchgeführt werden.

## Literatur

- AIR. (2016) Richtwert für Formaldehyd in der Innenraumluft. Mitteilungen des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Bundesgesundheitsblatt 59, 1040-1044, DOI 10.1007/s00103-016-2389-5
- DIN EN 717-1:2005-01 Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammer-Methode; Deutsche Fassung EN 717-1:2004
- ISO 16000-1:2004 / DIN EN ISO 16000-1:2006-06 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie (ISO 16000-1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 16000-1:2006
- ISO 16000-3:2011 / DIN ISO 16000-3:2013-01 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern – Probenahme mit einer Pumpe
- ISO 16000-4:2011 / DIN ISO 16000-4:2012-11 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 4: Bestimmung von Formaldehyd – Probenahme mit Passivsammlern
- Pettenkofer M. (1958) Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cottasche Buchhandlung, München
- Salthammer T. (2019) Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. Building and Environment 150, 219–232
- Weis N. (2017) Der neue Richtwert für Formaldehyd – eine kritische Betrachtung. Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft 2, 46–53
- WHO. (2010) Formaldehyde. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization, Genf, 103–156

# Gezielte Beeinflussung der Innenraumluftqualität durch Sorptionsmaterialien

## Targeted influencing of indoor air quality by means of sorption materials

---

Erhöhte Innenraumluftkonzentrationen von VOC (engl.: volatile organic compounds) und niedermolekularen Carbonylverbindungen (z. B. Formaldehyd), aber auch andere Emissionen, wie z. B. Ammoniak, treten in Wohnobjekten zu spezifischen Zeitpunkten während der Nutzung auf und sind üblicherweise bau-, werkstoff- oder situationsspezifisch.

Wenn das reine Ablüften dieser Substanzen zu langsam geschieht oder gezielt darauf Einfluss genommen werden möchte, können Sorptionsmaterialien zum Einsatz kommen. Es wurde dazu für Lehmputz und auch für sogenannte Scavenger-Materialien das Sorptionsverhalten von in der Innenraumluft auffindbaren Verbindungen untersucht.

**Sowohl für Lehmputz als auch für die Scavenger Aktivkohle und Silikagel wurde dabei ein hohes Potenzial zur Innenraumluft-Qualitätsverbesserung identifiziert.**

Increased concentrations of VOC (volatile organic compounds) and low molecular weight carbonyl compounds (e. g. formaldehyde), but also other emissions, such as ammonia, occur in indoor air at residential properties at specific times during use and are mostly construction, material or situation specific.

If the pure venting of these substances happens too slowly or if you want to influence it in a targeted manner, sorption materials can be used. For this purpose, the sorption behaviour of typical compounds that can be found in indoor air was investigated for clay plaster and for so-called scavenger materials.

**A high potential for improving indoor air quality was identified for both clay plaster and for the scavengers activated carbon and silica gel.**

- DR. DANIEL STRATEV, MAG. ELISABETH HABLA, DI(FH) CHRISTINA FÜRHAPPER, DR. MARTIN WEIGL\*  
\*Holzforschung Austria, Franz-Grill-Str. 7, 1030 Wien, Österreich, +43 1 798 26 23 – 839, m.weigl@holzforschung.at

# E

rhöhte Innenraumbelastungen durch VOC treten regelmäßig im Bereich des Neubaus sowie während und unmittelbar nach Umbauten oder Oberflächenbehandlungen bzw. auch bei neuen Möbeln auf. Verschiedene Bewertungsschemata für die Beurteilung der Innenraumluftqualität bedienen sich dabei der Summenkonzentration an VOC (TVOC) als Indikator (z. B. Bundesministerium Landwirtschaft, Regionen und Tourismus [BMLFUW] 2005 bzw. DIBt [Deutsches Institut für Bau-technik] 2010).

Die TVOC-Entwicklung in Holzbauten in der ersten Nutzungsphase wurde durch die Autoren für unterschiedliche Szenarien über mehrere Monate umfangreich untersucht (Holzforschung Austria 2014; Weigl et al. 2014; Stratev und Weigl 2015; Stratev et al. 2016; Fürhapper et al. 2020). Es zeigt sich für Objekte, die nach dem Stand der Technik errichtet wurden, in Analogie zu Materialuntersuchungen unter Normprüfbedingungen, nur mit einer zeitlichen Verzögerung, eine typische Abklingkurve für den TVOC-Wert<sup>1</sup>. Objektnutzung und Lüftungssituation haben hierbei einen großen Einfluss. Basierend auf den oben genannten Untersuchungen wäre eine Beurteilung der Innenraumluftqualität idealerweise 6 Monate nach Fertigstellung zu empfehlen. Davor kann nur selten angenommen werden, dass der ermittelte Wert annähernd repräsentativ für die darauffolgende, oft jahrelange Objektnutzung ist. Für eine Beurteilung im Zuge einer Gebäudezertifizierung oder ähnliche Intentionen ist dieser zeitliche Anspruch meist jedoch zu lang – im Regelfall werden die Tests 28 Tage nach dem offiziellen Bauabschluss durchgeführt. Umfangreiche Innenraumluftmessungen, toxikologische Untersuchungen sowie Probanden- und Probandinnenbefragungen zeigen jedoch auch, dass im Regelfall bei Anwendung von Holz im Innenbereich keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit

und die Lebensqualität auftreten (Fürhapper 2017; Fürhapper et al. 2020).

Neben Betrachtungen zu VOC wurde in dieser Arbeit auch eine Substanzgruppe als „extremflüchtige Substanzen“ betrachtet, die sowohl organische als auch anorganische Verbindungen umfasst. Die zugehörigen Substanzen wurden ohne Rücksicht auf ihre Quelle rein anhand ihrer Innenraumluftrelevanz in Bezug auf Produkt- und Anwendungssicht ausgewählt und sind vergleichbar flüchtig wie VVOC (engl.: very volatile organic compounds). Es wurden Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Vertreter dieser Substanzgruppe untersucht. Weitere, in dieser Arbeit nicht berücksichtigte Vertreter der Gruppe „extremflüchtiger Substanzen“ sind organische Verbindungen, die unter Raumbedingungen gasförmig sind und nicht durch die Dinitrophenylhydrazin- (DNPH-)Analytik erfasst werden können (z. B. niedermolekulare Alkane), wie auch z. B. folgende anorganische Verbindungen: Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Kohlenmonoxid (CO). Typische und gegebenenfalls auch konstante Quellen dieser Substanzen im Innenraum sind Feuchträume und Sanitäreinrichtungen bis hin zu Tiertoiletten, Prozesse der Lebensmittelzubereitung, Küchenabfälle, Ethanol-Kamine und vieles mehr. Auch die Behandlung von Holz, und hier bevorzugt Eiche, mit Ammoniak zur Farbgestaltung (das sogenannte Räuchern) kann bei ungenügender Ablüftung zu erhöhten Ammoniak-Immissionen führen. In einem solchen Fall kommt es vielfach zu Reklamationen aufgrund der Geruchsbelästigung. Methan und Kohlendioxid sind hingegen geruchsneutral. Ammoniak und Methan werden in der Innenraumluft üblicherweise nicht routinemäßig gemessen. Kohlendioxid wird vor allem dann routinemäßig gemessen, wenn eine kontrollierte Wohnraumlüftung über den Kohlendioxid-Gehalt gesteuert wird.

Methoden, um auf einfachem Wege die Anfangsemissionen (z. B. durch Neubau, Umbau, Sanierung) zu reduzieren, sind somit insbesondere in Objekten, wo Holzwerkstoffe oder langsam ausdampfende Produkte wie Öle, Farben, Lacke oder manche Dichtstoffe eingesetzt

<sup>1</sup> Flüchtige organische Verbindungen (VOC) umfassen Verbindungen im Retentionsbereich  $\text{C}_6$  bis  $\text{C}_{16}$ , die als Einzelstoffe und im Rahmen des TVOC-Konzeptes (TVOC = engl.: total volatile organic compounds) als Summenparameter betrachtet werden.

werden, mitunter von Interesse. Neben aktiver Lüftung können hierbei Sorptionsmaterialien (sogenannte Scavenger) einen wesentlichen Beitrag leisten. Am Markt findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Scavenger-Materialien, für welche meist das Sorptionsverhalten gegenüber Luftfeuchte, nicht aber gegenüber ausgewählten VOC in der Innenraumluft bekannt ist. Zusätzlich sind Wechselwirkungen unterschiedlicher Substanzgruppen bei der Sorption üblicherweise unbekannt, womit eine Produktauswahl für unspezifische Anwendungen wie die Verbesserung der Innenraumluftqualität von Bauwerken erschwert wird.

Lehmputz ist ein traditioneller Baustoff, der in den letzten Jahren eine gewisse Renaissance erlebt hat. Besonders in Objekten mit hohen ökologischen Ansprüchen wie auch für EndverbraucherInnen mit diesbezüglich gesteigertem Bewusstsein ist Lehmputz vielfach eine attraktive Ausführungsvariante für den Wand- und/oder Deckenabschluss. Bekannt ist die feuchteregulierende Wirkung von Lehmputz (z. B. Dörfler 2016). Hierbei sind besonders Materialauswahl und Schichtstärke entscheidend, um eine hohe Behaglichkeit ohne weitere technische Maßnahmen wie Lüftung, Klimatisierung usw. gewährleisten zu können. Dass Baustoffe selbst nicht nur als Emissionsquelle, sondern auch als deren Senke fungieren, wurde beispielsweise von Lee und Mitarbeitern (Lee et al. 2005) modellhaft beschrieben.

Eine der messtechnischen Herausforderungen bei der Untersuchung der Sorptionseigenschaften unterschiedlicher Materialien ist der Aufbau eines geeigneten Setups zur Generierung und Messung von chemisch dotierten Luftströmen. Die Wirkstoffkonzentrationen müssen praxisnah sein und die Analytik empfindlich genug, um Änderungen im ausgewählten Konzentrationsbereich zu detektieren. Mit Ausnahme eines Proton-Transfer-Reaktion-massenspektrometrischen Systems (PTR-MS) existiert derzeit keine einheitliche analytische Technik zur Detektion von sehr bis schwerflüchtigen Verbindungen organischen und/oder anorganischen Ursprungs (auch in Spurenkonzentrationen). PTR-MS ist jedoch schwer zu kalibrieren, insbesondere wenn die Luftfeuchtigkeit zeitlich variabel ist oder wenn sich mehrere Komponenten

gleichzeitig in der Luftphase befinden (Schripp et al. 2010). Hinzu kommen meist für die Praxis zu hohe Analysenkosten.

Für einen gezielten Praxiseinsatz ergeben sich demnach Forschungsfragen hinsichtlich

- 1) der Entwicklung eines einfachen Untersuchungs-Setups,
- 2) der Wirkungsweise von technisch hergestellten Scavengern,
- 3) jener von Lehmputz und
- 4) der Skalierbarkeit dieser Ergebnisse.

## Materialien und Methoden

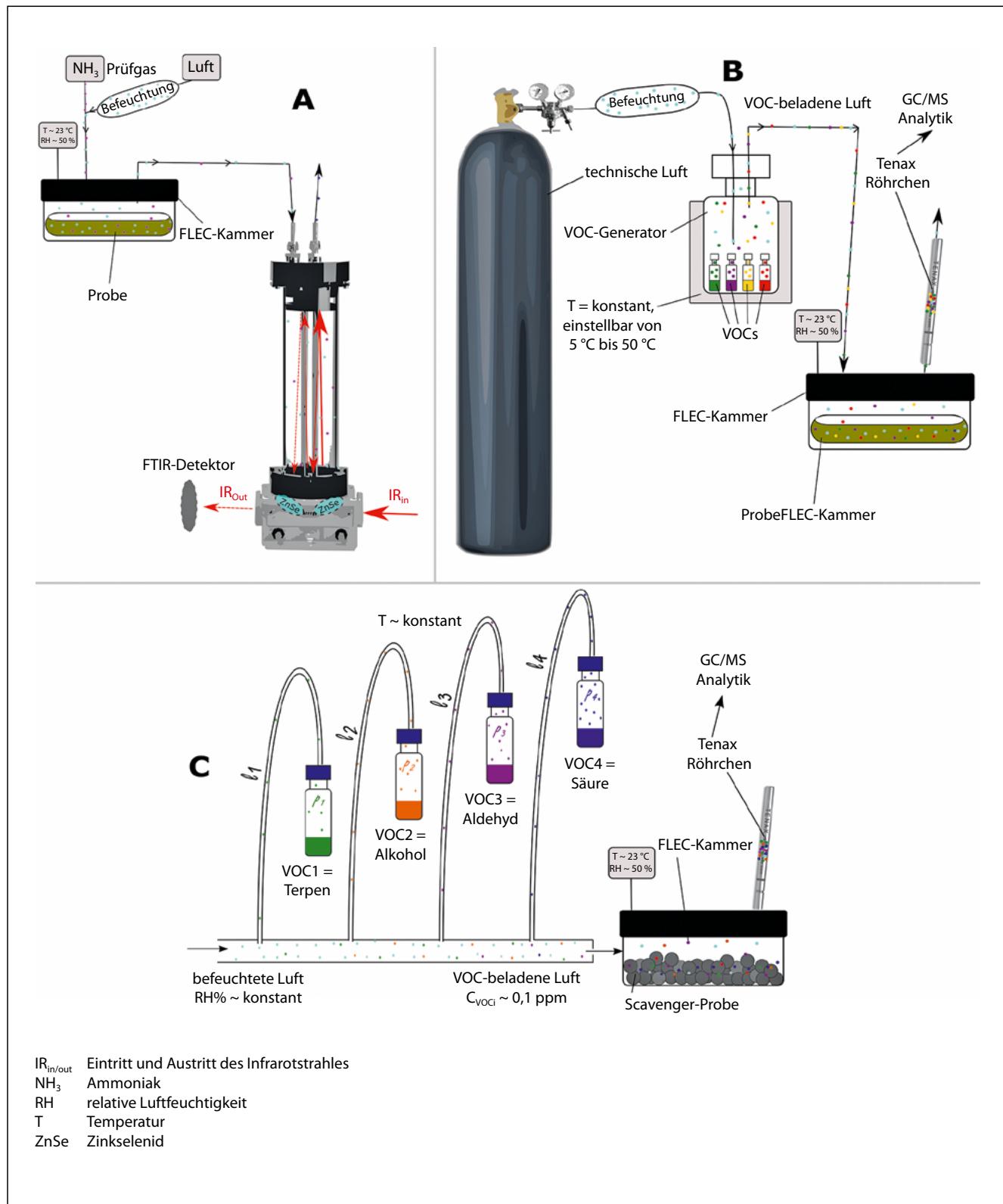
Die Versuche wurden in Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis in 3 Größenordnungen durchgeführt:

- 1) als Schnelltest im Kleinmaßstab mittels eines FLECK-Kammer-Aufbaus,
- 2) als Langzeitversuch in Normprüfkammern mit einem Volumen von 0,225 m<sup>3</sup> und
- 3) als Realraumversuch in einem neu gebauten Objekt in Holzbauweise.

Als Untersuchungsmaterial dienten hierbei je nach Teststadium entweder Lehmputz oder ausgewählte technisch hergestellte Scavenger. Die genauere Beschreibung der Materialien findet sich jeweils bei der Versuchsbeschreibung.

## Schnelltests im Kleinmaßstab

Vor dem Hintergrund der schwierigen Beschreibung des dynamischen Sorptionsverhaltens von Scavengern gegenüber unterschiedlichen Substanzen wurden 2 komplettäre Nachweistechniken (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer [FTIR] und Tenax-TD-Gaschromatografie/Massenspektrometrie [-GC/MS]) kombiniert sowie 3 Systeme zur Erzeugung von praxisnahen Gas-Wirkstoff-Ge-



**Abb. 1:** Untersuchungs-Setups. Links oben: Lehmputz-Sorption extremflüchtiger Substanzen und FTIR-Detektion; rechts oben: Lehmputz-Sorption von VOC und GC/MS-Detektion; unten: Scavenger-Sorption von VOC und GC/MS-Detektion



**Abb. 2:** Links: FLEC-Kammer und Luftfeuchtebestimmungsgefäß; rechts: 20 g Scavenger verteilt im zylindrischen Prüfraum (Höhe 13 mm)

mischen etabliert (siehe Abb. 1). Die Grundlage hierzu wurde bereits für die Messung von Emissionen loser Produkte wie Pellets, Hackgut und Rinde geschaffen (Weigl et al. 2015; Kain et al. 2020). In Anlehnung an Kain und Mitarbeiter (Kain et al. 2020) wurde als Prüfkammer bei den Schnelltests ein zylindrisches Gefäß mit einer FLEC-Zelle als Deckel verwendet (siehe Abb. 2). Dieser Aufbau wurde als „FLEC-Kammer“ gekennzeichnet und ist nicht mit der FLEC-Zellen-Testmethode ISO 16000-10 (2006) zu verwechseln. Je nach Untersuchungsmaterial (plattenförmige Prüfkörper aus Lehmputz oder Scavenger-Granulate) wurden Hohlzylinder als Prüfraum mit möglichst kleinen Innenhöhen (50 bzw. 13 mm) ausgewählt (Beispiel in Abb. 2 rechts). Ziel war, eine maximale Interaktion zwischen der zuströmenden Luft und dem untersuchten Material (beim gewählten Durchfluss) zu erreichen.

## Lehmputz in Schnelltests

Zur Untersuchung des Sorptionsverhaltens von Lehmputz wurden runde Ausschnitte zweier gewerblich gefertigter, konditionierter Lehmputz-Platten herangezogen. Die beiden Produkte unterschieden sich insbesondere hinsichtlich ihrer Dichte. Die genauen Versuchsparameter sind in Tabelle 1 ersichtlich.

**Tabelle 1:** Relevante Parameter bei 2 getrennten Schnelluntersuchungen an 2 unterschiedlichen Lehmputz-Plattentypen

Parameter	extrem-flüchtige Substanzen	(V)VOC
<b>Kanten verklebt</b>	ja	ja
<b>Unterseite verklebt</b>	ja	ja
<b>Prüfkammerdurchmesser [m]</b>	0,15	0,15
<b>Prüfstückdurchmesser [m]</b>	0,142	0,085
<b>Masse der Probe [kg]</b>	1,09	0,19
<b>Dichte der Probe [kg/m<sup>3</sup>]</b>	3.527	1.709
<b>Prüfkammertiefe [m]</b>	0,05	0,05
<b>Prüfkammer + FLEC-Volumen [l]</b>	0,919	0,919
<b>Probenstärke [m]</b>	0,022	0,020
<b>Emissionsfläche [m<sup>2</sup>]</b>	0,0140	0,0057
<b>Luftdurchfluss [ml/min]</b>	100	100
<b>Ist-Flächen-spezifische Durchflussrate -q [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h)]</b>	0,4	1,1
<b>Temperatur [°C]</b>	~ 23	~ 23
<b>relative Luftfeuchtigkeit [%]</b>	~ 50	~ 50

VOC Volatile Organic Compounds

VVOC Very Volatile Organic Compounds

## Verhalten von Lehmputz gegenüber extremflüchtigen Substanzen

Die Vorbereitung der mit Ammoniak, Methan und Kohlendioxid dotierten Testatmosphären erfolgte durch Verdünnung von Prüfgasen bekannter Analytkonzentrationen mit gereinigter Druckluft (siehe Abb. 1, links oben). Die Testkonzentrationen ( $C_{\text{Test}}$ ) und die entsprechenden maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK<sup>2</sup>) bzw. Beurteilungswerte (BW) sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Orientierung der eingestellten Versuchsbedingungen an den MAK-Werten erfolgte sowohl aus analytischen Gründen als auch, um ein anwendungsspezifisch relevantes Szenario zu repräsentieren. Eine Orientierung an den um ein Vielfaches geringeren BW wurde vermieden, um Variationen gesichert oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze (mit der betreffenden Analytik in der Größenordnung der jeweiligen BW) erfassen zu können.

**Tabelle 2:** Gase und ausgewählte Testkonzentrationen

Gas	$C_{\text{Test}}$ [ppm]	MAK-Wert <sup>2</sup> [ppm]	$BW_{\text{Innenraum}}$ [ppm]	Vorbereitung der Testkonzentration durch
<b>NH<sub>3</sub></b>	~ 24	20–25	< 0,1 <sup>3</sup>	Verdünnung von NH <sub>3</sub> (~ 80 ppm NH <sub>3</sub> in technischer Luft) mit Druckluft (3:10)
<b>CH<sub>4</sub></b>	~ 500	1.000	< 100 <sup>4</sup>	Verdünnung von CH <sub>4</sub> 2.5 (~ 1.000.000 ppm CH <sub>4</sub> ) mit Druckluft (5:10.000)
<b>CO<sub>2</sub></b>	~ 350	5.000	< 1.000 <sup>5</sup>	Verdünnung von technischer Luft (< 1 ppm CO <sub>2</sub> ) mit Druckluft (~ 500 ppm) (3:10)

BW Beurteilungswert

CH<sub>4</sub> Methan

CO<sub>2</sub> Kohlendioxid

MAK maximale Arbeitsplatzkonzentration

NH<sub>3</sub> Ammoniak

## Verhalten von Lehmputz gegenüber Volatile und Very Volatile Organic Compounds

Das Ziel der Auswahl der zu untersuchenden VOC war es, ubiquitäre flüchtige Innenraumsubstanzen zu selektieren, die auch ein Risikopotenzial in Hinblick auf eine AgBB<sup>6</sup>-Beurteilung darstellen bzw. in ihren üblichen Innenraumkonzentrationen zu einer negativen Evaluierung der Luftqualität führen könnten. Das Risikopotenzial wurde hierfür in dieser Arbeit auf Einzelstoffbasis berechnet durch Dividieren der AGÖF-50-Perzentil-Konzentration (AGÖF = Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V.) der Verbindung (AGÖF 2013) durch den AgBB-NIK-Wert (P50/NIK). Dadurch wird die statistische Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Substanz (in einer charakteristischen Konzentration) in der Innenraumluft in Relation zu ihrer toxikologischen Bewertung gesetzt.

Die ausgewählten Substanzen sind in Tabelle 3 angegeben und hinsichtlich ihres charakteristischen Geruchs- und Risikopotenzials beschrieben. α-Pinen wurde in dieser Untersuchung als Leitsubstanz für Nadelholz hinzugenommen, wenngleich das berechnete Risikopotenzial um ein Vielfaches geringer ist als für alle anderen Substanzen. Die versuchstechnische Umsetzung ist in Abb. 1 rechts oben dargestellt. Die Emissionsrate der vorgelegten VOC-Standards wurde durch Perforation der Septen der befüllten Vials bewirkt. In Vorversuchen wurde das jeweilige Perforationsausmaß ermittelt und somit stufenweise ein gewünschtes Emissionsniveau erreicht. Hierdurch erfolgte eine näherungsweise Anpassung der in der Folge konstanten Emission jedes einzelnen Standards. Als Zielwerte wurden hierfür angestrebt: 50 µg/m<sup>3</sup> für Xylol, 120 µg/m<sup>3</sup> für Formaldehyd, 200 µg/m<sup>3</sup> für Hexanal und je 800 µg/m<sup>3</sup> für α-Pinen und Phenol. Diese Größenordnungen ergaben sich als realistische Annahmen für eine Innenraumbelastung z. B. beim Einsatz von Harnstoff-Formaldehydharzgebundenen Holzwerkstoffen bzw. Kiefernholz (Formaldehyd, Hexanal, α-Pinen). Für Phenol wurde 1/10 des MAK-Wertes (8 mg/m<sup>3</sup>) angestrebt und für Xylol wurde

<sup>2</sup> MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration, GESTIS International Limit Values, abgerufen am 12.02.2018

<sup>3</sup> RAL-UZ 176 (2013)

<sup>4</sup> Annahme

<sup>5</sup> ÖNORM EN 13799 (2012) (RAL3 – mittlere Raumluftqualität)

<sup>6</sup> AgBB = Ausschuss für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten

**Tabelle 3:** Ausgewählte Innenraumsubstanzen

Substanz	Geruch	typische Quelle	Relevanz	Risikopotenzial
<b>Formaldehyd</b>	stechend	Bindemittel, Einrichtung, Bauprodukte	krebsfördernd in hohen Konzentrationen	35
<b>Hexanal</b>	ranzig	Möbel, Öle, Lebensmittel	Leitsubstanz Aldehyde	1
<b>Benzol (versuchstechnisch ersetzt durch Xylool)</b>	nach Lösemittel	Rauchen, unvollständige Verbrennungsprozesse	krebsfördernd	> 95
<b>α-Pinen</b>	nach Nadelholz	Möbel, Baumaterialien, Reinigungsmittel	Leitsubstanz Nadelholz	<< 1
<b>Phenol</b>	aromatisch	Kunststoff, Desinfektionsmittel, wasserfeste Bindemittel	mutagen; Leitsubstanz Phenole, Kresole	10

ein Level eingestellt, bei welchem eine adäquate Signal-Noise-Ratio (SNR) erreicht wurde.

### Verhalten von Lehmputz gegenüber Luftfeuchteänderungen

Mittels FLEC-Kammer wurde die luftfeuchteregulierende Wirkung von Lehmputz untersucht. Hierfür wurden bei 23 °C beginnend von 65 % schlagartig eine Luftfeuchte von 35 % eingestellt und diese über 150 Stunden gehalten. Danach wurde die Luftfeuchte schlagartig wieder auf 65 % eingestellt und ebenfalls für 150 Stunden gehalten. Der Versuch wurde im leeren Zustand wie auch beladen mit einer bei den Anfangsbedingungen konditionierten Lehmputz-Probe durchgeführt.

### Scavenger

Die untersuchten Scavenger wurden basierend auf einem EPA-Leitfaden ausgewählt (EPA = Environmental Protection Agency) (Clean Air Technology Center [MD-12] 1999). Vier Kriterien wurden hierbei herangezogen: a) Information über die Eignung als VOC-Sorbent, b) industrielle Verfügbarkeit, c) Polarität und Porengröße sowie d) Preis. Dies führte zu der in Tabelle 4 beschriebenen Auswahl.

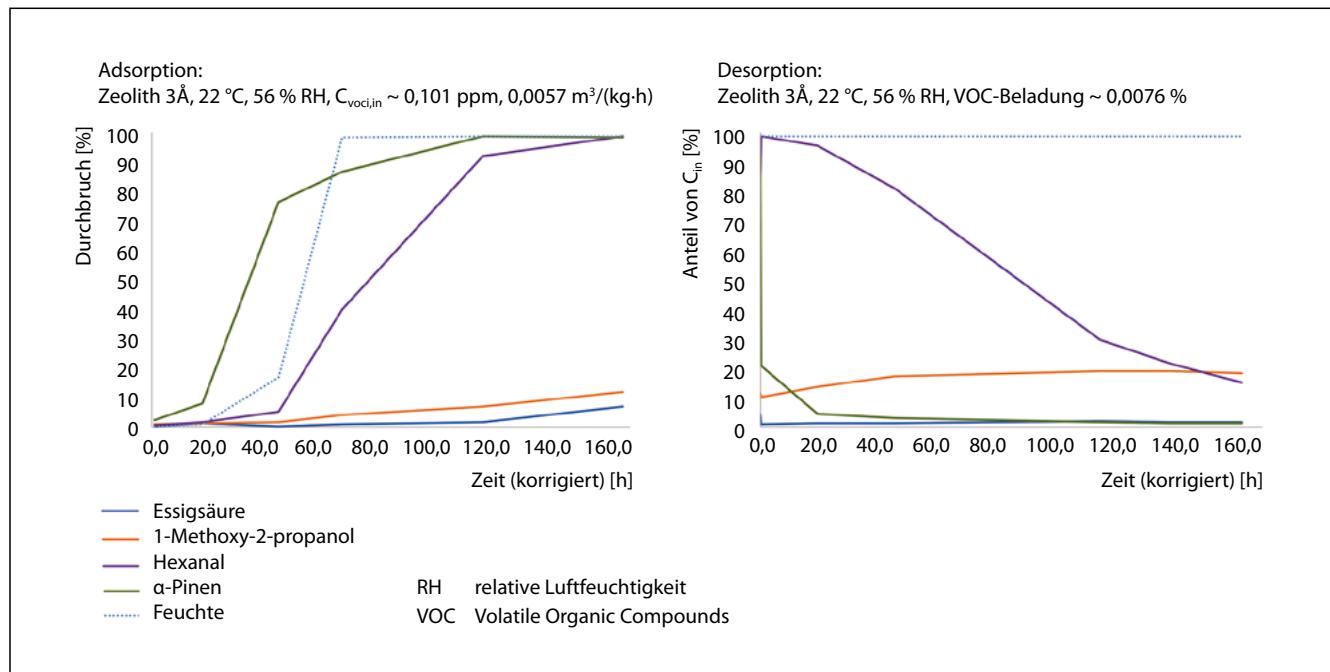
**Tabelle 4:** Übersicht untersuchter Sorptionsmaterialien

Abkürzung	Porengröße	Bezeichnung	Lieferant
<b>Z3Å</b>	~ 3,0 Å*	Zeolith 3Å	CWK (Köstrolith 3AK)
<b>β-CD</b>	7,5 Å**	β-Cyclodextrin-7	Sigma (W402826-25G)
<b>AK d.</b>	5–40 Å***	Aktivkohle dampfaktiviert, ~ 3 mm	ROTH (0998.3)
<b>SG-EP</b>	< 100 Å*	Silikagel engporig	Oker-Chemie (SIO-02)

\* Datenblatt  
\*\* Sigma-Aldrich (2002)  
\*\*\* Sethia und Sayari (2016)

### Verhalten von Scavengern gegenüber Volatile Organic Compounds in Schnelltests

Als Grundlage für die Auslegung der in den Schnelltestversuchen zu untersuchenden Substanzen wurden in mehreren realen Gebäuden Innenraumluftmessungen durchgeführt, um die dort vorhandenen VOC qualitativ und quantitativ zu erfassen. Anhand dieser Ergebnisse wurden folgende Substanzen für die Zugabe während der Versuche ausgewählt: Essigsäure, 1-Methoxy-2-propanol, Hexanal und α-Pinen. Die Auswahl erfolgte dabei einerseits über



**Abb. 3:** Beispiel für die Konzentrationsänderungen bei einem Adsorption/Desorption-Zyklus im Schnelltest

die am häufigsten gemessenen Substanzklassen (Säuren, Alkohole, Aldehyde und Terpene) sowie über die in den einzelnen Messungen gefundenen Mengen dieser Substanzen. Dabei wurden im Vergleich zu realen Innenraumluftverhältnissen im Schnelltest relativ hohe Substanzmengen zugegeben, um eine Reaktion der Materialien zu erzielen. Die Zuluftkonzentrationen der getesteten Substanzen wurden dabei auf  $\sim$  je 0,1 ppm eingestellt. Durch die Verwendung eines selbstentwickelten Setups zur Generierung von VOC-beladenen Luftströmen, basierend auf Kapillardiffusion (siehe Abb. 1 unten), wurde eine gute Kontrolle über die Konzentrationseinstellungen erzielt.

Die Schnelltests wurden mit je 20 g Scavenger-Granulat bei  $\sim$  23 °C,  $\sim$  50 % relativer Luftfeuchtigkeit (RH) und bei einem Durchfluss von  $\sim$  105 ml/min durchgeführt.

Als Vorbereitung für die Schnelltests mittels FLEC-Kammer wurden der ausgewählte Zeolith und das Silikagel vor den Versuchen für  $\sim$  20 Stunden bei 180 °C konditioniert. Es gilt die Annahme, dass sie damit von etwaigen anhaftenden VOC weitestgehend befreit wurden. Bei Aktivkohle wurde keine Konditionierung durchgeführt, da dieses Material herstellerseitig als „dampfaktiviert“ be-

zeichnet war.  $\beta$ -CD wurde in seiner originalen Verpackung ungeöffnet bis zum Versuchsstart gelagert. Aufgrund der unbekannten thermischen Stabilität dieses Materials wurde es ebenfalls nicht thermisch konditioniert.

Im Schnelltest wurde jeweils die Adsorption (Aufnahme der vorgelegten VOC) über eine Woche und unmittelbar danach für eine Woche ihre Desorption (Wiederabgabe dieser VOC) untersucht. Dabei wurde bei der Adsorption die in der Zuluft enthaltene Menge an Substanzen ( $\sim$  0,1 ppm) als 100 % definiert. Erreichte die in der FLEC-Kammer gemessene Luft diesen Wert von 100 % einer Substanz, so wurde diese Substanz nicht bzw. nicht mehr von dem enthaltenen Scavenger-Material adsorbiert. Bei 0 % des VOC in der Messzellenluft wurde die Substanz dagegen vollständig vom Material zurückgehalten. Liegt die Desorptionskurve der Verbindung dann ebenfalls bei 0 %, so wurde diese Substanz (zumindest ohne Veränderung der Umgebungsbedingungen) stabil an den Scavenger gebunden und nicht wieder an die Luft der Messzelle abgegeben.

Der Zeolith 3Å (siehe Abb. 3) zeigte z. B. für Essigsäure und 1-Methoxy-2-propanol ein gutes und für Hexanal ein

**Tabelle 5:** Parameter für die Prüfkammeruntersuchung mit den Scavengern

Parameter	Werte	
Scavenger	Aktivkohle	Silikagel
<b>Modellraumvolumen [m<sup>3</sup>]</b>	30	
<b>Soll-Scavenger-Volumen im Modellraum [m<sup>3</sup>]</b>	0,15	0,15
<b>Schüttdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	515	977
<b>Menge im Modellraum [kg]</b>	77	147
<b>Prüfkammervolumen [m<sup>3</sup>]</b>	0,225	0,225
<b>spezifische Beladung (m/V) [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2,6	4,9
<b>spezifische Beladung (V/V) [l/m<sup>3</sup>]</b>	5,0	5,0
<b>notwendige Menge an Scavenger in der Prüfkammer [kg]</b>	0,58	1,10

etwas geringeres Adsorptionsverhalten.  $\alpha$ -Pinen wurde im Vergleich eher schlecht adsorbiert. Die aufgenommene Menge an Hexanal wurde vom Zeolithen nahezu vollständig wieder abgegeben, sobald reine Luft zugeführt wurde.

### Verhalten von Scavengern gegenüber Volatile Organic Compounds in Prüfkammer- und Realraumversuchen

Aufgrund der in den Schnelltests ermittelten Adsorptions-/Desorptionseigenschaften wurden die 2 besten Materialien für die Durchführung der Langzeitversuche in den Emissionskammern sowie für die Realraumversuche ausgewählt. Auch in diesen Versuchen wurde das Silikagel konditioniert und die Aktivkohle nicht. Bei den Prüfkammerversuchen wurden sowohl das Adsorptions- als auch das Desorptionsverhalten der Materialien untersucht.

Bei der Auswahl der Menge an Scavenger-Material spielte bei diesen Untersuchungen das Volumen (und nicht die Masse) eine übergeordnete Rolle. Als theoretische Ausgangssituation bei den Prüfkammerversuchen wurde ein Modellraum mit 30 m<sup>3</sup> Volumen und aus analytischen Gründen eine überproportionale Menge von 150 l an Scavenger ausgewählt (siehe Tabelle 5). Rechnerisch ergab

sich somit die hier gegebene Scavenger-Sollmenge für die Kammerversuche. Beide Prüfkammern wurden bei 23 °C, 50 % RH und Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup> betrieben. Die Adsorptionsversuche wurden für eine Dauer von 23 Tagen und die Desorptionsversuche für 29 Tage durchgeführt.

Im Zuge der Realraumversuche wurde in 3 nebeneinanderliegenden Räumen eines Einfamilienhaus-Neubaus in Holzbauweise (inklusive mineralischer Baustoffe) Messungen durchgeführt. Die Räume waren in Richtung Nord-nordwest (NNW) ausgerichtet. Alle Räume waren fertiggestellt (gemalert, Laminatfußboden verlegt) und 2 der Räume waren teilweise möbliert. Die Räume wurden während der Messreihe von den Bewohnern mehrmals pro Woche, immer gleichzeitig und gleich lange stoßgelüftet. Es war keine technische Lüftungsanlage installiert. Zu Beginn der Messreihe wurde der VOC-Ausgangswert der einzelnen Räume gemessen. In 2 Räumen wurden die durch die Schnelltests ausgewählten Scavenger-Materialien (Aktivkohle ~ 11,4 kg, Silikagel ~ 22,7 kg) jeweils in einem stark reduzierten Ausmaß im Vergleich zum Prüfkammerversuch mit einer dem Raum zugewendeten Fläche von 0,4 m<sup>2</sup> in flachen Behältern auf Bodenhöhe aufgestellt. Nach Einbringung der Scavenger-Materialien erfolgten 3 Messungen im Abstand von je 7 bis 8 Tagen. Die Sorption

**Tabelle 6:** Raumbeschreibung, Raumklima (basierend auf kontinuierlichen Messungen, n = 1.055) und eingesetzte Scavenger

Zimmer-Nr.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Höhe [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	T Mittelwert ± Standardabweichung [°C]	RH Mittelwert ± Standardabweichung [%]	Scavenger
2	12,15	2,7	32,8	19,2 ± 0,7	46,8 ± 2,9	Aktivkohle
3	16,11	2,7	43,5	21,7 ± 0,7	42,6 ± 2,6	Referenz
4	14,40	2,7	38,9	19,3 ± 0,9	39,5 ± 2,2	Silikagel

RH relative Luftfeuchtigkeit

T Temperatur

erfolgte passiv und eine Durchmischung des Scavengers erfolgte jeweils manuell an den Tagen der Luftprobenahmen. Die Raumbeschreibung ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

## Ergebnisse und Diskussion

### Verhalten von Lehmputz gegenüber extremflüchtigen Substanzen in Schnelltests

Der zeitliche Verlauf der Analytenkonzentrationen in der FLEC-Kammer mit und ohne Lehmputz-Probe ist für Ammoniak in Abb. 4 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Einbringen der Probe in die FLEC-Kammer zu einer relevanten Reduktion der Ammoniak-Belastung des Gasstroms führte, wobei die Reduktion ( $\Delta C$ ) ~ ab Stunde 50 bis zum Ende der Probenexposition (~ Stunde 114) ziemlich konstant blieb. Ein rapider Abfall trat unmittelbar nach Einbringen der Probe auf.

#### Die durchschnittliche Reduktion der Ammoniakkonzentration in der FLEC-Kammer für diese Periode betrug 93%.

Nach Probenausbau erhöhte sich die Ammoniakkonzentration zurück auf ihren Ausgangswert.

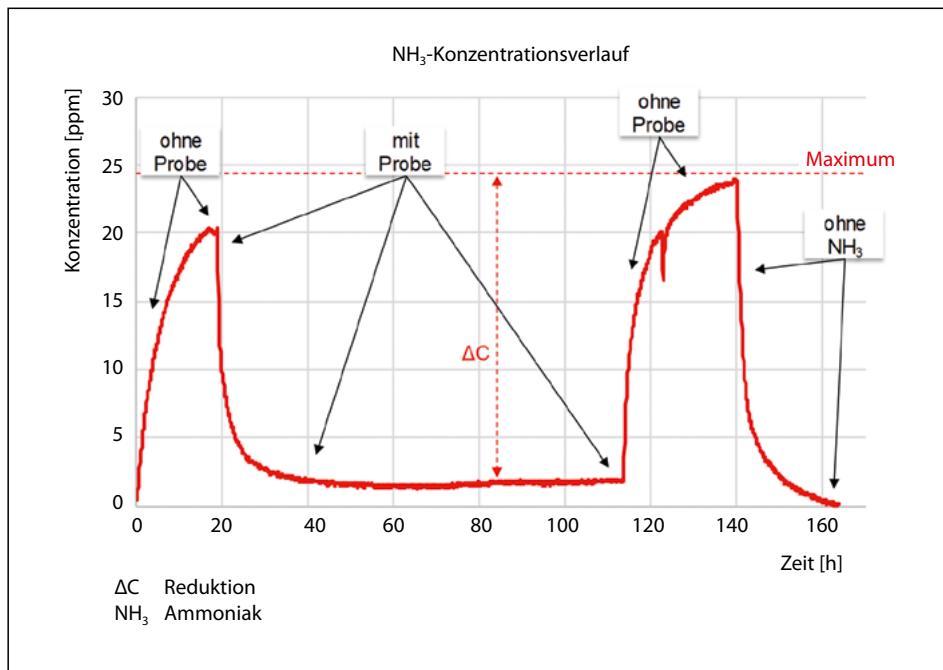
Bei den anderen 2 getesteten Gasen (Methan und Kohlendioxid) wurden keine relevanten Veränderungen im Vergleich zur Anfangskonzentration durch das Einbringen der Probe in die FLEC-Kammer beobachtet (ohne Abbildung). Es ist anzunehmen, dass Lehmputz bei den Bedingungen des Versuchs keine Affinität zu diesen Substanzen aufweist.

### Verhalten von Lehmputz gegenüber Volatile und Very Volatile Organic Compounds in Schnelltests

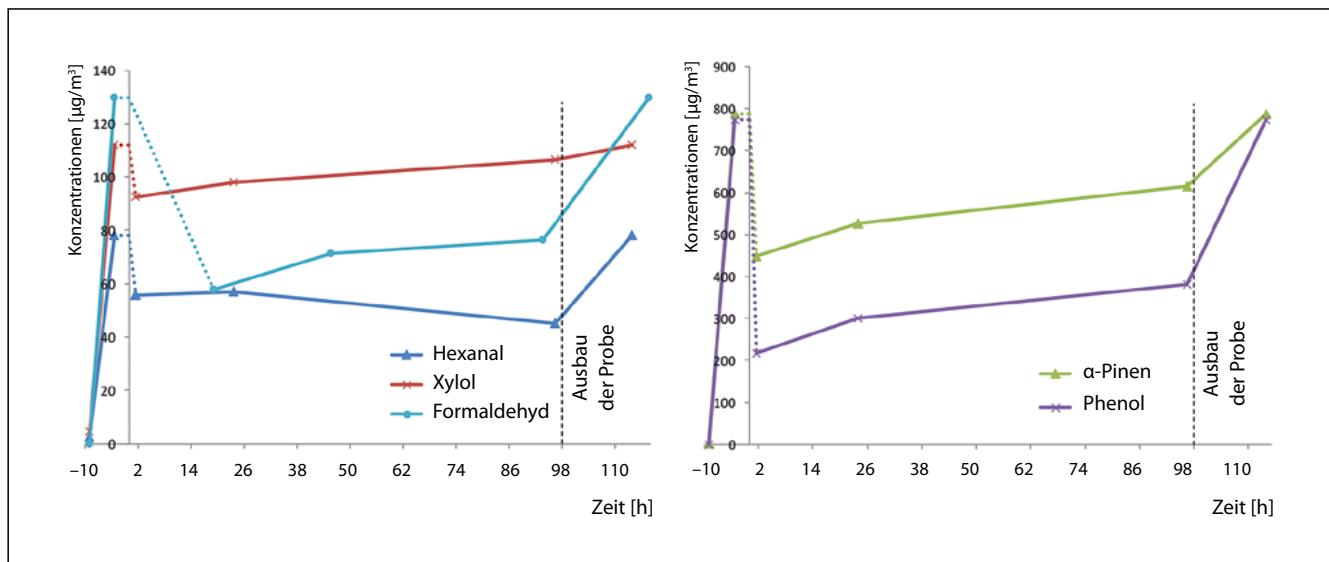
Der zeitliche Verlauf der VOC- und Formaldehyd-Konzentrationen in der FLEC-Kammer ist in Abb. 5 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Einbringen der Probe in die FLEC-Kammer zu relevanten Reduktionen bei allen getesteten Substanzen führte. Über die Versuchsdauer näherten sich die Konzentrationen von Xylol, Formaldehyd,  $\alpha$ -Pinen bzw. Phenol in der FLEC-Kammer den Ausgangswerten wieder an, ohne sie jedoch zu erreichen. Bei Hexanal wurde sogar eine fallende Konzentration über die Versuchsdauer beobachtet. Nach Probenausbau erhöhten sich die Konzentrationen sprunghaft zurück auf ihre Ausgangswerte, was auch die Stabilität des Messaufbaus unterstreicht.

Die Affinität des Probenmaterials zu den einzelnen getesteten Substanzen wurde bestimmt, indem deren Konzentrationsreduktion relativ zum Ausgangswert betrachtet wurde (ohne Abbildung). Die Materialaffinität (MA) zu den flüchtigen Substanzen verringerte sich mit der Zeit, was sich mit der Materialsättigung mit den zu untersuchenden Substanzen erklären lässt. Bei MA<sub>Hexanal</sub> blieben die Messwerte über eine lange Zeit relativ unverändert und erhöhten sich erst zu Versuchsende. Die MA des untersuchten Lehmputzes zu den getesteten Substanzen lässt sich in der Reihenfolge wie folgt darstellen:

$$MA_{Xylol} < MA_{Hexanal} < MA_{\alpha\text{-Pinen}} < MA_{Formaldehyd} < MA_{Phenol}$$



**Abb. 4:** Änderung der Ammoniak-Konzentrationen mit der Zeit im Schnelltest von Lehmputz



**Abb. 5:** Änderung der Konzentrationen der getesteten Substanzen mit der Zeit im Schnelltest von Lehmputz

## Verhalten von Scavengern gegenüber Volatile Organic Compounds in Schnelltests

In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Sorptionsversuche mit VOC-Gemischen für die ausgewählten Scavenger dargestellt. Der erste Balken zeigt jeweils, wie stark die VOC durch den Scavenger aufgenommen wurden. Der zweite Balken zeigt dazu, wie stark die aufgenommenen VOC durch die Scavenger zurückgehalten wurden. Nahezu gleich hohe Balken bedeuten demnach eine etwa vergleichbare Aufnahme- und Rückhaltekapazität der Scavenger. Aktivkohle besaß demnach mit 99 % Rückhalteeffizienz das beste Potenzial zur Verwendung als Scavenger, gefolgt von Silikagel engporig (92 %).

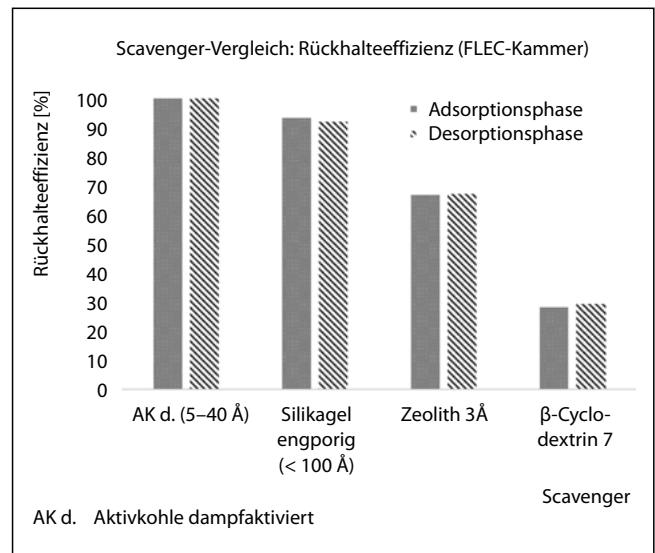
**Beide Materialien nehmen daher hohe Mengen VOC auf und geben diese nur zu einem sehr geringen Ausmaß wieder ab.**

Aufgrund ihrer guten Adsorptions-/Desorptionseigenschaften wurden diese 2 Materialien für die Realraumversuche ausgewählt. Die beiden anderen Scavenger wurden wegen ihres wesentlich geringeren Aufnahmepotenzials und der vergleichsweise hohen Wiederabgabe der VOC von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

## Verhalten von Scavengern gegenüber Volatile Organic Compounds in Prüfkammerversuchen

Die Abb. 7 zeigt das Sorptionsverhalten der beiden in den Schnelltests ausgewählten Scavenger während der Langzeitversuche in den Prüfkammern. In der Adsorptionsphase ist ersichtlich, dass Aktivkohle bereits frühzeitig keine Luftfeuchte mehr aufnahm. Es kam demnach sehr bald zu einem nahezu vollständigen Durchbruch der Luftfeuchte. Im Gegensatz dazu wurden die vorgelegten VOC über die gesamte Versuchsdauer sehr gut adsorbiert, womit es diesbezüglich lediglich zu einem Durchbruch je nach Substanz von ~ 5 bis 25 % kam. Hexanal wurde hier am besten aus der Luft entfernt und  $\alpha$ -Pinen am schlechtesten.

Silikagel zeigte hingegen ein graduelles Aufnahmeverhalten gegenüber der Luftfeuchte mit einer anfänglichen, starken Aufnahme aufgrund der vorangegangenen Kondi-



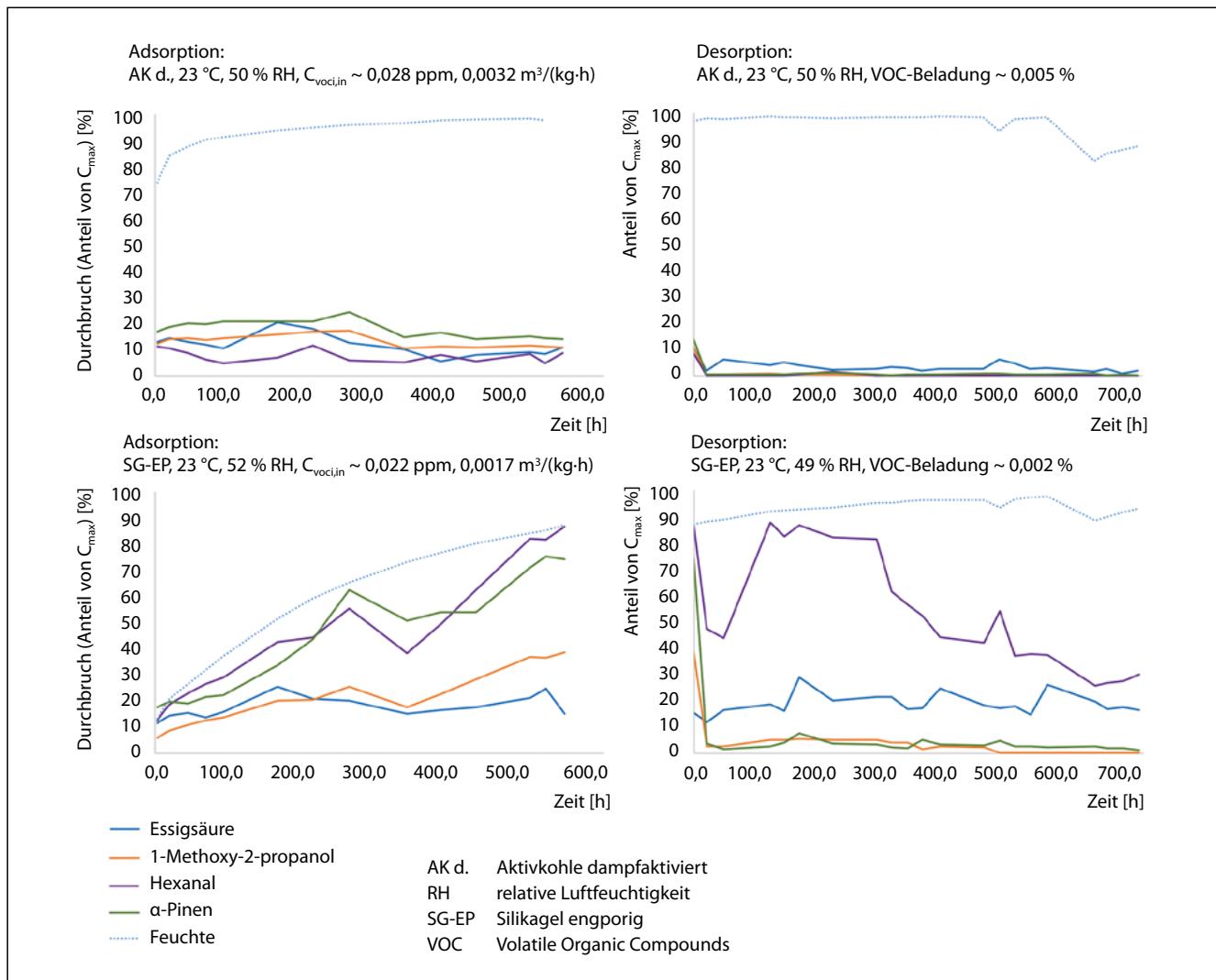
**Abb. 6:** Wirkungsgrad der Scavenger gegenüber dem vorgelegten VOC-Substanzgemisch in der Adsorptionsphase (grau) und deren Abgabe bei der Desorption (gestreift)

tionierung. Die Sorptionswirkung des Silikagels war lediglich zu Versuchsbeginn etwa vergleichbar effektiv wie jene der Aktivkohle. Besonders für Hexanal und  $\alpha$ -Pinen stieg die Durchbruchsmenge nahezu kontinuierlich und lag z. B. nach 10 Tagen bereits bei ~ 50 % und bei Versuchsende bei etwa 70 bzw. 80 % der zugeführten Substanzmenge. Silikagel zeigte die beste und stabilste Aufnahmefähigkeit gegenüber Essigsäure, schnitt aber auch hier besonders in der zweiten Versuchshälfte etwas schlechter als die Aktivkohle ab.

Für die grafische Darstellung wurde als Startpunkt der Desorptionsversuche der Endwert des Adsorptionsversuches jeder Substanz festgelegt, um einen Vergleichswert zum Sorptionsversuch darzustellen. Der erste Abfall der Messdaten ist daher dadurch bedingt, dass die Emissionsquellen aus den Kammern entfernt wurden und sich erst ein neues Gleichgewicht einstellen musste.

Die aufgenommenen VOC wurden sehr gut zurückgehalten. So war die Abgabe von Essigsäure gering (im einstelligen Prozentbereich) und für die anderen Substanzen weitestgehend vernachlässigbar.

Bei Silikagel wurde eine geringe Abgabe, jedoch über dem Niveau von Aktivkohle, für  $\alpha$ -Pinen und 1-Methoxy-2-propanol beobachtet. Essigsäure wurde in einem Ausmaß von etwa 20 bis 30 % wieder abgegeben, Hexanal vor



**Abb. 7:** Zeitlicher Verlauf der Adsorption (links) und Desorption (rechts) von Aktivkohle (oben) und Silikagel (unten) ausgewählter VOC

allem in der ersten Versuchshälfte in einem sehr hohen Ausmaß von fast bis zu 90 %.

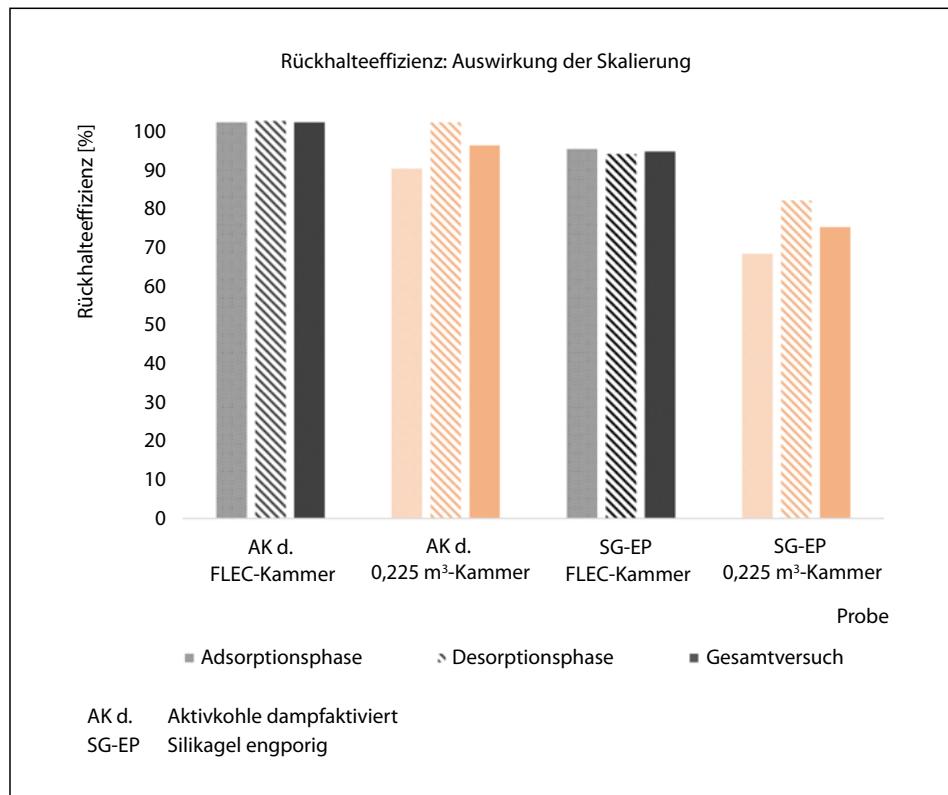
Somit zeigte die untersuchte Aktivkohle gegenüber dem Silikagel insgesamt ein höheres Potenzial für die effiziente Verringerung der VOC-Konzentrationen in der Raumluft. Auch der Effekt, dass beispielsweise Hexanal im Vergleich zu α-Pinen durch die Aktivkohle stärker aufgenommen wird, könnte helfen, Fehlgerüche im Holzbau gezielt zu reduzieren und dabei den zumeist positiv assoziierten Nadelholzgeruch (vor allem durch α-Pinen bedingt) in einem ausreichenden Ausmaß zu erhalten.

Die Abb. 8 vergleicht die Ad- und Desorptionsversuche für Aktivkohle und Silikagel nach den beiden Untersu-

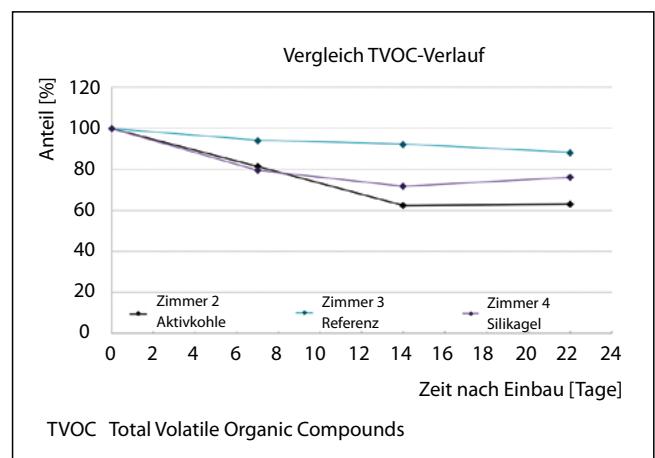
chungsvarianten Schnelltest (grau) und Langzeitversuch (orange). Im Vergleich zu Abb. 6 kommt jeweils auch noch ein weiterer Balken (gesättigte Farbe) für die jeweilige Gesamtbewertung hinzu. Für die beiden Schnelltests zeigt er einen sehr hohen Wirkungsgrad (hohe Aufnahme und geringe Abgabe).

**Der Vergleich zwischen Schnelltest und Langzeitversuch zeigt einen merklichen Skalierungseffekt für die Sorptionseffizienz.**

Aktivkohle zeigte im Langzeitversuch eine etwas geringere Adsorption als im Schnelltest, jedoch eine durchweg hohe Rückhalteeffizienz. Somit ergab sich im Langzeitversuch noch immer eine Sorptionseffizienz von 93 %. Bei



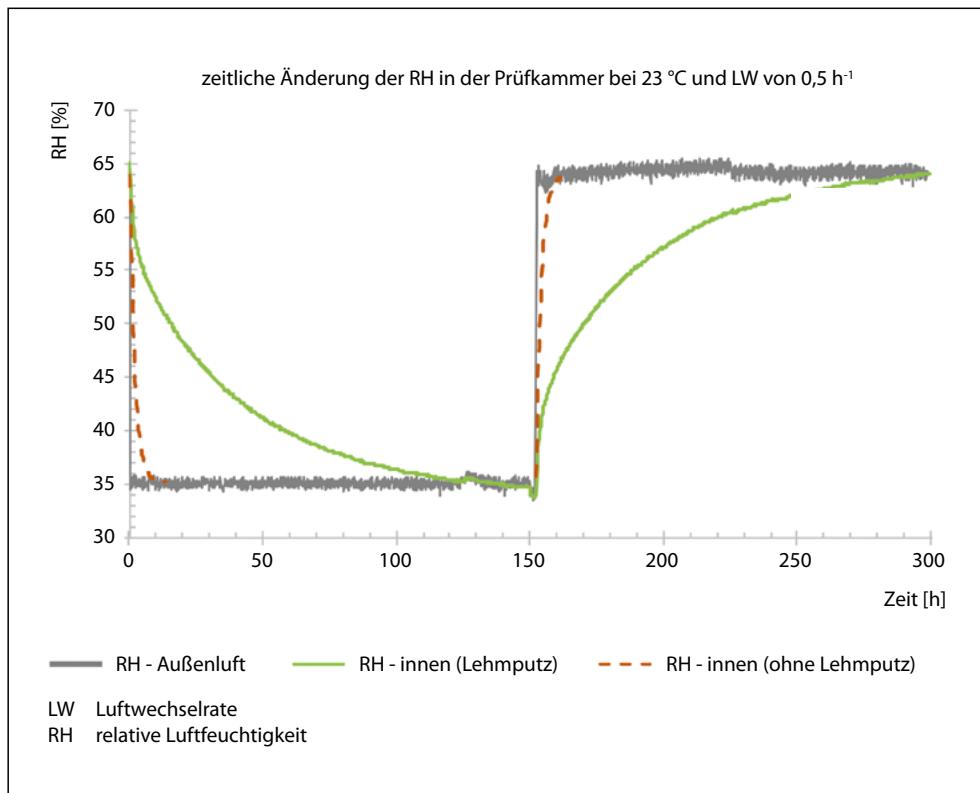
**Abb. 8:** Wirkungsgrad der Scavenger in den Schnelltest- und Langzeitversuchen



**Abb. 9:** Zeitliche Entwicklung des TVOC in den 3 Realräumen und Auswirkung der Scavenger

Die Auswirkung der Scavenger auf die zeitliche TVOC-Entwicklung in den realen Räumen eines neu errichteten Holzbau ist in Abb. 9 dargestellt. Gegenüber den Langzeit-Prüfkammerversuchen wurde die Scavenger-Beladung weiter reduziert. Während in den Prüfkammerversuchen der Fokus auf der Funktionalität lag, wurde in der Real-

raumanwendung eine realistisch anwendbare Menge sowohl aus organisatorischer Sicht wie auch in Hinblick auf die Material- und Regenerierkosten gewählt. Die einzelnen Räume wiesen außerdem die in Tabelle 6 dargestellten Unterschiede auf. Dennoch bestätigt dieser Versuch in der Praxis die Ergebnisse der Schnelltests und der Langzeitver-



**Abb. 10:** Feuchtregulierende Wirkung von Lehmputz

suche. Im Referenzraum kam es über die Versuchsdauer von 22 Tagen zu einer Abnahme des TVOC von etwa 10 %.

**In jenem Raum, wo das Silikagel eingebracht wurde, war die Abnahme des TVOC gegenüber dem Referenzraum um etwa 15 % und im Raum mit Aktivkohle um etwa 25 % erhöht.**

Die Effektivität dieses passiven Luftverbesserungsansatzes ist auch in Einklang mit Pei und Zhang (Pei und Zhang 2010), die einen weit wichtigeren Einfluss der Oberflächendiffusion im Vergleich zur Porendiffusion für artverwandte Anwendungen feststellten.

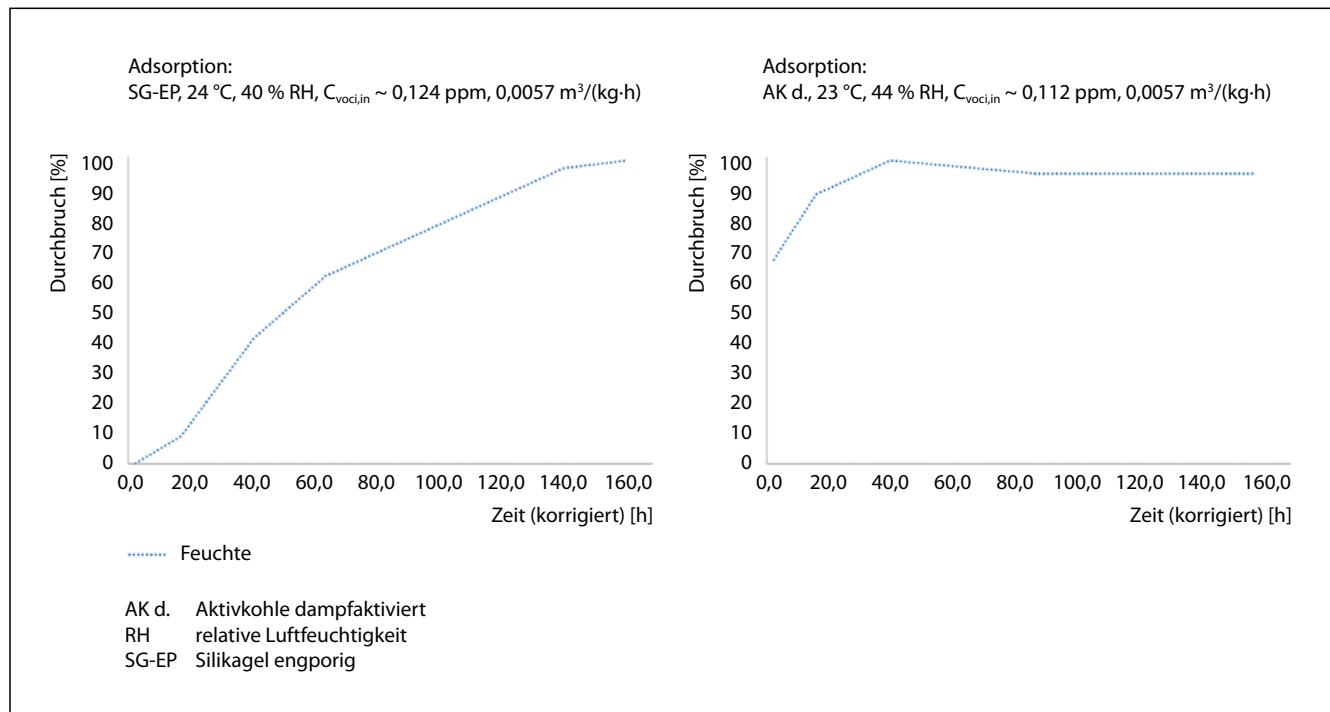
Für beide Scavenger-Materialien ist zu erkennen, dass bereits nach 14 Tagen eine Verringerung der Sorptionseffizienz erreicht wurde, die durch eine Absättigung der oberen Schüttungsschichten mit VOC bedingt war. Im Fall des Silikagels könnte der leichte Anstieg zu Versuchsende auch auf einen gewissen Desorptionseffekt hinweisen. Es ist damit auch zu erkennen, dass die eingesetzten Scavenger-Mengen in Relation zur Raumgröße eher die Untergrenze für eine effektive Wirkung darstellen. Für einen länger anhaltenden oder stärker ausgeprägten Effekt müsste dem-

nach die Beladung erhöht werden bzw. auch die Umwälzung häufiger erfolgen oder die exponierte Oberfläche vergrößert werden. Idealerweise sollte die Scavenger-Menge jeweils auf eine einmalige Anwendung abgestimmt sein und im Anschluss eine Regeneration bzw. Konditionierung erfolgen.

### Betrachtungen zur Auswirkung von Sorptionsmaterialien auf die Behaglichkeit

Die Ergebnisse aus dem Schnelltest zur Auswirkung von Lehmputz auf die Luftfeuchteentwicklung sind in Abb. 10 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Lehmputz über einen langen Zeitraum das Potenzial hat, das Raumklima im behaglichen Bereich zu halten. Im Zuge einer üblichen Tagesamplitude der Luftfeuchteschwankung, wie auch bei kurzfristig auftretenden Veränderungen der Luftfeuchte, ist eine stark ausgeprägte feuchteregulierende Wirkung innerhalb des Komfortbereichs gegeben.

Die Auswirkung von Silikagel und Aktivkohle auf die Luftfeuchtigkeit könnte mit Hilfe der Durchbruchdia-



**Abb. 11:** Auswirkung von Scavengern auf die Luftfeuchte

gramme (siehe Abb. 11) erläutert werden. Aufgrund der thermischen Konditionierung des Silikagels kam es besonders zu Versuchsbeginn zu einer starken Feuchteaufnahme, die sich nach etwas mehr als 6 Tagen weitestgehend erschöpfte. Aktivkohle zeigte nur eine geringe Auswirkung auf die Luftfeuchte, da die Dampfaktivierung offenbar bereits eine Sättigung mit sich brachte. Nach 40 Stunden konnte nur noch eine unwesentliche Feuchteaufnahme beobachtet werden. Dies legt nahe, dass dampfaktivierte Aktivkohle als Scavenger besser geeignet ist als konditioniertes Silikagel, da der unerwünschte Effekt der Luftfeuchtereduktion bei normalem Raumklima und erst recht bei geringer Luftfeuchte geringer ausfällt. Dies und das zuvor beschriebene Verhalten von Aktivkohle in der Desorptionsphase zeigen, dass dampfaktivierte Aktivkohle eine artverwandte luftfeuchteregulierende Wirkung wie Lehmputz hat.

Um für Silikagel ebenfalls eine derartige Wirkung zu erzielen, könnte eine Konditionierung z. B. bei 50 % für ~ 160 Stunden erfolgen. Dies hätte jedoch im Gegenzug eine Reduktion der Sorptionsfähigkeit gegenüber VOC zur Folge (siehe Abb. 13).

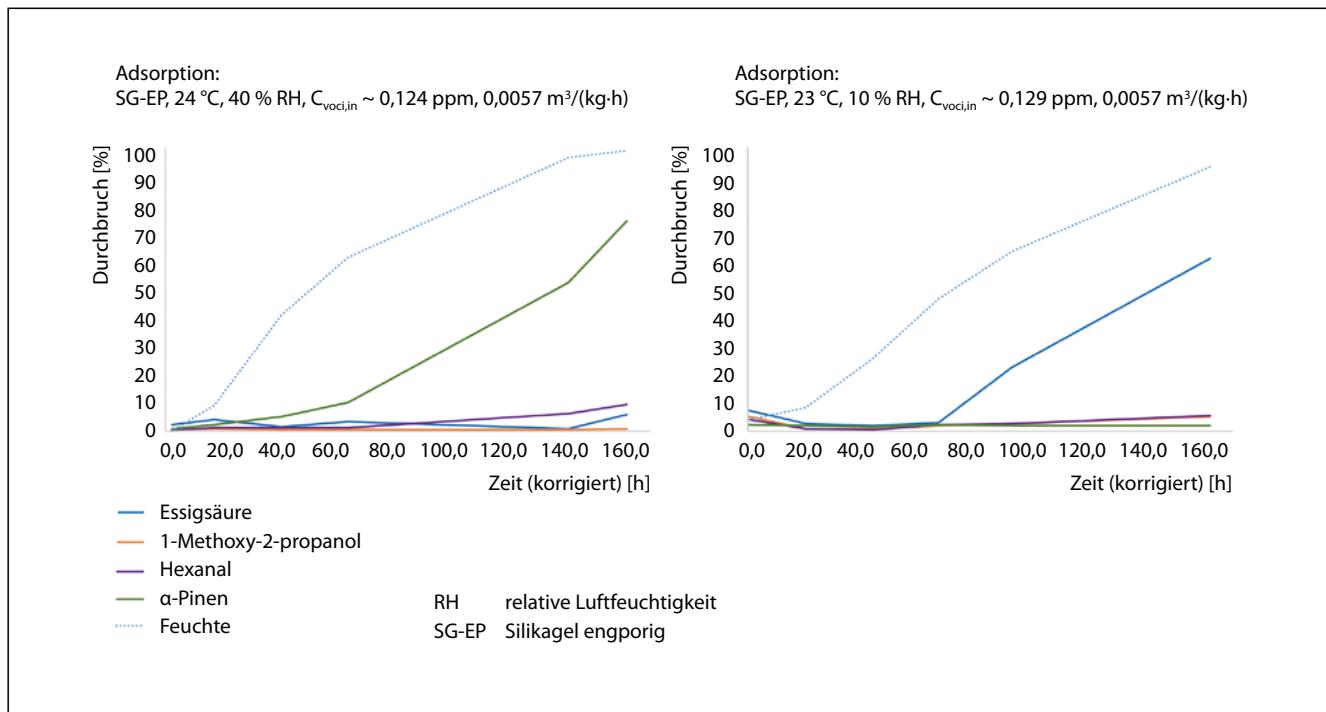
### Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Selektivität und Rückhalteeffizienz

Die Abb. 12 zeigt einen Vergleich des Adsorptionsverhaltens von Silikagel bei 40 % RH (links) und 10 % RH (rechts). Diese Ergebnisse der Schnelltests unterscheiden sich wesentlich von den Ergebnissen aus Abb. 7, wo in Langzeitversuchen in Normkammern die Luftfeuchte bei 52 % lag, eine etwa fünffach geringere VOC-Konzentration vorgelegt und ein ungefähr dreifach geringerer masenspezifischer Luftwechsel gewählt wurde.

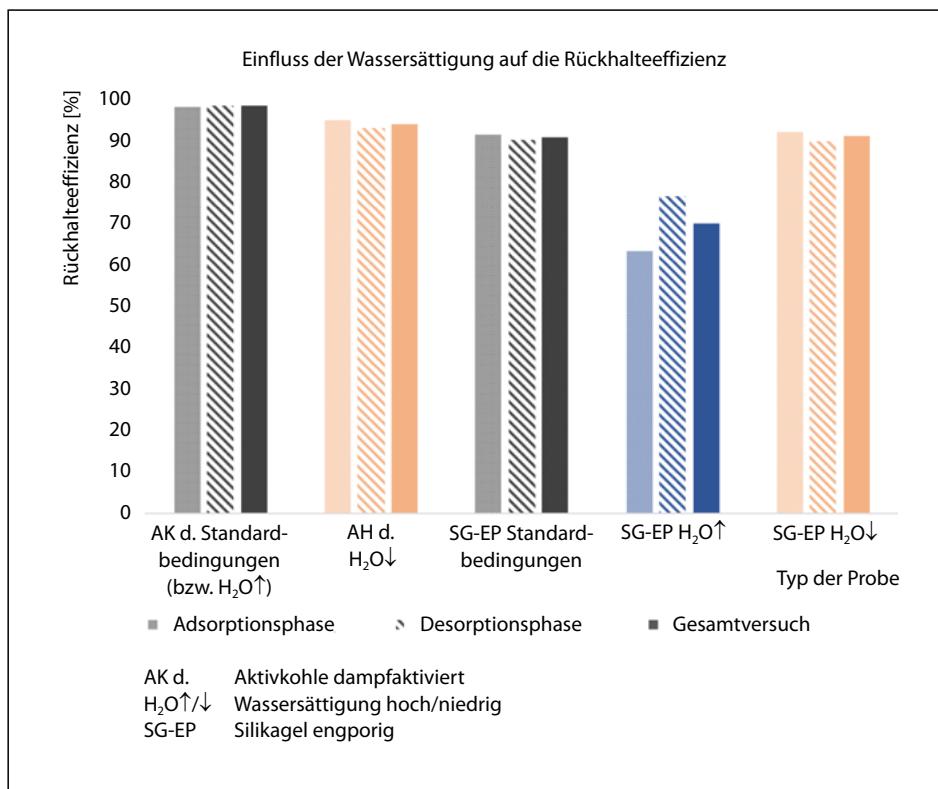
Aus den Untersuchungsbedingungen im Schnelltest kann der Schluss gezogen werden, dass die Poresättigung von Silikagel mit Wassermolekülen eine entscheidende Rolle bei der VOC-Selektivität dieses Scavengers spielt.

**Bei einer höheren Wassersättigung werden eher die polaren Substanzen (wie Essigsäure) adsorbiert (es ist nur ein geringer Durchbruch feststellbar) und bei einer niedrigen Wassersättigung werden die apolaren Substanzen (wie  $\alpha$ -Pinen) adsorbiert.**

Es ist daher anzunehmen, dass es einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Selektivität des Sorptions-



**Abb. 12:** Selektivität der VOC-Adsorption von Silikagel (engporig) bei unterschiedlichen RH



**Abb. 13:** Auswirkung der Wassersättigung von Scavengern auf deren Effizienz, VOC zu binden

verhaltens von Silikagel gibt, der zumindest durch Luftfeuchte, Expositionsdauer, Porengröße und Substanzmischung bestimmt wird. Ungeachtet der hier beschriebenen Selektivität wurde jedoch kein Einfluss auf die Sorptionseffizienz bei geringer Luftfeuchte festgestellt. Die Abb. 13 vergleicht die Effizienz der Scavenger Aktivkohle und Silikagel in Abhängigkeit von deren Feuchtebeladung. Die Ergebnisse aus Abb. 8 dienen hier als Bezugspunkt und sind in Grau/Schwarz dargestellt. Silikagel bei geringer Feuchtebeladung (orange, ganz rechts) zeigte somit dieselbe Rückhalteeffizienz wie bereits zuvor beschrieben. Aktivkohle zeigte eine geringfügig reduzierte Rückhalteeffizienz unter reduzierter Feuchtebeladung (orange, links), lag jedoch auch hier knapp über jener von Silikagel. Bei einer Erhöhung der Anfangswassersättigung von Silikagel durch Konditionieren bei 50 % für 160 Stunden wurde die Rückhalteeffizienz jedoch merklich reduziert (blau). Die Ursache hierfür ist unter diesen Bedingungen die viel geringere Selektivität gegenüber  $\alpha$ -Pinen und Hexanal (ohne Abbildung). Ähnliche Luftfeuchteabhängigkeiten des Sorptionsverhaltens von porösen Baustoffen sowie Kalziumsilikat gegenüber VOC wurden auch von Xu und Zhang (Xu und Zhang 2011) berichtet.

## Überlegungen zur Praxistauglichkeit

So es zulässig ist, ist das Ablüften von Luftinhaltsstoffen, die sich in geschlossenen Räumen ansammeln, immer eine sinnvolle Lösung. Werden erhöhte Ansprüche an die Luftqualität gestellt und ist nicht die Zeit oder Möglichkeit gegeben, Luftinhaltsstoffe im Zuge der regulären Lüftung ausreichend zu reduzieren, wurden hier mit Lehmputz und Scavengern 2 passive Systeme mit hohem Anwendungspotenzial untersucht.

Auf Schadensfälle und Probleme in Hinblick auf toxische oder CMR-Substanzen (CMR: engl. für krebserregend, mutagen, reproductionstoxisch) wurde an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen.

## Lehmputz

Allgemein zeigt sich, dass Lehmputz ein hohes Potenzial zur Regelung der Innenraumluftqualität aufweist.

**Sowohl bei steigender als auch bei sinkender Luftfeuchte wird durch Lehmputz der behagliche Bereich über eine gewisse Zeit beibehalten.**

Kurzfristige/schlagartige Luftfeuchteänderungen können durch Lehmputz sehr gut abgepuffert werden. Diese Wirkung ist besonders in Objekten ohne technische Raumlüftung/-befeuertung von großem Vorteil. Sich hierbei eventuell ergebende unbehagliche Innenraumbedingungen (z. B. bei niedrigen Außentemperaturen und starkem Abfall der Luftfeuchtigkeit bei einer Fensterlüftung) werden durch die Pufferwirkung des Lehmputzes schnell wieder ausgeglichen.

**Unbekannt war bisher das Potenzial von Lehmputz, Ammoniak zu binden.**

Hierbei handelt es sich um eine eher nur im Ausnahmefall auftretende Innenraumluftverschmutzung. Allerdings ist Ammoniak ätzend, stechend riechend und hat eine geringe Geruchsschwelle, weshalb sein Auftreten automatisch als unangenehm empfunden wird. Mögliche Quellen für Ammoniak im Innenraum sind beispielsweise Toiletten oder geräucherte Holzoberflächen (z. B. Fußböden).

Im Gegensatz dazu konnte keine relevante Aufnahme durch den Lehmputz für Methan und Kohlendioxid festgestellt werden.

Lehmputz weist demnach eine unterschiedliche Sorptionsaffinität zu unterschiedlichen Innenraumluftkomponenten auf. Ein eindeutiger Zusammenhang mit der Polarität der sorbierten Verbindungen dürfte nicht gegeben sein, es ist aber in Verbindung mit den Ergebnissen zu VOC und Formaldehyd anzumerken, dass nach der Luftfeuchte selbst die in Wasser gut löslichen Substanzen (vor allem Formaldehyd und Ammoniak) die höchste Wechselwirkung mit Lehmputz aufweisen. Basierend darauf kann angenommen werden, dass der Feuchteausgleichszustand des Lehmputzes eine wesentliche Rolle bei der Aufnahme von flüchtigen Substanzen spielt.

Umfangreichere Untersuchungen unter Realbedingungen mit unterschiedlichen Lehmrezepturen sollten das

volle Potenzial dieses Baustoffes für die gezielte Verbesserung der Innenraumluftqualität zeigen.

### Scavenger

Es finden sich unterschiedliche Sorptionsmaterialien am Markt, von welchen eine Auswahl untersucht wurde. Besonders Aktivkohle und Silikagel wiesen in dieser Untersuchung ein interessantes Potenzial zur Verringerung von VOC-Konzentrationen in der Innenraumluft auf. Allgemein bestehen bei Scavengern aufgrund der Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien ebenfalls unterschiedliche Selektivitäten gegenüber diversen Luftinhaltsstoffen. Wechselwirkungen zwischen diesen Substanzen und insbesondere auch mit der Luftfeuchte sind vielfach von Relevanz.

Um Adsorptionsmaterialien nach einer teilweisen oder vollständigen Beladung für neuerliche Anwendungen einsatzfähig zu machen, bedarf es einer Regenerierung. Dies sollte für den hier angedachten Zweck im Idealfall bedeuten, dass die adsorbierten flüchtigen Substanzen vollständig wieder resorbiert werden können (z. B. durch Ausheizen des Materials). Eine vollständige Entfernung des adsorbierten Wasserdampfes kann angestrebt werden, wenngleich das Wirkungsoptimum gegenüber unterschiedlich polaren Substanzen offenbar auch vom Sättigungsgrad mit Wasser und zudem stark vom eingesetzten Scavenger abhängt. In der Praxis ist daher anzunehmen, dass eine Regeneration auch eine Entladung des sorbierten Wassers bewirkt. Technisch stehen hierfür unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, wenngleich hier lediglich eine Regeneration im Heißluftverfahren praxistauglich erscheint, auch wenn dieses einen höheren Energieaufwand mit sich bringt (z. B. Mayer 2012). Wird ein System in Anlehnung an die hier beschriebenen Realraumversuche (im passiven Betrieb) z. B. für Neubauten vorgesehen, scheint es zielführend, die Scavenger-Menge auf einen jeweils einmaligen Einsatz auszulegen. Im Anschluss würde die Regeneration erfolgen und das Material stünde für den nächsten Einsatz voll funktionstüchtig und unter Ausschluss möglicher Verschleppungen zur Verfügung. Die effektive Abstimmung von Scavenger-Art und -Menge,

Raumvolumen, Belastungssituation und Beladungsdauer ist jedoch komplex und bedarf einer eigenständigen Optimierung.

Während Aktivkohle in allen Betrachtungen sehr positive Eigenschaften zeigt, stellt sich die praxisnahe Gestaltung eines spezifisch einsetzbaren Luftreinigungsmittels auf Basis von Silikagel als komplexe Aufgabe dar. Dennoch scheint es möglich, beide Arten von Scavengern als temporäre Hilfsmittel zu nutzen, um Anfangsemissionen in Bauwerken zu reduzieren. Hierbei ist die größte Herausforderung, deren Einsatz zeiteffizient unter Berücksichtigung der Innenraumluftbeschaffenheit zu gestalten. Idealerweise sollten unerwünschte Substanzen entfernt werden und gewünschte erhalten bleiben.

**Ein interessanter Effekt wurde hier bei Aktivkohle hinsichtlich der Reinigungswirkung gegenüber Hexanal und einer einigermaßen ausgeprägten Erhaltung von  $\alpha$ -Pinen beobachtet. Die Selektivität von Silikagel konnte durch eine Änderung der Wassersättigung beeinflusst werden.**

Scavenger könnten für derartige Anwendungen entwickelt und mit einem emissionsspezifischen Profil designt werden. Hierbei können z. B. das konvektive Massentransfer-Modell oder das konvektive und diffusive Massentransfer-Modell nach Pei und Zhang (Pei und Zhang 2010) zum Einsatz kommen. Produkte, welche sich dieser Funktionalität bedienen, könnten zukünftig temporär, wie z. B. als Baustellenapparatur, oder dauerhaft (z. B. Modifikation einer Lüftungsanlage, Wandfarbe) zum Einsatz kommen.

Abschließend sei jedoch nochmal betont, dass der Einsatz von Scavengern lediglich als ergänzende Maßnahme zu einer ordnungsgemäßen Lüftung fungieren soll. Lediglich in Situationen, wo mit Lüftung nicht die gewünschte Innenraumluftqualität erreicht werden kann, sollte der Einsatz von Scavengern in Erwägung gezogen werden.

### Danksagung

Diese Veröffentlichung wurde im Zuge des seitens der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten und durch den Fachverband der Holzindustrie

Österreichs unterstützten Forschungsprojekts IASca – Indoor Air Scavenger (FFG-Nr. 860587) verfasst. Ausgewählte Arbeiten im Zuge der Sorptionsversuche wurden durch Frau Kathrin Gugler und Frau Alina Grüninger im Zuge ihrer Diplomarbeit durchgeführt. Arbeiten zu Lehmputz entstanden im Zuge einer FFG-Förderung mit Unterstützung durch die Eder Innovation GmbH. Operative Arbeiten wurden auch von Herrn Wolfgang Hochschorner tatkräftig unterstützt. Wir danken allen beteiligten Personen sowie allen Kooperationspartnern für die exzellente Unterstützung und Zusammenarbeit.

## Literatur

- AGÖF (2013): Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft (Guidance values for volatile organic compounds in indoor air). Fassung 28.11.2013. Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e. V., Springe-Eldagsen [online]. Internet: <http://agoef.de/agoef/oewerte/orientierungswerte.html> [Zugriff: 25.07.2015]
- Bundesministerium Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLFUW) (2005): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft. Arbeitskreis Innenraumluft im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Kommission für Reinhalterung der Luft der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien
- DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2010): Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen. In: DIBt Mitteilungen 41 (5), 209–248. DOI: 10.1002/dibt.201030053
- Dörfler, Marianna H. A. (2016): Strategien zur raumklimatischen Optimierung der Wohnarchitektur Brasiliens – Verbesserung der thermischen Behaglichkeit und Minderung des Energiebedarfs anhand passiver Strategien. Dissertation an der Technischen Universität Kaiserslautern
- Clean Air Technology Center, Environmental Protection Agency (MD-12) (1999): Choosing an adsorption system for VOC: carbon, zeolite, or polymers? CATC technical bulletin. EPA-456/F-99-004. North Carolina
- Fürhapper, Christina (2017): Wood2New. Konkurrenzfähige Materialien aus Holz für den Innenbereich und Systeme für moderne Holzkonstruktionen. Endbericht AP3 – Innenraum. Wien: Holzforschung Austria. Online verfügbar unter [https://www.holzforschung.at/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/HFA-Forschungsbericht\\_Wood2New.pdf](https://www.holzforschung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/HFA-Forschungsbericht_Wood2New.pdf) [Zugriff: 31.10.2020]
- Fürhapper, Christina; Habla, Elisabeth; Stratev, Daniel; Weigl, Martin; Dobianer, Karl (2020): Living conditions in timber houses. Emission trends and indoor air quality. In: Front Built Environ 5, 650. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00151
- Holzforschung Austria (Hrsg.) (2014): HFA-TiMBER. Vom Stamm bis zum Gebäude. Abschlussbericht. Holzforschung Austria, Wien
- ISO 16000-10:2006-02 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 10: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen – Emissionsprüfzellen-Verfahren
- Kain, Günther; Stratev, Daniel; Tudor, Eugenia; Lienbacher, Bernhard; Weigl, Martin; Barbu, Marius-Catalin; Petutschnigg, Alexander (2020): Qualitative investigation on VOC-emissions from spruce (*Picea abies*) and larch (*Larix decidua*) loose bark and bark panels. In: Holz Roh Werkst 92 (2), 376. DOI: 10.1007/s00107-020-01511-2
- Lee, C.S.; Haghigheh, F.; Ghaly, W.S. (2005): A study on VOC source and sink behavior in porous building materials – analytical model development and assessment. In: Indoor Air 15, 183–196
- Mayer, Tamara (2012): Über die Aufbereitung biogener Gase mittels Adsorption. Dissertation an der TU Wien
- ÖNORM EN 13799:2012 05 15 Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile – Füllstandsanzeiger für Druckbehälter für Flüssiggas (LPG)
- Pei, Jingjin; Zhang Jianshun (2010): Modeling of sorbent-based gas filters: Development, verification and experimental validation. In: Building Simulation 3, 75–86
- Pichler, Wilfried; Weigl, Martin (2017): Reducing the reactivity of wood pellets. International Wood Pellets Conference 2017. AEBIOM/EPC, Köln, 14.06.2017 [online]. Internet: [https://www.researchgate.net/publication/320226830\\_Reducing\\_the\\_reactivity\\_of\\_wood\\_pellets\\_-\\_International\\_Wood\\_Pellets\\_Conference\\_2017](https://www.researchgate.net/publication/320226830_Reducing_the_reactivity_of_wood_pellets_-_International_Wood_Pellets_Conference_2017) [Zugriff: 11.04.2018]
- RAL-UZ 176 (2013): Emissionsarme Bodenbeläge, Paneele und Türen aus Holz und Holzwerkstoffen für Innenräume. RAL gGmbH RAL Umwelt, Bonn
- Schripp, Tobias; Fauck, Christian; Salzhammer, Tunga (2010): Interferences in the determination of formaldehyde via PTR-MS. What do we learn from m/z 31? In: International Journal of Mass Spectrometry 289 (2–3), 170–172. DOI: 10.1016/j.ijms.2009.11.001
- Sethia, Govind; Sayari, Abdelhamid (2016): Activated carbon with optimum pore size distribution for hydrogen storage. In: Carbon 99, 289–294
- Sigma-Aldrich (2002):  $\beta$ -Cyclodextrin. Product information [online]. Internet: [https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Sigma/Product\\_Information\\_Sheet/c4767pis.pdf](https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Sigma/Product_Information_Sheet/c4767pis.pdf) [Zugriff: 16.10.2020]
- Stratev, Daniel; Weigl, Martin (2015): BIGCONAIR Baubiologische Containerentwicklung. Endbericht Raumluftmessungen. Holzforschung Austria, Wien [online]. Internet: [https://www.holzforschung.at/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/BigConAir-Holzforschung-Austria-Endbericht.pdf](https://www.holzforschung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/BigConAir-Holzforschung-Austria-Endbericht.pdf) [Zugriff: 16.10.2020]
- Stratev, Daniel; Fürhapper, Christina; Niedermayer, Sabrina; Habla, Elisabeth; Nohava, Michael; Weigl, Martin et al. (2016): From model rooms towards a modelled indoor environment. In: Int Wood Prod J 7 (4), 195–201. DOI: 10.1080/20426445.2016.1222254
- Weigl, Martin; Fürhapper, Christina; Niedermayer, Sabrina; Habla, Elisabeth; Nohava, Michael; Nagl, Stefan; Polleres, Sylvia (2014): VOC emissions from building materials. Results from lab and model room trials. In: Int Wood Prod J 5 (3), 136–138. DOI: 10.1179/2042645314Y.0000000072
- Weigl, Martin; Fürhapper Christina; Nohava, Michael; Stratev, Daniel; Habla, Elisabeth; Jörg, Klaus; Pichler, Wilfried (2015): Processing pellets towards low emissions. In: Forest Products Journal 65(3/4), 74–81
- Xu, Jing; Zhang, Jianshun S. (2011): An experimental study of relative humidity effect on VOCs' effective diffusion coefficient and partition coefficient in a porous medium. In: Building and Environment 46, 1785–1796

# **Abschottung von Schimmelschäden durch Bauteile – eine kritische Betrachtung**

**Indoor mold: a critical look on barrier properties of customary  
building components**

---

Schimmelpilzwachstum in Innenräumen stellt ein potenzielles Gesundheitsrisiko für die Nutzer dar. In feuchtegeschädigten Innenräumen liegen eine Kombination gesundheitsbeeinflussender biogener Schadstoffe, darunter Schimmelpilzsporen, Hyphenfragmente, Stoffwechselprodukte (Mykotoxine, Endotoxine usw.), sowie eine erhöhte Präsenz von Insekten und Staubmilben vor. Darüber hinaus können Schimmelpilzmetabolite relevante Gerüche verursachen. Die Exposition über die Luft ist wahrscheinlich der bedeutendste Expositionsweg für biogene Schadstoffe.

Im Falle von Schimmelpilzschäden muss entschieden werden, ob eine Sanierung, eine Abschottung oder ein Rückbau erforderlich ist, um die Schimmelpilzbelastung zu beseitigen und das Gesundheitsrisiko zu verringern. Viele Baustoffe sind luft- und partikeldicht und lassen eine wirksame Abschottung gegenüber Schadstoffen, z. B. aus Schimmelschäden, vermuten. Die Tücke liegt jedoch im Detail der Anschlüsse einzelner Bauteile, um eine tatsächliche Dichtigkeit im schadstoffbelasteten Gebäudebestand zu erreichen.

In einem 2019 veröffentlichten Forschungsbericht des Aachener Instituts für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik wurden mittels Prüfkammertests bauübliche Bauteile wie z. B. Gipskartonwände oder Estrich-Randdämmstreifen auf Partikeldichtigkeit geprüft. Die Autoren des Forschungsberichtes kommen aufgrund ihrer Labor-Versuchsergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass in schimmelgeschädigten Gebäuden übliche Bauteile eine ausreichende Luft- und Partikeldichtigkeit aufweisen, um als Abschottung zu fungieren. Bezuglich der Dichtigkeit gegenüber gas- und partikelförmigen biogenen Schadstoffen hegen wir große Zweifel an der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Baupraxis.

In diesem Artikel geben wir daher einen kritischen Überblick über die Untersuchungsergebnisse dieses Forschungsberichtes und belegen mit Beispielen aus unserer Gutachterpraxis, dass die Ergebnisse der durchgeführten Prüfkammertests nicht von der Theorie auf die Praxis übertragbar sind und dass bauübliche Bauteile wie z. B. Gipskartonwände oder Estrich-Randdämmstreifen in der Praxis keine ausreichende Abschottungswirkung gegenüber Schimmelpilzen, ihren Gerüchen und Stoffwechselprodukten aufweisen.

Indoor mold growth is a potential health risk. In water-damaged indoor environments a combination of health-affecting factors is present including mold spores, hyphal fragments, metabolic products (mycotoxins, endotoxins etc.) as well as an increased presence of insects and dust mites. Additionally, mold metabolites can cause relevant odors. Airborne exposure is likely the most significant route of mold exposure in water-damaged indoor environments. In case of mold damage, one needs to decide whether remediation, sealing (masking) or restoration is required to prevent mold exposure and reduce the health risk of residents.

A report published in 2019 by the Aachen Institute for Research into Building damage and Applied building physics suggested that – based on test chamber tests – typical building components such as gypsum plasterboard walls or perimeter insulation strips are sufficiently tight against air and particles to act as a sealing in mold damaged buildings that prevents mold spores, hyphal fragments and bioaerosols etc. to reach the indoor air. Although some building materials show airtightness as well as tightness against particles, we show in this work that the results of the chamber tests regarding particle density of building components cannot be adopted from theory to building practice. Additionally, we present practical examples that customary building materials and components do not have sufficient airtight barrier and sealing properties against mold, odors and bioaerosols.

■ DIPL.-CHEM. JÖRG THUMULLA, DR. RER. NAT. DIPL.-BIOL. CARMEN KROCZEK  
anbus analytik GmbH, Mathildenstraße 48, 90762 Fürth, jt@anbus-analytik.de, ck@anbus-analytik.de

**A**ls Sachverständige für Innenraumschadstoffe und Innenraumhygiene beschäftigen wir uns seit vielen Jahren mit der Sanierung chemischer und biogener Schadstoffe in Gebäuden. Neben dem Ziel einer möglichst restlosen Entfernung schadstoffhaltiger Bauteile ist aus ökonomischen und ökologischen Überlegungen immer auch eine Abschottung der Schadstoffquellen als Sanierungsoption in Betracht zu ziehen.

### **Mikrobielle Schadstoffbelastungen in Innenräumen**

Schadstoffbelastungen in Innenräumen können vielerlei Ursachen haben und auch unterschiedliche Auswirkungen: Häufig erkranken die Bewohner erst nach vielen Jahren und Ärzte führen dies auf die Überschreitung von Richtwerten für diese Schadstoffe zurück. Manche Käufer haben schadstoffbelastete Anwesen erworben und können sich eine vollständige und fachgerechte Entfernung der Bauteile aus finanziellen Gründen nicht leisten. Daher verbleibt die Abschottung von Schadstoffquellen häufig als

einige Option, um Räumlichkeiten unter der Berücksichtigung des Gesundheitsschutzes und der Prävention weiter nutzen zu können.

Bei bauüblichen Konstruktionen können sowohl gasförmige als auch partikelförmige Schadstoffe in die Raumluft austreten, weil diese Materialien und Konstruktionen keine vollständige Abschottung der schadstoffbelasteten Bauteilhohlräume gegenüber den genutzten Innenräumen gewährleisten. Unsere Erfahrungen zeigen, dass einfache, von den Betroffenen selbst durchgeführte Abschottungen wie die Bekleidungen der Wandoberfläche mit diffusionsdichten Aluverbundfolien häufig nicht ausreichend sind, weil die typischen Leckagen im Bereich der Wand-, Boden-, Decken- oder Türanschlüsse oder aber Durchdringungen von Elektro- und Heizungsinstallationen außer Betracht gelassen werden.

Eine 2019 veröffentlichte Forschungsstudie des Aachener Institutes für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik (AIBau) (AIBau, 2019) hat sich ausführlich mit der Abschottung von Schimmelschäden gegenüber genutzten Innenräumen beschäftigt. Hierbei kamen die

Autoren der Studie bei der Sanierung von Schimmelpilzbefall, hauptsächlich auf der Basis von Prüfkammeruntersuchungen, zu dem Schluss, dass bereits bauübliche Bauteile und Materialien kontaminierte Hohlraumbereiche dauerhaft gegenüber genutzten Innenräumen abschotten können.

Nach detailliertem Studium des verfügbaren Berichts betrachten wir diese Schlussfolgerungen jedoch sehr kritisch. Im Verlauf dieses Artikels werden wir uns ausführlich mit den Grundlagen zum Transport von biogenen Schadstoffen in Innenräumen und den Aussagen der AIBau-Studie auseinandersetzen und anhand eigener Praxisbeispiele zeigen, dass die Ergebnisse der AIBau-Studie sich nicht auf reale Situationen übertragen lassen.

## Abschottung von mikrobiellen Schäden

Der Leitfaden des Umweltbundesamtes zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden (Umweltbundesamt, 2017; im Folgenden „Schimmelleitfaden“) hat sich mit der Möglichkeit einer räumlichen Trennung von kontaminierten und nicht kontaminierten Innenraumbereichen im Rahmen der Schimmelsanierung beschäftigt. Als Ergebnis der Diskussionen wurde die Nutzungsklasse IV eingeführt. Sie beinhaltet gegenüber der Innenraumluft luftdicht und<sup>1</sup> diffusionsdicht abgeschottete Bauteile und Hohlräume.

Laut Schimmelleitfaden soll die Abschottung der biogenen Schadstoffe mit geeigneten, gegenüber Schimmelpilzen und deren Stoffwechselprodukten dichten Stoffen erfolgen. Für solche Hohlräume gelten verringerte, deutlich reduzierte Anforderungen bis hin zu keinen Maßnahmen hinter der Abschottung. Mikrobiell besiedeltes Material kann also hinter der Abschottung entsprechend an Ort und Stelle verbleiben, wenn die Bauteile hinter der Absperrung bestimmungsgemäß trocken bleiben.

<sup>1</sup> Im Punkt 6.14, S.124 unten, des Schimmelleitfadens 2017 (Umweltbundesamt, 2017) befindet sich hier ein „oder“. Aus dem weiteren Kontext (S. 125 oben) ergibt sich, dass zur Vermeidung eines Eintrages von mikrobiell bedingten Gerüchen eine funktionale und fachgerecht ausgeführte Diffusionsdichtheitsebene erforderlich ist, die durch den Einsatz geeigneter Stoffe eine Abschottung gegenüber dem Innenraum sicherstellt (Tabelle 11, S. 125 unten).

Damit werden (Bauteilhohl-)Räume der Nutzungsklasse IV als mikrobiell kontaminierte Bereiche in Gebäuden aus innenraumhygienischer Sicht toleriert. Eine Nutzung oder Bearbeitung dieser (Bauteilhohl-)Räume kann nur unter den Gesichtspunkten der Biostoffverordnung erfolgen.

Über die Frage, welche konstruktiven Anforderungen an eine solche Abschottung zu stellen sind, waren sich die Autoren des Schimmelleitfadens letztendlich einig, dass die Anforderungen einer solchen Abschottung in Planung, Ausführung und Prüfbarkeit denen einer dauerhaften Luftdichtheitsebene (siehe DIN 4108-7:2011-01 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele“) entsprechen, auch wenn solche Ausführungen der Luftdichtheitsebene in der Baupraxis auch bei Neubauten nicht immer umgesetzt werden.

Dass bei der räumlichen Trennung nicht von einer Luftdichtheitsebene, sondern einer Abschottung gesprochen wird, macht den Unterschied zu bauüblichen Konstruktionen deutlich. Über den konvektiven Schadstofftransport hinaus sind bei einer vollständigen „Abschottung“ auch der Eintrag von Stofflasten durch Diffusion und weitere Transportprozesse zu verhindern.

## Schimmel abschotten – Forschungsprojekt des Aachener Institutes für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik

Der Forschungsbericht des AIBau (AIBau, 2019) zusammen mit LBW Bioconsult kommt zu dem Ergebnis, dass bereits bauübliche Materialien solche Raumbereiche dauerhaft gegenüber genutzten Innenräumen abschotten können. Bezuglich der Estrichrandfugen wurde ausgeführt: „Die Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass an Estrichrandfugen bereits ein Randstellstreifen abschottende Wirkung erzielt – auch ohne Fugenverschluss.“ (AIBau, 2019, S. 61 oben)

Diese Ergebnisse wurden offensiv an prominenten Stellen der Fachöffentlichkeit vorgestellt (Zöller et al., 2019,

2020) und von weiteren Autoren (Leicht/Moriske, 2019) aufgenommen, ohne dass die wissenschaftliche Belastbarkeit der Forschungsergebnisse bisher ausreichend hinterfragt wurde. Wir hegen Zweifel an der Übertragbarkeit der experimentell bzw. durch Befragungen ermittelten Aussagen auf reale Situationen und werden diese im Rahmen dieser Arbeit ausführlich begründen.

Das Forschungsprojekt AIBau 2019 unterteilt sich in mehrere Teile: Nach einer Übersicht über Leitfäden, Richtlinien und Merkblätter werden zudem Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage unter den in diesem Bereich tätigen öffentlich bestellten und vereidigten Bausachverständigen (u. a. Schäden an Gebäuden, Bauphysik, Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, Schadstoffe in Innenräumen, Schimmelpilze) ausgewertet. Die Auswertungen der Befragungen zeigen, dass in den letzten Jahren am häufigsten ein Befall in Fußbodenkonstruktionen (118 von 177 Fällen) und in leichten Wandkonstruktionen (114-mal) festzustellen war. Seltener wurde Schimmelpilz in Dachhohlräumen lokalisiert (92-mal). Von untergeordneter Bedeutung sind sonstige Hohlräume (53 Nennungen) wie z. B. Bereiche unter Duschen, hinter Fassadenbekleidungen oder in Installationsebenen.

Ein weiteres Ergebnis der Auswertungen war, dass in mehr als der Hälfte der Fälle keinerlei Auswirkungen des in den unterschiedlichen Hohlräumen vorhandenen Schimmelpilzbefalls auf die Bewohner und Nutzer festgestellt worden seien (AIBau, 2019, S. 21). Wie diese Nichtauswirkungen festgestellt wurden und von wem, ob und wie lange ein gesundheitliches Monitoring durchgeführt wurde, wird in dem Bericht nicht erwähnt. Aufgrund des wissenschaftlich nachgewiesenen Zusammenhangs zwischen Schimmelbefall und der Entstehung von Asthma (Umweltbundesamt, 2017, S. 38; Quelle: WHO Regional Office for Europe, 2009, ergänzt durch Kanchongkittiphon et al., 2015) wäre es für eine wissenschaftlich fundierte Aussage notwendig gewesen, zumindest Prävalenz (gibt Aufschluss über bestehende Fälle) und Inzidenz (gibt Aufschluss über neu auftretende Fälle) für Asthma in solchen Wohnungen mit denen unbelasteter Wohnungen zu vergleichen und über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Im vorliegenden Fall ist zu befürchten, dass die

Beobachtungen von Bausachverständigen auf einem Ortstermin in einer Befragung als medizinische Diagnose interpretiert werden.

Einschränkend wird im Bericht darauf hingewiesen, dass in Fällen, in denen keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen vorlagen, eher keine Luftkeimmessungen durchgeführt wurden (AIBau, 2019, S. 21). Aus den nicht durchgeföhrten Luftkeimmessungen wurde dann von den Projektleitern geschlossen, dass sich Schimmelpilzbezwuchs in Bauteilen nicht signifikant auf die Innenraumlufthygiene auswirkt. Dieser Aussage liegt also ein wissenschaftlicher Zirkelschluss zugrunde: Es wurden keine Auswirkungen festgestellt, deswegen wurden keine Untersuchungen durchgeführt mit dem Ergebnis, dass keine Auswirkungen festzustellen sind.

Im nächsten Teil wurden Erfahrungen mit Abschottungen anhand von Fallbeispielen, die aus einer Befragung von Sachverständigen gewonnen wurden, untersucht. Mit der Aussagekraft dieser Beispiele hat sich die Kollegin Pia Haun auf der 24. Pilztagung 2020 ausführlich beschäftigt (Haun, 2020). Im Fazit kommt sie zum folgenden Schluss:

*„Von den zehn ausgewählten Beispielen wurde bei neun Beispielen, entgegen den in der Studie formulierten Grundvoraussetzungen bei der Auswahl, Maßnahmen zur Beseitigung oder Reduzierung des Schimmelbefalls durchgeführt.*

*Soweit der Studie zu entnehmen ist, wurden bei den Fallbeispielen entweder:*

- keine Abschottungen realisiert,*
- in Gebäuden ohne vorhandene Luftdichtheitskonzepte mikrobielle Schäden punktuell oder linear abgeschottet oder*
- bei Gebäuden mit vorhandenem Luftdichtheitskonzept festgestellte Lecks beseitigt.*

*Dabei zeigt sich bei der Betrachtung der Beispiele mit Abschottung plus verbliebenem mikrobiellem Schaden, dass diese entgegen den Empfehlungen des Umweltbundesamtes [1] gerade nicht die geforderten Eigenschaften gemäß [4] zeigen bzw. dass ungeeignete Materialien entgegen [5] zum Einsatz kamen und somit anerkannte Regeln der Technik missachtet wurden.*

*In keinem Fall wurde eine belastbare Überprüfung der Funktionstauglichkeit einer Abschottung gemäß Nutzungs-klasse IV durchgeführt.*

*Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle in [2] ausgewählten und veröffentlichten Beispiele ungeeignet sind, die Funktionstauglichkeit von Abschottungen in der Praxis zu belegen. Damit fehlt eine der drei Grundvoraussetzungen, die Methode als Regel der Technik zu werten.*

*Statt zu untersuchen, ob Abschottungen in der Praxis funktionieren, wurde einseitig versucht zu beweisen, dass sie funktionieren. Insgesamt wirkt die Studie einer Versachli-chung entgegen.*

- [1] Umweltbundesamt (UBA): *Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden (Schimmel Leitfaden)*, 2017
- [2] AIBAU Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gGmbH: *Instandsetzung von Schimmelschäden durch Abschottung – Partikel-dichtheit von Baustoffen*, Aachen, 2019
- [4] DIN 4108-7:2011-01: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsemp-fehlungen sowie -beispiele*
- [5] DIN 4108-11:2018-11: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten*“ (Haun, 2020, Fazit)

Die Ergebnisse des Forschungsberichts des AIBau hinter-lassen daher einige offene Fragen. Durch eine Darstellung theoretischer Grundlagen in Verbindung mit Fallbeispie- len aus unserer eigenen Praxis versuchen wir, Antworten auf diese offenen Fragen bzw. entstandenen Widersprüche zu finden.

## Theoretische Grundlagen

Eine erste Grundlage unserer Argumentation bilden Laboruntersuchungen und deren Übertragbarkeit auf üb-

liche Bauwerke. Hierzu ist es notwendig, einige Definitio-nen und naturwissenschaftliche Grundlagen voranzustel-len.

### Definition: Baustoffe versus Bauteile

Ein **Baustoff** ist ein Material (in Form von Rohstoffen, Hilfsstoffen oder Halbzeug), das zum Errichten von Bau-werken und Gebäuden benutzt wird. In der gesetzlichen Nomenklatur werden Baustoffe als Bauprodukt bezeichnet (Wikipedia, 2020, Baustoff).

Das **Bauteil** ist im Bauwesen hingegen eine funktionelle Komponente eines Bauwerks. Es ist dadurch definiert, dass es nicht weiter zerlegt werden kann, ohne seine grundle-genden technischen Eigenschaften, also seine Funktion, zu verlieren. Ein Bauteil im Bauwesen ist eine geometrisch oder funktionell zusammenhängende Fläche oder ein Kör-per, mit einheitlichem Aufbau und Konstruktion, wie z. B. Wände, Stützen, Decken. Prinzipiell kann sich ein Bauteil aus einer großen Anzahl Einzelteilen oder Baustoffen zu-sammensetzen.

Bauteile bestehen also oft aus einer Kombination mehrerer Baumaterialien und erfüllen durch ihre Konstruktion wesentliche bautechnische Anforderungen beispielsweise in Bezug auf Statik, Schall-, Brand-, Feuchte- und Wärme-schutz. So werden bei Leichtbauwänden immer Leichtbau-platten, Schrauben, Ständer und Spachtelmassen zu einer funktionalen Einheit zusammengefügt. Das Bauteil Decke besteht im Wohnungsbau zumindest aus der Rohdecke, einer Dämmschicht, einem Estrich und einem Estrich-Randdämmstreifen.

Zum Einbau von Fenstern, Türen oder Installationen für die Wasser-, Wärme- oder Stromversorgung ist es not-wendig, Bauteile mittels entsprechender Öffnungen oder Durchgänge zu durchdringen. Die jeweiligen Durchdrin-gungen dürfen jedoch die Anforderungen an die Bauteile beispielsweise in Bezug auf Brand- oder Schallschutz oder die Luftdichtigkeit nicht mindern.

Der Transport von Stofflasten wie Feuchtigkeit oder (biogenen) Schadstoffen durch Bauteile kann über unter-schiedliche Mechanismen, die auf unterschiedlichen An-triebskräften beruhen, erfolgen.

## Permeation und Diffusion von Stofflasten in Bauwerken

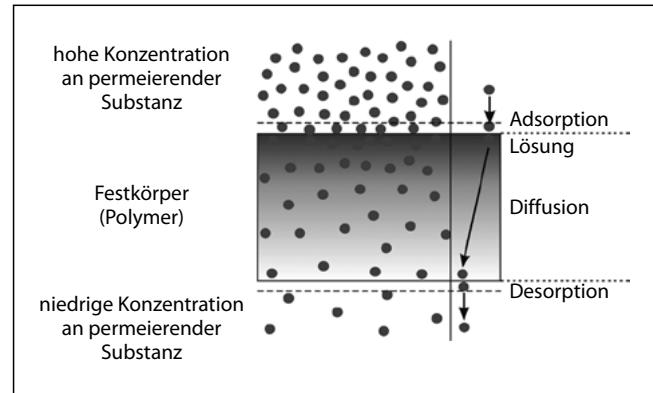
Als Permeation wird allgemein der Stofftransport von Substanzen (Permeat<sup>2</sup>) durch einen Festkörper hindurch bezeichnet. Dieser Prozess verläuft in mehreren Schritten (siehe Abb. 1):

1. Adsorption des permeierenden Stoffes an der Materialoberseite,
2. Diffusion durch das Material entlang des Gradienten des chemischen Potenzials (durch Poren oder molekulare Zwischenräume),
3. Desorption von der Materialunterseite.

Die Permeation mit dem Hauptschritt der Diffusion beschreibt in Gebäuden einen Stofftransport durch Bauteile anhand eines Konzentrationsgradienten als natürlich ablaufenden physikalischen Prozess. Antriebskraft ist die Erhöhung der Entropie (Unordnung) des Systems. Die Diffusion bewirkt einen Ausgleich von Konzentrationsunterschieden und führt mit der Zeit zur vollständigen Durchmischung der beteiligten Stoffe durch die gleichmäßige Verteilung der beweglichen Teilchen.

Diffusion ist auch durch feste Stoffe möglich. Bei Metallen oder Kristallen sind hierzu Fehlstellen in der Struktur notwendig. Ab einer bestimmten Stärke sind sie daher praktisch diffusionsdicht. Andere Materialien wie Holz, Kunststoffe oder nicht kristalline Baustoffe sind nicht diffusionsdicht, weisen aber einen vom Material und von der Materialstärke abhängigen Diffusionswiderstand auf. Das Problem der Permeation von Aromen findet insbesondere im Bereich der Lebensmittelverpackungen durch Kunststofffolien große Beachtung. Eine umfangreiche Abhandlung der Problematik und ihrer theoretischen Grundlagen findet sich in der Dissertation von Markus Hanika (Hanika, 2003).

Als Transportprozess in Gebäuden ermöglicht die Permeation und Diffusion den Transport von Stofflasten durch Bauteile hindurch. Im Bereich des Feuchteschut-



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der Lösungsdiffusion in einem Polymer (Festkörper); die Kugeln entsprechen den permeierenden Molekülen (Quelle: Hanika, 2003, S. 13).

zes ist der Diffusionswiderstand von den aus einzelnen Baustoffen bestehenden Bauteilschichten gegenüber Wasserdampf entscheidend, um eine Kondensation von Feuchtigkeit im Bauteil zu verhindern. Das Maß für den Diffusionswiderstand von Baustoffen ist der  $S_d$ -Wert (wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftsichtdicke) als Produkt aus der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu$ -Wert) als Materialkonstante und der Schichtdicke  $d$  des Baustoffes in Meter (Hanika, 2003; WISSEN Wiki, 2019).

Der Diffusionswiderstand von Baustoffen gegenüber anderen Stofflasten wie (biogenen) Schadstoffen ist nicht äquivalent dem gegenüber Feuchtigkeit. Ursache sind die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften wie Polarität, Löslichkeit in Kunststoffen oder Molekülgrößen. So haben mikrobiell gebildete Kohlenwasserstoffe (MVOC) oder in von Schimmelpilzen gebildeten Guttationströpfchen gelöste Mykotoxine und weitere Stoffwechselprodukte andere Diffusionseigenschaften als Wasserdampf und können Kunststofffolien einfacher durchdringen. Zur Prüfung der Barriereeigenschaften von polymeren Werkstoffen und Beschichtungen gibt es zahlreiche analytische Verfahren (z. B. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung, 2020).

Prinzipiell tritt Diffusion auch bei Partikeln auf. Sie tritt aber in relevantem Ausmaß nur bei kleineren Partikeln mit einem Durchmesser  $< 1 \mu\text{m}$  wie z. B. Viren oder ultrafein-

<sup>2</sup> Permeat: Stoff, der durch einen Festkörper dringt (permeiert); Permeabilität: Grad der Durchlässigkeit eines Feststoffes

nen Partikeln (Durchmesser < 100 nm) auf (EMW filtertechnik, 2020). Größere Partikel, die sich durch Diffusion in Poren voranbewegen können, treffen in Baustoffen unvermeidlich auf Wände und bleiben dort (im Unterschied zu Molekülen) haften. Ein Transport größerer Partikel durch Materialien hindurch findet also nicht statt (Benker/Warnecke, 2004, S. 12).

### Konvektion von Stofflasten in Bauwerken

Bei der Konvektion erfolgt der Transport der Stofflasten über Luftströmungen durch bestimmungsgemäße oder nicht bestimmungsgemäße Leckagen von Bauteilen. Antriebskräfte dieser Luftströmungen sind Differenzdrücke, die zwischen den durch die Bauteile getrennten Räumen bestehen. Ursache länger anhaltender Differenzdrücke können in Gebäuden beispielsweise der thermische Auftrieb durch Temperaturunterschiede (Schornsteineffekt), Winddruck oder Lüftungstechnik (Abluftlüftungstechnik) sein. Kurzfristig werden Differenzdrücke über mehrere 10 Pa beispielsweise durch das Öffnen von Türen oder Fenstern induziert. So sorgt das Öffnen einer Tür in einer Innenwand kurzfristig für einen Überdruck an der Seite, zu der die Tür hin ausschwenkt, und einen Unterdruck auf der gegenüberliegenden Seite. Der Druckausgleich erfolgt beispielsweise über Konvektion durch die Leckagen einer Leichtbauwand.

Durch nicht luftdichte Baustoffe wie Mineralwolle wird die Konvektion zwar gebremst, aber nicht verhindert. Durch Konvektion können auch partikuläre Stofflasten transportiert werden. Die Beschränkung des Transportes durch Ablagerungen der Partikel auf dem Transportweg erfolgt hier im Wesentlichen durch (Hinds, 1999):

- Impaktion: Die Partikel trennen sich aufgrund ihrer Trägheit vom Luftstrom, dies ist umso wahrscheinlicher, je größer die Geschwindigkeit der Luft, der Durchmesser des Partikels und seine Dichte sind. Zum Beispiel prallen (impaktieren) kleine Regentropfen während eines Nieselregens häufig gar nicht auf die Windschutzscheibe, im Unterschied zu großen Regentropfen, die für einen Platzregen typisch sind.

- Sedimentation: Antriebskraft der Sedimentation ist die Schwerkraft, gebremst wird sie durch die Viskosität des Transportmediums (Luft). Die Sedimentationsgeschwindigkeit ist umso größer, je größer Durchmesser und Dichte des Partikels sind.
- Elektrostatische Abscheidung: Partikel können durch Reibung an anderen Partikeln oder Oberflächen elektrostatisch aufgeladen werden und sich auf anders geladenen Oberflächen abscheiden.
- Interzeption: Die Abscheidung der Partikel beruht darauf, dass der Schwerpunkt eines Partikels zwar noch den Stromlinien der Strömungsluft folgen kann, aber ein vom Schwerpunkt entfernter Teil des Partikels die luftwegbegrenzende Oberfläche berührt und dadurch abgeschieden wird. Dies trifft für anisometrische, bei welchen die 3 Achsen verschieden lang sind, und insbesondere faserartige Partikel zu.

Eine Luftströmung (Konvektion) innerhalb der Bauteile entsteht durch Undichtigkeiten in der Baukonstruktion.

### Aktiver Transportmechanismus von Stofflasten in Bauwerken über Staubläuse, Milben & Co.

Ein Stofflastentransport mikrobieller Partikel und Stoffwechselprodukte in Innenräume findet nicht nur über Permeation, Diffusion oder Konvektion statt, sondern zu einem großen Teil auch durch aktiven Transport von Kleinstlebewesen beispielsweise über ihre Faeces (Kotabscheidungen) oder über Verschleppung durch Anhaftung an Tarsen und anderen Körperteilen der Tiere.

In Häusern finden sich immer wieder kleine Insekten oder Milben, die sich dorthin verirren. Finden sie optimale Lebensbedingungen wie z. B. erhöhte Luftfeuchtigkeit und erhöhte Temperaturen vor, kann es innerhalb kurzer Zeit zu explosionsartigen Vermehrungen kommen. Die meist nur wenige Millimeter großen Tiere können aufgrund ihrer geringen Größe in den kleinsten Spalten Unterschlupf und auch Nahrung finden (wie z. B. in Bauteilen mit verdecktem Schimmelbefall, Randfugen usw.).

Insbesondere in noch nicht vollständig getrockneten Neubauten oder feuchtegeschädigten Häusern findet man

bei genauem Hinsehen in der Praxis sehr häufig größere Ansammlungen sogenannter „schimmelfressender Insekten“. Zu diesen Tierchen gehören nicht nur die allgemein bekannten Silberfischchen, sondern vor allem schimmelfressende Arten der Milben (Acari) (Rack, 1963, 1969, 1972) und Bücherläuse bzw. Staubläuse (Psocoptera) (Institut für Schädlingskunde, 2020). Bevorzugte Nahrung sind Schimmelpilze und Hautschuppen. Beim Schimmel muss es sich nicht um großflächig sichtbaren Befall handeln, bis die Staub- und Bücherläuse ihn nutzen können, sondern es reicht auch bereits einzelner beginnender und mit bloßem Auge noch nicht erkennbarer Schimmelpilzbefall, z. B. auf einer Tapete oder in einem Bauteil, um sich stark zu vermehren. Beim Abfressen hinterlassen sie oftmals einen feinen Papierstaub.

Dies zeigt, dass in Neubauten oder feuchtegeschädigten Häusern aus schimmelbelasteten Bauteilhohlräumen an nicht dicht anschließenden Bauteilen, an Leckstellen oder an undichten Randfugen immer auch ein Eintrag mikrobieller Partikel und Stoffwechselprodukte in die Innenräume durch Staubläuse, Milben & Co. erfolgt.

### Der Pumpeffekt bei Bauteilschwingungen

Zur Trittschalldämmung in Gebäuden werden schwimmende Estriche eingebaut. Schwimmende Estriche bestehen aus einer lastverteilenden Platte aus Mörtel oder Beton, die auf einer weichfedernden Dämmschicht liegt (Lohmeyer, 1995). Diese Dämmschicht verhindert durch ihre Kompressibilität, dass sich beim Darüberlaufen entstehende Schwingungen des Estrichs auf die Bodenplatte übertragen (Masse-Feder-System aus Betonplatte und Dämmung). Bei der Kompression der Dämmschicht findet eine Volumenverkleinerung der Dämmschicht statt, bei der Luft in geschlossenen Zellen des Dämmstoffes komprimiert wird oder durch Druckausgleich über Kanäle in der Estrichdämmschicht und die Randfugen in den Innenraum entweicht. Diesen Vorgang nennt man Pumpeffekt, da der schwimmende Estrich praktisch wie eine Membranpumpe arbeitet, die Luft von unterhalb des Estrichs in die Raumluft drückt und wieder zurückzieht und so mit jeder Schwingung Luft und Partikel hin und her bewegt werden.

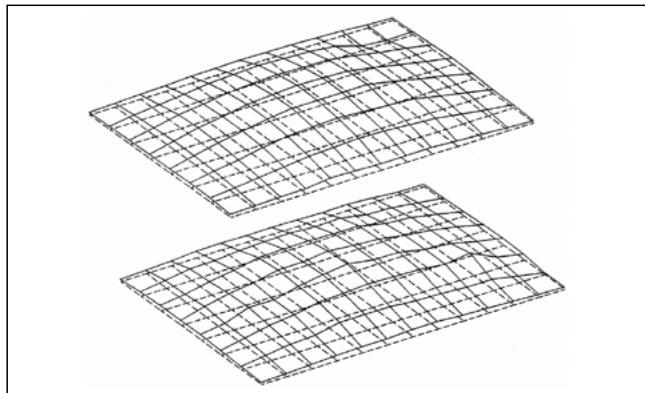
In der Diskussion über Schimmelbefall in Estrich wird bisweilen die Auffassung vertreten, ein etwaiger Pumpeneffekt in Estrichdämmschichten sei bereits theoretisch zweifelhaft und sei in der Baupraxis auch nie wirklich nachgewiesen worden (Tielke, 2014; Warscheid, 2018, 2019).

Diese Aussagen bleiben nicht ohne Auswirkung auf die Rechtsprechung: Folgende Begründung haben wir beispielweise für die Negation des Pumpeneffektes in einem gerichtlich bestellten Gutachten gefunden (Landgericht Nürnberg 20 1644/11):

- Die Möglichkeit, dass durch die fälschlich behaupteten Pumpbewegungen beim Begehen des Fußbodens im Fußbodenunterbau vorhandene Pilzsporen über die Randfugen in die Raumluft gelangen würden, sei ausgeschlossen, weil jeder Belastung eine Entlastung folge und damit der theoretisch angenommene Ausstoß von sporenhaltiger Luft aus dem Fußbodenunterbau nach der Belastung zwangsläufig das Einsaugen derselben Luft bei der Entlastung folgen würde, es sei denn, dass die Randfugen mit Ventilen ausgerüstet wären, welche nur den Luftausstoß zuließen, was nicht der Fall sei.
- Ausgeschlossen seien die behaupteten Pumpbewegungen mit Sporenausstoß u. a. auch, weil ein Lufttransport im Fußbodenunterbau schon deshalb nicht möglich sei, weil keine dazu zwingend erforderliche durchgehende Luftsicht vorhanden sei, denn alle im Fußboden verarbeiteten Materialien lägen unmittelbar und ohne trennende Luftsicht aufeinander. Luftbewegungen im Fußbodenunterbau als Voraussetzung für einen Sporentransport in die Raumluft seien daher weder theoretisch noch praktisch möglich.
- Daraus folge, dass normale Silikonfugen an den Fußbodenrändern zur Verhinderung von Verstaubungen völlig ausreichen und die Gefahr eines Transportes biogener Partikel über die Randfugen nicht existieren würde.

Diesen Argumenten halten wir Folgendes entgegen:

In der Baupraxis liegen die in Estrichdämmschichten verarbeiteten Materialien nicht unmittelbar und ohne trennende Luftsicht aneinander. Neben den zwangsläufig

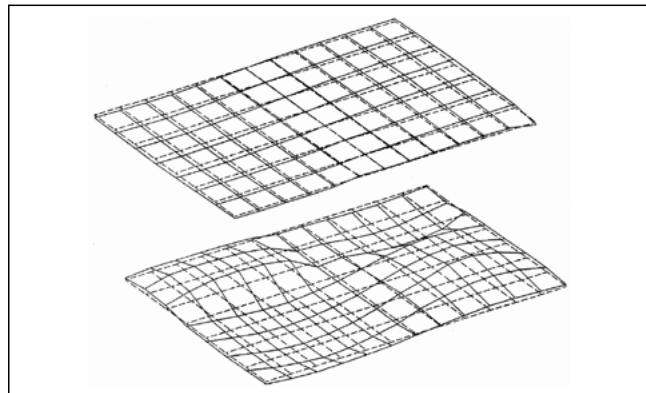


**Abb. 2:** Schematische Darstellung von Grundschwingungen eines Estrichs (modifiziert nach Scholl/Kraß, 1995)

figen Fugen an den Stoßkanten verlaufen zahlreiche Installationen (Heizung, Strom) durch die Estrichdämmschicht, die Kanäle bilden, die wiederum einen einfachen Lufttransport erlauben. Aus der Praxis der Trocknung von Estrichdämmschichten ist bekannt, dass solche Kanäle zu lüftungstechnischen Kurzschlüssen führen und bei Nichtbeachtung die Trocknung großflächiger Bereiche verhindern.

Die Annahme, dass an den Estrichrandfugen immer wieder dieselbe Luft angesaugt und ausgeblasen wird, widerspricht allen Erkenntnissen der Strömungsdynamik:

- Estriche geraten in Schwingung, wenn Personen über die Flächen laufen bzw. gehen. Zum Trittschallschutz liegen deshalb Estrichdämmschichten unterhalb des Estrichs, die durch ihre Nachgiebigkeit eine Übertragung der Schwingungen auf die darunterliegende Decke verhindern. Nach DIN 18560-2:2009-09 „Estriche im Bauwesen – Teil 2: Estriche und Heizesträfe auf Dämmschichten (schwimmende Estriche)“ liegt die Zusammendrückbarkeit solcher Dämmstoffe bei gängigen Anwendungen zwischen 2 und 5 mm.
- Je nach Anregung schwingen solche Estriche in der Grundfrequenz oder einer Vielfachen davon (harmonische Oberschwingungen). Einen Eindruck vermittelt die in Abb. 2 und 3 dargestellte exemplarische Grund- und Oberschwingung. Wie bei einer Membranpumpe wird dabei Luft von unterhalb des Estrichs in die Raumluft gedrückt und wieder zurückgezogen. Mit jeder



**Abb. 3:** Schematische Darstellung der 1. Oberschwingungen eines Estrichs (modifiziert nach Scholl/Kraß, 1995)

**Tabelle 1:** Beispielhafte Berechnung der durch den Pumpeneffekt bewegten Volumina

Parameter	Wert	Einheit
<b>Fläche</b>	9	$\text{m}^2$
<b>Hub (Mittel)</b>	0,0001	m
<b>Volumen je Hub</b>	0,0009	$\text{m}^3$
<b>Frequenz</b>	15	1/s
<b>Volumen pro Sekunde</b>	0,0135	$\text{m}^3/\text{s}$
<b>Volumen pro Minute</b>	0,81	$\text{m}^3/\text{min}$

Schwingung werden Luft und Partikel hin und her bewegt. Die in Tabelle 1 gezeigte Rechnung soll verdeutlichen, welche Volumina durch den Pumpeneffekt bewegt werden können. Ein Estrich der Fläche von 9  $\text{m}^2$  und einer Grundschwingung von 15 Hz bei einer angenommenen Amplitude von 0,2 mm und einem mittleren Hub von 0,1 mm (die maximale Zusammendrückbarkeit der Estrichdämmschicht liegt bei 3 bis 5 mm) bewegt damit beim Darüberlaufen etwa 800 l/min.

- Die Estrichrandfugen verengen den Querschnitt des Luftdurchtrittsraumes. Sie stellen damit beim Austritt der Luft Düsen dar<sup>3</sup>. Beim Ausblasen wird die Luftströmung durch den Düseneffekt beschleunigt und tritt da-

<sup>3</sup> Als Düsenströmung wird die Strömung eines Fluids, das heißt eines Gases oder einer Flüssigkeit, durch eine Düse bezeichnet. Dabei wird das Fluid beschleunigt, während der Druck abnimmt. Bei einer Düsenströmung wird potentielle in kinetische Energie umgewandelt (Wikipedia, 2020, Düsenströmung).

durch als „Strahl“ weit in den Raum hinein (vgl. Düse auf Wasserschlauch). Beim Wiederansaugen wirken diese als Diffusor, also als Gegenteil einer Düse. Die angesaugte Luft stammt dadurch aus der unmittelbaren Nähe der Fuge. Ventile sind dadurch für einen Luftaustausch nicht notwendig.

- In der Strömung enthaltene Partikel werden in der Düse beschleunigt. Die Trägheit der Masse verhindert eine Umkehr der Partikel in die Düse zurück.

Hiermit kommen wir zur klaren Auffassung, dass aufgrund der dargestellten physikalischen Grundlagen ein Eintrag gasförmiger und partikelförmiger mikrobieller Schadstoffe aus einer kontaminierten Estrichdämmsschicht durch den Pumpeneffekt gegeben ist.

Eine Quantifizierung dieses Effektes wäre Gegenstand noch durchzuführender wissenschaftlicher Forschungsprojekte.

## Partikeldichtheit von Baustoffen

Die Dichtigkeit von Baustoffen ist ein wesentlicher Faktor für jegliche abschottende Wirkung gegenüber gasförmigen und partikelgebundenen Schadstoffen. Konkrete Daten zur Dichtigkeit von Baustoffen, insbesondere gegenüber biogenen Schadstoffen, sind nur selten verfügbar.

Die bereits angesprochene AIBau-Studie (AIBau, 2019) verspricht, diese Lücke zu schließen, und berichtet von Untersuchungen in einem Prüfstand, inwieweit Baustoffe und Baukonstruktionen die Übertragung von Schimmelpilzsporen von kontaminierten Bereichen in genutzte Innenräume verhinderten. Nach eigenen Angaben sei die Dichtigkeit bauüblicher Stoffe und Konstruktionen gegenüber allen Bestandteilen von Schimmel geprüft worden, wobei Bauteilflächen und Randanschlüsse wie Fugen zwischen Estrichen und Wänden getrennt untersucht worden seien.

## Welche Parameter wurden untersucht?

Entgegen den Aussagen in der Einleitung („Dazu wurde die Dictheit bauüblicher Stoffe und Konstruktionen gegenüber

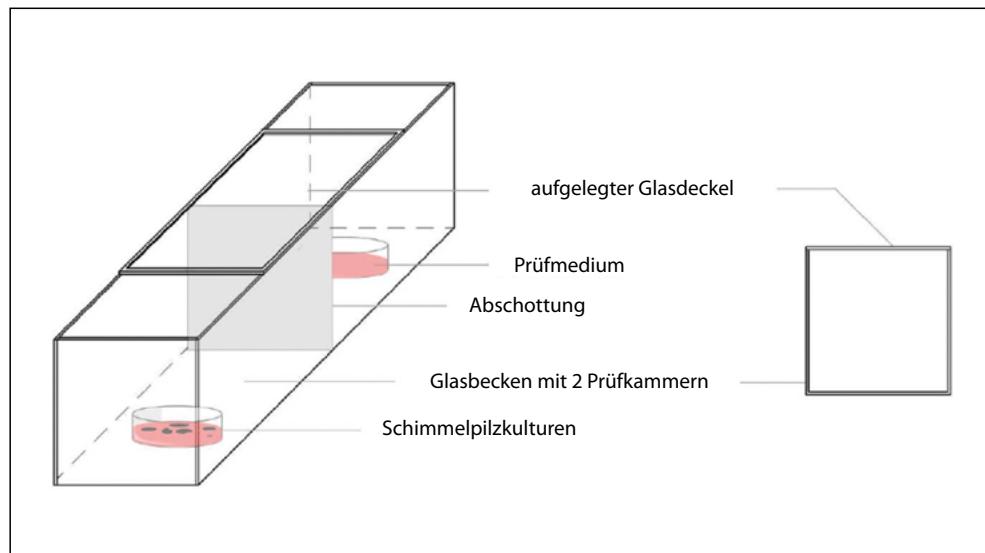
allen Bestandteilen von Schimmel geprüft“ (AIBau, 2019, S. 9 Mitte)) wurden nicht alle Bestandteile von Schimmel untersucht. Gemäß Kapitel 6 wurde lediglich untersucht, ob und ggf. in welchem Ausmaß übliche Baustoffe und Bauteilkonstruktionen durchlässig für Schimmelpilzsporen (flugfähige Verbreitungsorgane des Schimmels) und Hyphenfragmente (Bruchstücke der Zellfäden des Schimmels, Teil des Myzels) sind. Nicht untersucht wurde die Durchlässigkeit für MVOC, Endotoxine, Mykotoxine usw.

## Grundsätzlicher Versuchsaufbau

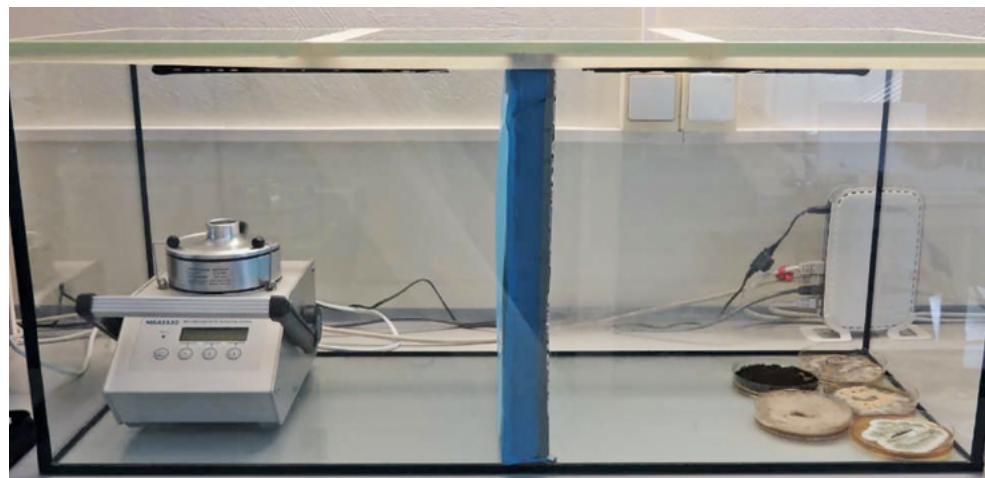
Eine längliche Prüfkammer aus Glas wurde in 2 Kammern unterteilt (siehe Abb. 4) (AIBau, 2019, S. 52). Zwischen den beiden Kammern wurden als „Abschottungen“ im Folgenden genannte, übliche Baustoffe eingebaut und geprüft:

- Gipskartonplatten (nicht hydrophobiert, hydrophobiert) sowie faserarmierte Gipsplatte,
- Holz (massiv und verleimt) und Holzwerkstoffe (mitteldichte Holzfaser- [MDF-]Platte, Pressholz, Holzfaserplatte und Oriented-Strand-Board- [OSB-]Grobspanplatte),
- übliche Dämmstoffe für Trittschalldämmungen (expandiertes und extrudiertes Polystyrol) und in Dach- bzw. Wandhohlräumen (Steinwolle),
- mineralische Baustoffe (Betonestrich),
- dampfdichte Baufolien.

Die Baustoffe seien mit „bauüblichen“ Fugenbändern („Die zu prüfenden Baustoffe bzw. Bauteilkonstruktionen wurden mit üblichen Randabschlüssen zwischen den Kammern eingesetzt, z. B. mit bauüblichen Fugenbändern in den Randbereichen abgedichtet.“ (AIBau, 2019, S. 53 unten)) in den Randbereichen abgedichtet. In Abb. 63 der Studie ist jedoch zu erkennen, dass diese „bauüblichen“ Fugenbänder durch Aluminiumklebebänder simuliert wurden. Solche konvektiv und diffusiv dichten Aluabklebungen werden in der Baupraxis als Fugenabdichtungen jedoch üblicherweise nicht eingesetzt. Sie werden normativ für übliche Innenraumanwendungen auch nicht vorgeschrie-



**Abb. 4:** Versuchsaufbau zur Untersuchung der Durchlässigkeit von Baustoffen für Schimmelpilzsporen (Quelle: AlBau, 2019, Abb. 60)



**Abb. 5:** Laboreinrichtung zur Untersuchung der Durchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionen für Schimmelpilzsporen (Quelle: AlBau, 2019, Abb. 61)

ben, sondern werden nur bei der Erstellung von Abschottungen oder Dampfsperren beispielsweise im Schwimmabdbereich verwendet.

Nachdem das jeweilige Prüfmedium zwischen den Kammern (Schwarz- und Weißbereich) installiert und die geöffneten Petrischalen im Schwarzbereich aufgestellt wurden (siehe Abb. 5), sei der Aufbau eine Woche lang unverändert im Ruhezustand verblieben. In dieser Zeit hätten nach Angaben der Verfasser Pilzsporen oder andere mikrobiell-organische Bestandteile lediglich durch Diffusion von der Schwarzkammer über die „Abschottungen“ in die Weißkammer gelangen können.

Bereits hier stellt sich die Frage nach dem Sinn dieses Versuchsaufbaus. Die Diffusion von Partikeln ist nur bei Partikelgrößen  $<< 1 \mu\text{m}$  relevant (Hinds, 1999). Schimmelpilzsporen und unter dem Lichtmikroskop bestimmmbare Myzelfragmente sind jedoch deutlich größer.

Im letzten Schritt seien in der Schwarzkammer nach 7 Tagen 2 Ventilatoren (Computerlüfter) für 8 Stunden betrieben worden, um eine verstärkte Luftströmung auf die jeweiligen „Abschottungen“ wirken zu lassen. Auch hier stellt sich die Frage nach dem Sinn dieses Versuchsaufbaus: Eine solche Luftströmung wäre lediglich relevant für einen konvektiven Stofftransport. Dieser wurde aber gerade



**Abb. 6:** Einbau eines Estrichrandstreifens bzw. eines Feuchtraumpaneels in die Simulationskammer (Quelle: AIBau, 2019, Abb. 62/63)

durch die sorgfältige Abklebung möglicher Leckagen (siehe Abb. 6) an den Randanschlussfugen verhindert.

Sowohl nach der ruhenden (Passivmessung) als auch der bewegten Exposition (Aktivmessung) seien neben den durch die „Abschottungen“ dringenden, wachstumsfähigen Sporen auch Gesamtsporen einschließlich Hyphenfragmenten mit dem Luftkeimsammler aufgenommen und ausgewertet worden.

Während die Absicht der vorliegenden Untersuchung gut erkennbar ist, hegen wir große Zweifel an der wissenschaftlichen Aussagekräftigkeit des Versuchsaufbaus und der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine reale Situation.

### Randbedingungen der Prüfung

Die Randbedingungen der in der AIBau-Studie (AIBau, 2019) beschriebenen Prüfungen wurden entgegen dem wissenschaftlichen Standard nicht angegeben. Folgende Randparameter sind aber für eine Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Prüfungen und der darauf basierenden Schlussfolgerungen wesentlich:

■ Größe und Volumen der Versuchskammer: Diese Größen konnten aber anhand des Fotos des abgebildeten Probenahmegerätes MBASS abgeschätzt werden. Gemäß Datenblatt des Herstellers Holbach (Holbach Umweltanalytik, 2018) weist der MBASS folgende Abmessungen auf ( $B \times H \times T$ ):  $180 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$  (ohne Sammelkopf). Anhand des Bildes lässt sich die Breite einer Kammer mit 2,5-facher Breite, 1,5-facher

Tiefe und 3-facher Höhe abschätzen. Hierdurch ergibt sich ein Volumen der beiden Kammern von jeweils etwa 80 bis 100 l.

■ Probenahmenvolumen: Aufgrund der angegebenen Ergebnisse mit den Ergebnisabstufungen auf Basis eines Vielfachen von 10 ist von einem üblichen Probenahmenvolumen von 100 l für die Kultivierungen auszugehen. Bei den Gesamtsporen ist aufgrund der Ergebnisangabe als Vielfaches von 5 von einem Probenahmenvolumen von 200 l auszugehen. Der Probenahmenvolumenstrom dürfte gemäß den Herstellerangaben bei jeweils 30 l/min liegen. (Bei der Kultivierung ist nicht auszuschließen, dass ein LKS 100 verwendet wurde und der Probenahmenvolumenstrom bei 100 l/min lag).

Geht man von einer nahezu 100 %igen Abscheidung der Partikel durch das Impaktorsystem aus, entspricht dies einem Luftwechsel von 20/h bis 66/h während der Probenahme, wodurch ein erheblicher Luftreinigungseffekt durch die Probenahme gegeben ist. Dies widerspricht lange bekannten grundlegenden Erkenntnissen beim Messen von Innenraumluftverunreinigungen. So findet sich in VDI 4300 Blatt 2:1997-12 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Meßstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzop-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB)“ und VDI 4300 Blatt 4:1997-04 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Meßstrategie für Pentachlorphenol (PCP) und

<gamma>-Hexachlorcyclohexan (Lindan) in der Innenraumluft“ folgende Angabe bezüglich des Probenahmenvolumenstroms: „Weiter ist zu beachten, dass das stündlich angesaugte Probeluftvolumen 10 % des Raumvolumens nicht überschreiten darf. Mit dieser Begrenzung soll erreicht werden, dass die Störungen der Raumatmosphäre durch die Probenahme auf ein Minimum begrenzt werden. Bei Nichtbeachtung ist mit Verfälschungen der Messergebnisse zu rechnen, z. B. aufgrund einer luftreinigenden Wirkung durch die Probenahme und gestörte Gleichgewichtseinstellungen zwischen Materialien und Raumluft.“ (VDI 4300 Blatt 2: 1997-02; VDI 4300 Blatt 4:1997-04)

### Eigenschaften von Fugendämmmaterialien

Neben der Prüfung der Diffusion von Partikeln durch Plattenbaustoffe wurde im AIBau-Projekt als exemplarisches Bauteil die Estrichrandfuge geprüft (AIBau, 2019, Abb. 62). In der Versuchsbeschreibung fehlen allerdings über den Materialtyp (Mineralwolle, Polyethylenschaum [PE-Schaum]) hinausgehende wichtige technische Angaben, um den Versuch nachvollziehen zu können. Um eine Vorstellung von der Bandbreite verwendeter Materialien zu bekommen, stellen wir hier einige entsprechende Produkte mit ihren technischen Eigenschaften vor.

Der Estrich-Randdämmstreifen trennt den Estrich von angrenzenden Bauteilen, die Schallübertragung des Trittschalls vom Boden zu den Wänden wird gedämpft und die Schallwellen am Übergang vom Estrich zur Wand und dadurch zum Nachbarn werden behindert. Zur Verfügung stehen diverse Materialien. Am gebräuchlichsten sind Randdämmstreifen aus PE-Schaum, Mineralfaser und Waben-Pappkarton.

Die Randdämmstreifen unterscheiden sich nicht nur anhand der eingesetzten Materialien, Baustoffklassen, Breiten und Stärken, sondern auch anhand ihrer Funktionen und Ausführungen, welche die verschiedenen Randdämmstreifen mitbringen. Folgende Ausführungen sind marktüblich:

- Standard,
- mit Folienlasche zum Auflegen auf den Dämmstoff,
- mit Folienlasche und rückseitigem Klebestreifen.

Bei Heizestrichen muss der Randdämmstreifen eine Bewegung von mindestens 5 mm ermöglichen. Bei Gussasphalt muss das Material kurzfristig hitzebeständig sein. Bei bestimmten Brandschutzanforderungen muss das Material unbrennbar sein.

Die normativen Vorschriften sehen für Randdämmstreifen eine Mindeststärke je nach Estrichausführung vor. Für Böden ohne Fußbodenheizung reicht in der Regel ein 5 mm starker Randstreifen aus. Bei Böden mit Fußbodenheizung ist ein entsprechend stärkerer Randstreifen von mindestens 8 mm zu wählen.

Die Folienlasche am Randdämmstreifen ist für Fließesträle / dünnflüssige Estriche zu wählen, da dieser in Verbindung mit der eingebrachten Baufolie ein Hinterlaufen und somit den Kontakt des einzubringenden Estrichs mit anderen Bauteilen verhindert. Für alle nicht dünnflüssigen Estriche kann ein Randstreifen ohne Folienlasche gewählt werden.

Bei einem Estrichdämmstreifen mit Klebestreifen und Folienlasche ist zumindest theoretisch denkbar, dass dieser eine luftdichtende Wirkung gegenüber der Estrichdämmung hat. Die Praxis zeigt aber, dass der Klebestreifen auf dem frischen Putz nicht überall hält (siehe Abb. 8), weshalb häufig zusätzlich getackert werden muss. Eine Luftdichtigkeit ist in diesem Fall nicht gegeben.

### Bestimmungsgemäß feuchte Bauteile

Die Bauordnungen der Länder schreiben vor, dass Bauwerke und Bauteile so zu planen und auszuführen sind, dass durch Wasser oder Feuchtigkeit keine Schäden oder unzumutbaren Belästigungen entstehen.

In Kapitel 4.2.2 des AIBau-Projektberichtes wird thematisiert, dass auch Fußbodenauflagen in Innenräumen bestimmungsgemäß feucht sein könnten, ohne dass von diesen eine Gesundheitsgefährdung ausgehe. So könnten bei privaten oder öffentlichen Nassräumen nach der aktuellen Norm für Innenraumabdichtungen (DIN 18534 „Abdichtung von Innenräumen“) Abdichtungen unterhalb des Fußbodenauflaus angeordnet werden. Ein Austausch dieser durchfeuchteten Bauteilschichten sei unsinnig, da die Durchfeuchtungen durch die Nutzung bedingt wiederholt

aufträten. Diese Bauteilschichten seien i. d. R. zum Innenraum abgeschottet, sodass für Bewohner und Nutzer keine negativen gesundheitlichen Auswirkungen entstünden. Belege für diese Behauptung in irgendeiner Form werden hierfür jedoch nicht aufgeführt (AIBau, 2019, S. 21).

Die von dem AIBau (AIBau, 2019, S. 58) zitierten DIN-Normen DIN 18534-1:2017-07 „Abdichtung von Innenräumen – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungegrundsätze“ und DIN 18534-2:2017-07 „Abdichtung von Innenräumen – Teil 2: Abdichtung mit bahnformigen Abdichtungsstoffen“ beschreiben – anders als im Projektbericht suggeriert – keine Fußbodenaufbauten mit bestimmungsgemäß feuchten Bauteilschichten. Die in Innenräumen unter Estrichen üblichen Dämmschichten werden in Punkt 5.2.1 der DIN 18534-1:2017-07 explizit als Beispiel für feuchteempfindliche Bauteilschichten genannt, die eine Abdichtung darüber zu ihrem Schutz erforderlich machen (DIN 18534-1:2017-07, S. 12 oben). Dies bedeutet, dass Abdichtungsbauweisen, bei denen die Abdichtungsschicht unterhalb der Dämmschicht oder des Estrichs liegt, nur im Bereich der Wassereinwirkungsklasse W0-I eingesetzt werden dürfen, also bei Flächen, bei denen aufgrund nicht häufiger Einwirkung von Spritzwasser gar nicht mit einem Eindringen von Feuchtigkeit in die Dämmschicht zu rechnen ist (z. B. Bereiche von Bodenflächen im häuslichen Bereich ohne Ablauf z. B. in Küchen, Hauswirtschaftsräumen, Gäste-WCs). Im Falle eines Eindringens ist der Vorteil dieser Bauweise, dass sie andere Bauteile sicher vor dieser Feuchtigkeit schützt, es keine regelmäßige Wartungsnotwendigkeit gibt, die Möglichkeiten einer Leckortung und die Reparatur von in der Estrichdämmschichtebene gelegenen Installationen gegeben ist und der Aufwand für die Beseitigung des Schadens (Trocknung der Estrichdämmschicht) gering ist (DIN 18534-1:2017-07, Anhang B).

Ein Beispiel für bestimmungsgemäß feuchte Estrichdämmschichten in Innenräumen wird im Projektbericht des AIBau 2019 nicht genannt (AIBau, 2019, S. 23–50). Bestimmungsgemäß feuchte Bauteile sind uns und den von uns befragten Sachverständigen für Schäden an Gebäuden in der breiten Baupraxis ausschließlich bei keramischen Fliesenbelägen bekannt. Diese haben sich seit vielen Jah-

ren als Bauteiloberfläche auch bei hohen Wassereinwirkungsklassen bewährt, obwohl der keramische Belag selbst keine Abdichtungsebene ersetzen kann, weil die Fuge eines Fliesenbereiches als wasserdurchlässig anzusehen ist. Dies ist nicht als kritisch anzusehen, weil alle an dem keramischen Verbund beteiligten Materialien (keramische Fliese, Fugenmörtel, Fliesenkleber und Abdichtung) dauerhaft nass oder durchfeuchtet sein dürfen, ohne dass das System Schaden nimmt. Bei einer sauberen Ausführung des Systems ist auch nicht zu erwarten, dass mikrobieller Befall auftritt, weil keine geeigneten organischen Nährstoffe vorhanden sind, im Gegensatz zu üblichen Dämmschichten.

Ein Ziel des Projektes des AIBau sei gewesen, die Frage zu klären, ob von im Inneren bestimmungsgemäß feuchten Bauteilen eine grundsätzliche Gefahr ausgehe, sodass sie abgebrochen und ersetzt werden müssen. Hierzu sei in einem Prüfstand untersucht worden, welche Baustoffe und Baukonstruktionen die Übertragung von Schimmelpilzsporen von kontaminierten Bereichen in Innenräume verhindern würden. Dazu sei die Dichtheit bauüblicher Stoffe und Konstruktionen gegenüber allen Bestandteilen von Schimmel geprüft worden. Für Bauteilschichten, die unvermeidbar und nach ihrer Bestimmung durchfeuchtet werden, sei vorausgesetzt worden, dass die jeweils feuchten Bereiche aus feuchtigkeitsbeständigen Stoffen bestünden, die durch Feuchte und mikrobiellen Bewuchs nicht substanziell geschädigt werden könnten. Weiterhin sei vorausgesetzt worden, dass bestimmungsgemäß trockene Bauteile durch kurzzeitige Feuchtigkeitereignisse nicht substanziell geschädigt würden (AIBau, 2019, S. 9 oben).

In Kapitel 7.3 wird ausgeführt, dass „bestimmungsgemäß feuchte Estriche“ die Standardausführung früherer Abdichtungsnormen in Innenräumen mit offener Wassernutzung im 20. Jahrhundert dargestellt hätten. Erneut wird fälschlicherweise dargestellt, dass nach der im Juli 2017 erschienenen Norm für Innenraumabdichtungen (DIN 18534-1:2017-07 und DIN 18534-2:2017-07) „bestimmungsgemäß feuchte Estriche“ ausgeführt werden durften, obwohl Dämmschichten explizit als Beispiel für feuchteempfindliche Bauteilschichten genannt werden und Estriche ohne Dämmschichten aus unterschiedlichsten Gründen in häufig genutzten Innenräumen eher selten an-

zutreffen sind. Dennoch wird erneut behauptet, dass durch „bestimmungsgemäß feuchte Estriche“ keine hygienisch problematischen Situationen entstünden. Als Beleg wird einzig die bereits zitierte Umfrage unter Bausachverständigen genannt, denen, ohne Messungen oder medizinische Untersuchungen durchzuführen, keine hygienischen Probleme aufgefallen wären (AIBau, 2019, S. 59 oben).

In Kapitel 7.5 „Geruchsbildung“ wird beschrieben, dass feuchte Bauteile gerade nicht Bestandteil des Untersuchungskonzeptes gewesen seien. Allerdings zeige sich in der Praxis kein Problem bei bestimmungsgemäß feuchten Fußbodenaufbauten in z. B. Nassräumen oder älteren Badezimmern, in denen Abdichtungen unter Estrichen angeordnet seien. Gerüche seien dort nach sachverständiger Erfahrung der Autoren regelmäßig auf befallene, feuchte Stellen zurückzuführen, die gegenüber Innenräumen offen seien und damit in unmittelbarem Verbund mit der Raumluft stünden (AIBau, 2019, S. 59 unten f.). Wir verstehen: Wenn Bauteile länger feucht waren und daher mikrobiellen Befall entwickelt haben, waren regelmäßig mikrobielle Gerüche wahrzunehmen. Dies entspricht auch unseren Erfahrungen. Wenn Estrichaufbauten nicht im unmittelbaren Verbund mit der Raumluft standen, waren diese auch zwangsläufig für die gegebene Wassereinwirkung (gelegentliches Spritzwasser) ausreichend abgedichtet, obwohl sich die eigentliche Abdichtungsebene unterhalb der Estrichkonstruktion befand.

Über diese einfachen Beobachtungen hinausgehende wissenschaftliche Untersuchungen (bezüglich bestimmungsgemäß feuchter Fußbodenaufbauten) wurden im Forschungsprojekt des AIBau nicht durchgeführt. Worauf die Behauptung der Autoren in ihrer Zusammenfassung in der deutschen Bauzeitung (Zöller et al., 2020, S. 110 rechts unten) beruht, dass das Forschungsprojekt erkläre, warum die seit Jahrzehnten üblichen Fußbodenaufbauten mit bestimmungsgemäß feuchten Schichten hygienisch funktionierten, bleibt daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht nachvollziehbar.

Ohne wissenschaftlichen Beleg bleibt auch die Aussage der Autoren (Zöller 2019b, 2020b), dass eine im letzten Jahrhundert verwendete Bauweise mit „bestimmungsgemäß ständig feuchten Fußbodenaufbauten“ selbst in

früheren OPs die hygienischen Verhältnisse nicht beeinträchtigte, obwohl sie von der aktuellen Normierung (zumindest beim Einbau von Dämmschichten) nicht gedeckt wird und die wissenschaftlich belegten Erkenntnisse der gesicherten Assoziation von mikrobiellem Befall und gesundheitlichen Beschwerden erst aus diesem Jahrhundert stammen. Es verbleibt die Frage, warum heutzutage mit dem Fortschritt der hygienischen Erkenntnisse nicht mehr so gebaut wird.

### Gesundheitliche Aspekte

Der Schimmelleitfaden des Umweltbundesamtes fasst den wissenschaftlichen Stand 2017 der Wirkungen von Schimmel in Innenräumen auf die Gesundheit des Menschen wie folgt zusammen:

„Bevölkerungsbezogene Studien haben hinreichend gezeigt, dass Menschen, die Feuchte/Schimmel in Innenräumen ausgesetzt sind, einem erhöhten Risiko vielfältiger Atemwegserkrankungen unterliegen [...]. Vor allem bei Kindern, die in Wohnräumen mit sichtbarem Schimmelbefall/Feuchte aufwachsen, deuten die Studienergebnisse auf eine insgesamt nachteilige gesundheitliche Entwicklung der betroffenen Kinder hin. Bei Kindern mit bestehendem Asthma wird nach neueren Studien ein kausaler Zusammenhang von Schimmelbefall mit einer Verschlimmerung der Erkrankung konstatiert [...]. Ein Zusammenhang zwischen feuchten Innenräumen und/oder Schimmelbefall und der Entstehung von Asthma, insbesondere bei Kindern, kann als gesichert angesehen werden. Darüber hinaus bestehen Zusammenhänge mit der Entwicklung von Asthma und der Verschlimmerung von Asthma bei Erwachsenen, mit Atemwegsinfektionen sowie mit Symptomen wie Husten, keuchenden Atemgeräuschen und Atemnot [...].“ (Umweltbundesamt, 2017, S. 37 Mitte)

Zu dieser wissenschaftlich eindeutig beschriebenen Faktenlage äußern sich die Autoren M. Zöller, S. Sous und T. Warscheid in der Bauzeitung bei Vorstellung ihrer Forschungsergebnisse wie folgt:

„Die Existenz von schimmelpilzspezifischen Krankheitssymptomen wird gegenwärtig vom Großteil der Mediziner verneint.“ (Zöller et al., 2020, S. 110)

Diese Aussage ist angesichts der wissenschaftlichen Faktenlage nicht nachvollziehbar. Verwiesen wird als Quelle auf die Schimmelpilz-Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) „Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen“ (AWMF, 2016). Versucht man jedoch, dieses Zitat dort zu finden, wird man nicht fündig. Stattdessen liest man:

„Feuchte-/Schimmelschäden, von denen eine gesundheitlich relevante Exposition und damit ein potenzielles Gesundheitsrisiko für gesunde Personen ausgehen kann, betreffen (sichtbare oder nicht sichtbare) Schadensfälle mit mikrobiologischer Besiedlung, insbesondere Schimmelpilzbefall mit aktivem Schimmelpilzwachstum (viable) oder mit abgetrockneten (non-viable) Schimmelpilzen, bei denen eine erhöhte Freisetzung von Schimmelpilzbestandteilen (Sporen, Myzel etc.) und anderen Biostoffen wahrscheinlich ist.“ (AWMF, 2016, S. 4)

und

„Schimmelpilzwachstum im Innenraum ist aus Sicht der Prävention als ein potenzielles Gesundheitsrisiko zu betrachten, auch ohne dass ein quantitativer und kausaler Zusammenhang zwischen dem Vorkommen einzelner Arten und Gesundheitsbeschwerden gesichert werden kann. Ein Feuchteschaden und/oder ein Schimmelpilzwachstum in Innenräumen ist aus gesundheitlicher Sicht immer ein hygienisches Problem, das – auch ohne dass Gesundheitsstörungen vorhanden sind – nicht hingenommen werden darf. Vielmehr sollte hier nach dem Vorsorgeprinzip die Belastung minimiert oder wenn möglich beendet werden. Die wichtigste Präventionsmaßnahme bei Schimmelpilzexpositionen im Innenraum ist die Klärung der Ursache des Feuchte-/Waserschadens und die sachgerechte Sanierung.“ (AWMF, 2016, S. 4)

Wir befürchten, dass bei der Bearbeitung von Schimmelschäden in Innenräumen im Rahmen von Schadensfällen durch derartige Äußerungen der AIBau-Autoren die wissenschaftlich belegten Gesundheitsgefährdungen von Schimmel in Innenräumen in den Hintergrund gedrängt werden sollen und Sanierungsmaßnahmen, die solche Gefährdungen ausschließen, nicht in dem erforderlichen Ausmaß durchgeführt werden.

Statt die Ursachen für Erkrankungen durch sachgemäße Sanierungen zu beseitigen, werden so Krankheitskosten als Folge unterlassener Sanierung sozialisiert und Geschädigte um ihr Recht auf gesundheitliche Unversehrtheit gebracht.

### Praxisbeispiele für Baustoffe und Randanschlüsse

Der Projektbericht AIBau 2019 stellt neben Umfragen und Versuchsaufbauten in Prüfkammern auch mehrere Praxisbeispiele zur Unterfütterung der Hypothese zur wirksamen partikeldichten Abschottung von bauüblichen Baustoffen in ihrer praktischen Einbausituation dar. Sie sollen als Beleg dafür gelten, dass bereits sogenannte durchdringungsdichte Baustoffe bzw. übliche Bauteilschichten mit bauüblichen Randanschlüssen, wie z. B. Gipskartonwände und PE-Estrich-Randdämmstreifen, Schimmel aus Bauteilen gegenüber Innenräumen abschotten. Am häufigsten wurden gemäß der Umfrageergebnisse Befälle in Fußbodenkonstruktionen und leichten Wandkonstruktionen festgestellt.

Aufgrund unserer eigenen gutachterlichen Praxis, die zahllose Schadstoffuntersuchungen und Entwicklungen von Sanierungskonzepten über mehrere Jahrzehnte abdecken, kommen wir jedoch zu ganz anderen Schlussfolgerungen. Im Folgenden legen wir dar, wie nach unseren Beobachtungen Baustoffe und Bauteile verbunden werden und wie üblicherweise Randanschlüsse gefertigt werden.

#### Estrich-Randdämmstreifen – Verlegeart 1 mit Verklebung

Bei der idealen Verlegung von Randdämmstreifen wird ein PE-Winkelstreifen auf die Dämmung gestellt und verklebt. Die Dämmstreifen müssen dabei auch sauber in und um Ecken, Türzargen und dergleichen verlegt werden (siehe Abb. 7). Eine derartige Verlegeart kann bei Verwendung des richtigen Materials nach Einbringen des Estrichs durchaus partikeldicht sein. Eine Luft- und Geruchsdichtigkeit ist bei diesem Randanschluss mangels Diffusions-



**Abb. 7:** Beispielabbildungen für die Verlegung von Randdämmstreifen an Innen- und Außenecken nach Verlegeart 1 (Quelle: Pavidensa, 2014, S. 3)

dichtigkeit des eingesetzten Kunststoffes nicht gewährleistet.

Aber auch bei einer Verklebung des PE-Randdämmstreifens kann es zu Fehlstellen in der Verklebung kommen, sodass eine durchgängige Partikeldichtheit nicht gewährleistet ist, auch wenn das Material selbst einen gewissen Durchdringungswiderstand für Partikel aufweist. Diese Fehlstellen sind häufig jedoch erst nach Rückbau des Bodenaufbaus feststellbar (siehe Abb. 8). Würde in einem Schadensfall der Aufbau ungeprüft bestehen bleiben, hätte diese „Abschottung“ aufgrund der unvollständigen Anschlussfugen dauerhaft ihre Wirkung hinsichtlich Schimmelabschottung verloren. Sporen usw. gelangen aus dem Hohlraum der Fußbodenkonstruktion in die Raumluft.

Dass Estrich-Randdämmstreifen auch im Neubau nicht partikeldicht sind, zeigen diverse Fälle von Fogging, bei denen schwarze Verfärbungen durch den Eintrag von Partikeln aus der Estrichdämmeschicht an den Fußbodenrandstreifen zu sehen sind. Erzeugt man mittels Blower-Door-Gebläse einen üblichen Gebäudeunterdruck von 10 Pa, lässt sich mit dem Laserpartikelzähler der Eintrag von Feinstaub durch die Randfugen nachweisen (siehe Abb. 9; siehe auch Abb. 14).



**Abb. 8:** Nach Rückbau sichtbare Fehlstellen in der Verklebung der Randdämmstreifen (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2020)



**Abb. 9:** Austritt von dunklen Partikeln (auf weißem Teppichboden) an Undichtigkeiten an den Estrichrandfugen (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2015)

### Estrich-Randdämmstreifen – Verlegeart 2 ohne Verklebung

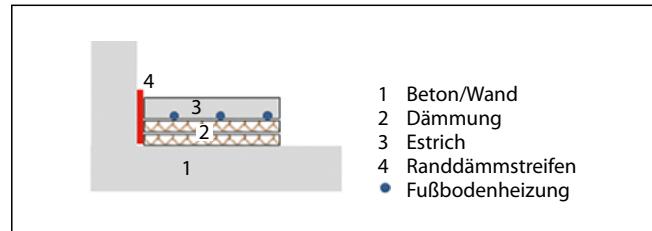
Häufig ist in der Praxis die zweite Verlegeart anzutreffen, wobei der Randdämmstreifen hinter die Dämmungen gestellt wird, oftmals ohne Verklebung (siehe Abb. 10). Eine exakte Eckenbildung ist nahezu unmöglich bei dieser Verlegeart und die Randstreifen liegen nicht parallel an den Wänden an (Pavidensa, 2014). Eine Luft- und Partikeldichtheit zu erreichen, wie sie bei einer Abschottung erforderlich ist, ist bei dieser Verlegeart des Randdämmstreifens somit nahezu unmöglich, auch wenn das verwendete PE-Material selbst einen Durchdringungswiderstand für Partikel aufweist. Eine Diffusionsdichtigkeit ist nicht gegeben.

In Abb. 6 (links) ist in einem Versuchsaufbau der AI-Bau-Studie eine ideale Einpassung und Parallelausbildung eines Estrich-Randdämmstreifens (im Bild grün) zu sehen, der auf die gesamte Höhe des Estrichs zwischen Mauerwerk und Zementestrich verlegt wurde (ohne Eckenausbildung) und bei dem ein idealer Verformungsausgleich zwischen Schwund und Ausdehnung des Estrichs vorliegt, ohne Einfluss von Temperaturschwankungen.

Dieser Versuchsaufbau kann mit den entsprechend verwendeten durchdringungsdichten Materialien des Randdämmstreifens partikeldicht sein. Wird diese Ideallösung in der Praxis ebenfalls genauso umgesetzt, könnte es auch in der Praxis dicht sein. Doch wie sieht die Umsetzung dieses wichtigen Bauteils, des Randdämmstreifens, der zum Schallschutz und zur Verhinderung von SpannungsrisSEN im schwimmenden Estrich gedacht ist, in der bauüblichen Praxis aus?

Im Gegensatz zum beschriebenen Versuchsaufbau einer Idealkonstruktion finden wir in der täglichen Praxis in Neubauten beispielhaft die in Abb. 11 bis 14 gezeigten Umsetzungen von Randdämmstreifen vor.

Eine luft- und partikeldichte Abschottung stellen die gezeigten, für die gegenwärtige Baupraxis repräsentativen Estrich-Randdämmstreifen nicht dar, obwohl die verwendeten Randdämmstreifenmaterialien sehr wahrscheinlich einen hinreichenden Durchdringungswiderstand für Partikel aufweisen. Sporen, Gerüche und sonstige Schimmel-



**Abb. 10:** Beispielabbildung für die Verlegung von Randdämmstreifen an Innen- und Außencken nach Verlegeart 2 (Quelle: Pavidensa, 2014, S. 2)



**Abb. 11:** Loser Estrich-Randdämmstreifen an einer Innenecke bei Rohrdurchführungen (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019)



**Abb. 12:** Ausbildung einer Innenecke mit dahinter gestellten Randdämmstreifen, Hohlraumbildung (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019)



**Abb. 13:** Ausbildung einer Innenecke mit dahinter gestellten Randdämmstreifen, keine Parallelbildung am Wandbereich, Messinstrument ist bis auf Bodenplatte im Hohlraum versenkbar (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019).



**Abb. 14:** Austritt von dunklen Partikeln an Estrichrandfugen an Innen- und Außenbeckbereichen, lückenhafte undichte Randdämmstreifen sind zu vermuten (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2013).



**Abb. 15:** Abdichtungsversuch Heizungsverteilerkasten (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2020)



**Abb. 16:** Praxisbeispiel üblicher Heizungsverteilerkasten (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019)

pilzbestandteile können jedoch leicht aus dem Hohlraum der Fußbodenkonstruktion in die Raumluft gelangen.

### Heizungsverteiler

In den meisten Neubauten werden heutzutage Fußbodenheizungen eingebaut. Häufig befinden sich die Verteilerkästen auch in den Wohnbereichen. Eine per se angenommene luft- und partikeldichte Abschottung von Heizungsverteilerkästen zu Estrichdämmsschichtbereichen mit dem Einsatz von bauüblichen Baustoffen ist aufgrund der Bauteilkonstruktion und der Einbausituation schlicht ausgeschlossen.

Somit besteht in Neubauten an diesen Schwachstellen immer eine Eintrittspforte für Schimmelpilzbestandteile, Gerüche und Stoffwechselprodukte von belasteten, feuchtgeschädigten Estrichbereichen in den Wohnraum.

Nur durch aufwendige Abdichtungsmaßnahmen wären diese Bereiche (Übergang Estrich zum Verteilerkasten) beispielsweise zum Bodenaufbau hinabdichtbar, wie der in Abb. 15 dargestellte Versuchsaufbau zeigt. In der Praxis wird dies bisher üblicherweise nicht angewendet (siehe Abb. 16). Auch ist die Dauerhaftigkeit in diesem Beispiel zu hinterfragen.



**Abb. 17:** Praxisbeispiel: Trockenbauvorwand mit Durchdringungen durch Anschlussrohre und Steckdosen, keine Abklebungen mit Aluminiumband der Ränder (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019)



**Abb. 18:** Leitungsdurchdringung Gipskartonwand unterhalb Estrich-Randdämmstreifen unten rechts, keine weiteren Abdichtungen (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2019)

## Leichtbauwände

Die Schlussfolgerungen des AIBau bezüglich Dichtheit von Leichtbauwänden (Gipskarton, OSB-Platten, Gipsfaserverplatten usw.) basieren auf dem Versuchsaufbau mit dem jeweiligen Baustoff, der in einer Prüfkammer eingebaut und mit Aluklebeband fest verklebt wurde (siehe Abb. 6). Somit sollte eine bauübliche Trennung zwischen Schwarz- und Weißbereich durch den Baustoff simuliert werden. „Alle untersuchten und bauüblichen Baustoffe können somit unter der Voraussetzung bauüblich dichter Randanschlüsse als sichere und effektive Abschottung gegen Schimmelpilzbewuchs bewertet werden.“ (AIBau, 2019, S. 55)

In der Praxis werden üblicherweise als dichte Anschlüsse die Gipskartonplatten, Feuchtpaneele usw. von Leichtbauwänden an den Ständerwänden nur verschraubt und an den Stoßfugen verspachtelt. Eine zusätzliche Abdichtung oder Abklebung (mit einem wie z. B. vom AIBau verwendeten, durchdringungsdichten Aluminiumklebeband) an den Fugen- und Randanschlussstellen zu Wand-, Decken-, Türrahmen- und Bodenbereichen oder Elektroinstallationen findet in der üblichen Baupraxis nicht statt und ist normativ auch nicht gefordert. Vollflächig intakte Gipskartonwände oder -decken, ähnlich wie im Versuchsaufbau, sind darüber hinaus in Wohnräumen, z. B. aufgrund der Leitungsdurchführungen, Lichtkabelauslässe,

Steckdosenöffnungen usw., nahezu nicht vorhanden. Insofern können wir die vom AIBau genannten „bauüblich dichten Randanschlüsse“ in der Realität nicht bestätigen.

Die in Abb. 17 bis 22 gezeigten, beispielhaften Umsetzungen von Leichtbauwänden werden regelmäßig in der täglichen Praxis vorgefunden, die jedoch allesamt keine luft-, partikel- und diffusionsdichte Abschottung mit dichten Randanschlüssen darstellen.

## Praxisbeispiele für Schimmelschadensfälle

In diesem Kapitel stellen wir einige Beispiele für Schimmelschäden aus unserer gutachterlichen Praxis vor. Die Beispiele legen dar, dass bauübliche Ausführungen von Bauteilen keine ausreichenden Abschottungswirkungen gegenüber mikrobiellen Kontaminationen darstellen.

### Löschwasserschaden in einem Mehrfamilienhaus aus der Gründerzeit

In einem Mehrfamilienhaus Baujahr 1900 mit Holzbalkendecken kam es in der Dachgeschosswohnung zu einem Brand im Dachstuhl, der von der Feuerwehr mit Löschschaum gelöscht wurde. Ein Rückbau der durchfeuchteten Holzbalkendecken sowie der Gipskartenvorsatzschalen in



**Abb. 19:** Austritt von schwarzen Rauchpartikeln an Gipskartondecke nach einem Brandschaden (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2013)



**Abb. 20:** Toiletten- und Spülkastenanschlüsse in Trockenbauvorwand (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2020)



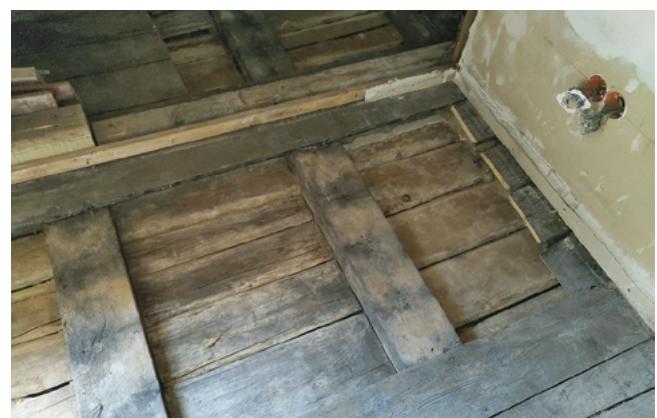
**Abb. 21:** Abgehängte Decke, zahlreiche Durchdringungen des Deckenaufbaus für diverse Installationen (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2020)



**Abb. 22:** Türrahmen in Leichtbau-Ständerwand: keine definierte Abdichtung zwischen Hohlraumluft und Raumluft möglich (Quelle/Foto: Dr. C. Krocze, 2020)

den darunterliegenden Wänden fand nur partiell statt. Dem Eigentümer der darunterliegenden Wohnung war dies suspekt und er beauftragte uns mit absichernden Untersuchungen. Abb. 23 zeigt den partiell zurückgebauten Fußboden aufbau der Dachgeschosswohnung.

In den darunterliegenden Räumlichkeiten war kein sichtbarer Schimmelbefall vorhanden, daher sollten Sanierungen nur mit Sperrgrund und Farbe erfolgen. Dies galt auch für die Gipskartonvorsatzschalen im Arbeitszimmer, an denen über Verfärbungen der Eintrag von Löschwasser deutlich erkennbar war.



**Abb. 23:** Bis zur Fehlbodenebene rückgebauter und gereinigter Fußboden aufbau über dem „Salon“ (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2020)

Um einen möglichen Eintrag von Schimmelpilzen aus dem Deckenaufbau abzuklären, wurden Raumluftmessungen in der Wohnung durchgeführt. Die Küche liegt nicht direkt unter dem Schadensbereich und kann als Referenzmessung herangezogen werden. Die Probenahmen wurden als Status-quo-Messungen unter den gegebenen Nutzungsbedingungen durchgeführt, nachdem über Nacht nicht gelüftet wurde. Im teilweise unter dem Schadensbereich liegenden Arbeitszimmer wurde zusätzlich eine Messung nach Provokation der durch Löschwasser verfärbten Gipskartonvorsatzschale durchgeführt.

Die Provokation von Bauteilen wird in Anlehnung an das in DIN EN ISO 16000-7:2007-11 „Innenraumluftverunreinigungen – Teil 7: Probenahmestrategie zur Bestimmung luftgetragener Asbestfaserkonzentrationen“ beschriebene Nutzungssimulationsverfahren z. B. durch definiertes Anblasen oder durch Erschütterungen (z. B. durch Türenschlagen, Fallenlassen von Gegenständen oder Klopfen auf Bauteile / Antippen) von Boden und Wänden durchgeführt, im vorliegenden Fall durch Klopfen auf Gipskartonwände.

Tabelle 2 zeigt die Messergebnisse der Gesamtsporenmessung in Sporen pro Kubikmeter. Man erkennt einen extrem hohen Eintrag von Pilzsporen inklusive kompletter Konidienträger in den Salon. Dreht man die oberhalb des Salons liegenden Fehlbodenbretter herum, ergibt sich die in Abb. 24 gezeigte Situation.

Die Ergebnisse aus unserer Laboruntersuchung zeigen einen „frischen, flauschigen Bewuchs mit *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Mucor* usw., der mehr oder weniger alles überwächst“ Das Beispiel zeigt eindrucksvoll, dass bauübliche Baustoffe und Konstruktionen standardmäßig keine ausreichende Abschottung insbesondere gegenüber den kleinen Sporen von *Penicillium*/*Aspergillus* leisten.

Dies wird auch für den Fall des Arbeitszimmers bestätigt, bei dem die Provokation einer Gipskartonwand und der abgehängten Decke durch Klopfen durchgeführt wurde und die Raumluftkonzentration der typischen Außenluftpilze wie Basidiosporen und *Cladosporium* spp. nahezu gleich bleiben, die Konzentrationen der am Schaden beteiligten Pilze wie *Acremonium* spp., *Aspergillus*/*Penicillium* spp. sowie des Myzelbruches aber signifikant ansteigen (siehe Abb. 25).



**Abb. 24:** Deckenaufbau über dem Salon. Die Fehlbodenbretter wurden jeweils umgedreht und ansonsten an ihrer Position belassen (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2020).



**Abb. 25:** Deckenkonstruktion nach Öffnung mit deutlich sichtbarem Schimmelbefall (Quelle/Foto: J. Thumulla, 2020)

**Tabelle 2:** Gesamtsporenmessung im Altbau (gemäß DIN ISO 16000-20:2015-11 „Innenraumluftverunreinigungen – Teil 20: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Bestimmung der Gesamtsporenanzahl“)

Gattung/Partikel in Sporen/m <sup>3</sup>	Probenahmenvolumen						
	Außen 200 l	Küche 100 l	Flur 100 l	Salon 200 l	AZ 100 l	AZ prov. 100 l	WZ 200 l
<b>Acremonium spp.</b>	160		160		100	800	
<b>Alternaria/Ulocladium spp.</b>	200	80	20			40	
<b>Ascosporen</b>	200	40	120	40	80	240	40
<b>Aspergillus/Penicillium spp.</b>	760	920	960	52.200	2.200	4.480	1.600
<b>Basidiosporen</b>	920	520	680		720	1.000	100
<b>Chaetomium spp.</b>	20		20	40			
<b>Cladosporium spp.</b>	11.680	1.880	3.560	240	2.920	2.840	560
<b>Doratomyces spp.</b>							
<b>Fusarium spp.</b>							
<b>Myzelbruch</b>	800	840	160	560	120	520	80
<b>Scopulariopsis spp.</b>							
<b>Stachybotrys spp.</b>							20
<b>andere Gattungen</b>	4.560	720	800	2.200 Paecilomyces sp.	1.040		140
<b>Gesamt</b>	19.300	5.000	6.480	55.280	7.180	9.920	2.540
<b>Hautschuppen</b>	–	mäßig	mäßig	hoch	mäßig	hoch	mäßig
<b>organische Fasern</b>	–	mäßig	mäßig		mäßig	hoch	mäßig
<b>mineralischer Staub</b>	viel						mäßig
<b>Sonstige</b>				1)			

AZ Arbeitszimmer

prov. provoziert

spp. Subspezies

WZ Wohnzimmer

1) komplette Konidienträger

### Gerichtsfall Wasserschaden im Untergeschoss eines neugebauten Einfamilienhauses, Massivbauweise

In einem 2014 neu gebauten Einfamilienhaus kam es im Fußbodenaufbau des Untergeschosses zu einem Feuchteschaden durch eindringendes Wasser von außen. Die betroffenen Räume wurden als Büro und als Hobby-/Fernsehraum (Studio) für die Kinder genutzt.

Die Fußbodenkonstruktion bestand aus Zementestrich, einer Dämmsschicht aus expandiertem Polystyrol (EPS), einer PE-Randdämmfuge und einem Fliesenboden. Um zu

klären, ob aus der Estrichdämmsschicht Schimmelpilze in die Raumluft gelangen, wurden zunächst Status-quo-Messungen in den Räumen und anschließend Provokationsmessungen durchgeführt, bei denen das Springen und Hüpfen von Kindern auf dem Boden simuliert wurde, um den Estrich in Schwingung zu bringen, da die feuchtegeschädigten Räume hauptsächlich von den Kindern benutzt wurden. Als Vergleich wurden unter gleichen Bedingungen Raumluftmessungen im Flurbereich des Untergeschosses durchgeführt, in dem kein Feuchteschaden zu erwarten war. Die Ergebnisse einer Raumluft-Kultivierung ausgewählter Schimmelpilze sind in Tabelle 3 vorgestellt.

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Raumluft-Kultivierung (gemäß DIN ISO 16000-18:2012-01 „Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme durch Impaktion“)

Ort der Probenahme	1 Flur UG, in Ruhe	2 Flur UG, Provokation	3 Büro UG, in Ruhe	4 Büro UG, Provokation	5 Studio UG, in Ruhe	6 Studio UG, Provokation
<b>interne Probennummer</b>	1509-339.001	1509-339.002	1509-339.003	1509-339.004	1509-339.005	1509-339.006
<b>Nährboden</b>	DG 18					
<b>Bebrütungstemperatur</b>	25 °C					
<b>Probenvolumen</b>	100 l	50 l	100 l	50 l	100 l	50 l
<b>Pilze</b>	KBE/m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>					
<b>Alternaria sp.</b>				<b>20</b>		
<b>Aspergillus fumigatus</b>	10	20				
<b>Aspergillus sp. (A.-ochraceus-Gruppe)</b>			10			
<b>Aspergillus spp. (A.-restrictus-Gruppe)</b>	90	60	10	<b>1.400</b>	180	180
<b>Aspergillus sp. (A.-ustus-Gruppe)</b>	10					
<b>Aspergillus versicolor</b>	130	40	20	<b>480</b>	160	<b>540</b>
<b>Aureobasidium pullulans</b>						<b>40</b>
<b>Beauveria sp.</b>			10			
<b>Botrytis cinerea</b>						<b>20</b>
<b>Cladosporium spp.</b>	240	240	80	<b>140</b>	140	<b>320</b>
<b>Epicoccum sp.</b>						<b>20</b>
<b>Hefen</b>					10	
<b>Penicillium spp.</b>	30		20		90	<b>240</b>
<b>sterile Kolonien</b>	10	60	30	80		<b>60</b>
<b>weitere Pilzarten</b>						
<b>Summe</b>	520	420	180	<b>2.120</b>	630	<b>1.420</b>
KBE koloniebildende Einheiten	sp. Spezies	spp. Subspezies	UG Untergeschoss	1) berechnet		

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Kernbohrungen mit Pilznachweis (gemäß DIN ISO 16000-21:2014-05 „Innenraumluftverunreinigungen – Teil 21: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme von Materialien“)

Proben	Aussehen	Pilznachweis	Sonstiges
23 Studio UG, 1. Bohrung, Außenwand Ecke Styropor	ein EPS-Bohrkern; Oberseite un-auffällig, Unterseite (markiert) mit mineralischem Staub/Partikeln	Oberseite: mäßig viel Sporen vom Typ Aspergillus/Penicillium <sup>1)</sup>	Oberseite: –
		Unterseite: –	Unterseite: mäßig viele Bakterien
24 Studio UG, 3. Bohrung, Innenwand bei Tür Styropordämm-schicht	ein EPS-Bohrkern; Oberseite stellenweise bräunlich verfärbt, Unterseite (markiert) mit mäßig dichten, bräunlichen Verfärbun-gen	Oberseite: mäßig viel Sporen vom Typ Aspergillus/Penicillium <sup>1)</sup>	Oberseite: –
		Unterseite: mäßig viel Myzel und mäßig viele Sporen vom Typ Aspergillus/Penicillium <sup>1)</sup>	Unterseite: –

EPS expandiertes Polystyrol

UG Untergeschoss

1) berechnet

Zusätzlich wurden Materialproben aus der Estrichdämm-schicht für weitere Schimmelpilzuntersuchungen entnommen (siehe Tabelle 4).

Demnach konnten wir in der Estrichdämmsschicht der feuchtegeschädigten Räume einen eindeutigen Schimmelpilzbefall nachweisen. Die Wände hingegen waren nicht mit Schimmelpilzen besiedelt. Obwohl die Räume mit einem bauüblichen dichten Randdämmstreifen und mit einem Fliesenbelag mit hinreichendem Durchdringungs-widerstand ausgestattet waren, konnte bei einer Nutzungs-simulation von Kinderhüpfen auf dem Boden in den feuchtegeschädigten Räumen eine deutliche Erhöhung von typischen Feuchteindikator-Schimmelpilzen (vorwie-gend *Aspergillus versicolor*, *Penicillium spp.*) im Vergleich zu nicht betroffenen Bereichen und im Vergleich zu voran-gegangenen Messungen des Status quo festgestellt werden.

Es ist somit evident, dass die vorhandenen bauüblichen Baustoffe (Randdämmstreifen) in diesem Fall keine aus-reichende Wirkung als Abschottung der schimmelbesiedelten Fußbodenkonstruktion zum Innenraum gezeigt ha-ben. Eine derartige, ungenügende Abschottungswirkung der üblichen Fußbodenaufläufen und Leichtbauwände bei Druckänderungen konnte von den Autoren dieser Arbeit in den letzten Jahren in zahlreichen ähnlich gelagerten Fäl-len bestätigt werden.

## Vagabundierende Gerüche in einem Neubau

In einem weiteren Neubau kam es zu temporären Geruchs-einträgen aus der Grundierung von Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)- (EPDM-) Abdichtungsbahnen an bo-dentiefen Fenstern/Terassentüren. Die Estrichrandfugen werden mittels Polyurethan- (PU-) Dichtmasse abgedich-tet. In der Folge trat der Geruch aus einem Schiebetürein-lass in der gegenüberliegenden Haushälfte auf – und im Treppenhaus und im Büroraum im Untergeschoss (hier durchdringt ein Abwasserrohr die Estrichdämmsschicht). Auch dieses Beispiel zeigt, wie viele andere Beispiele von Geruchsübertragungen durch Leckagen zwischen Gebäu-dekompartimenten (z. B. Übertragung von Heizölgerü-chen über Leerrohre, von Tabakrauchgerüchen über Estrichrandfugen), dass übliche Bauteile nicht als Abschottung ausgelegt sind.

## Zusammenfassung

Die uns bekannten Praxisbeispiele zeigen eindrücklich, dass übliche Bauteilschichten, Hohlräume, Bauteile und ungenutzte Räume gegenüber Innenräumen im Regelfall nicht genügend gegen gasförmige und partikelgebundene Schadstoffe abschotten, weil Randfugen und Durchdrin-

gungen beispielsweise durch die Elektroinstallation bauüblich nicht dicht sind. Deshalb ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass Schimmelpilzbewuchs in Bauteilen, die nicht durch speziell geplante, ausgeführte und überprüfte Abschottungen von der Raumluft getrennt werden, sich signifikant auf die Innenraumlufthygiene auswirkt.

## Fazit

### Abschottungen in mikrobiellen Schadensfällen

Durch den gezielten Einsatz fachgerechter, geprüfter Abschottungen bzw. Absaugungen über Lüftungstechnik ist es grundsätzlich möglich, die innenraumhygienische Situation in Gebäuden zu sanieren. Sie können die Entfernung oder den Austausch von Bauteilen ersparen, ohne gesundheitliche Beeinträchtigungen von Bewohnern und Nutzern zu riskieren.

Beispiele aus unserer langjährigen gutachterlichen Praxis zeigen, dass bauübliche Bauteile und Fugenverschlüsse nicht ausreichend abschottend gegenüber Schadstoffen aus Schimmelbefall wirken. Da bisher unklar ist, welches die pathogenen biogenen Stofflasten sind, müssen Abschottungen von Schimmelschäden die Transportmechanismen aller in Frage kommenden biogenen Stofflasten (Schimmelpilzsporen, Hyphenfragmente, Bakterien, MVOC-Stoffwechselprodukte, Mykotoxine, Endotoxine usw.) abschotten.

Im Schimmelleitfaden 2017 Anlage 6 „Handlungsempfehlung zur Beurteilung von Feuchte- und Schimmelschäden in Fußböden“ wird der Umgang mit mikrobiell befallenen Estrichdämmsschichten wie folgt beschrieben:

„Wird ein eindeutiger Befall bei einem Fußboden festgestellt, wird ein Rückbau unabhängig von der Durchlässigkeit des Fußbodens empfohlen. Eine Exposition der Raumnutzer ist bei einer geringen Durchlässigkeit des Fußbodens (siehe B.2.1, Kriterium II) zwar unwahrscheinlich, bei einer Öffnung des Fußbodens oder einer Änderung des Fußbodenbelags kann sich aber eine Exposition ergeben. Erfolgt kein Rückbau, muss durch andere Maßnahmen (z. B. Aufklärung) sichergestellt werden, dass es nicht später (z. B. durch

einen Handwerker bei Reparatur- oder Erweiterungsbau-  
maßnahmen) zu einer Exposition kommt.“ (Umweltbun-  
desamt, 2017, S. 167)

„Erwägt man den Einbau einer dauerhaften Abdichtung, muss der Sachverständige folgende Aspekte prüfen und bei der Planung berücksichtigen:

- Kann sichergestellt werden, dass die Abdichtung inklusive Randabdichtung komplett dicht ausgeführt wird und dauerhaft dicht bleibt?
- Ist sichergestellt, dass der abgeschottete Bereich unterhalb der Abdichtung trocken bleibt und kein weiteres Schimmelwachstum stattfindet?
- Kann eine wasserdampfundurchlässige Abdichtung zu bautechnischen Nachteilen führen?
- Wie ist sicherzustellen, dass bei späteren handwerklichen Arbeiten das mikrobiell belastete Bauteil nicht unbedacht geöffnet wird, sondern die ausführenden Handwerker rechtzeitig vorher informiert werden, damit diese die gebotene Gefährdungsbeurteilung und die darauf aufbauende Betriebsanweisung laut Biostoffverordnung vornehmen können?“ (Umweltbundesamt, 2017, S. 160)

Die Autoren des AIBau-Projektberichtes beanstanden dagegen, dass in der Praxis immer wieder Bauteile ausgetauscht würden, die nicht geschädigt, sondern „nur befallen“ seien, obwohl diese raumhygienisch unbedenklich seien (Zöller et al., 2020). Dies erfolgt jedoch in der Regel nicht, wie die Verfasser des Forschungsprojektes glauben machen wollen,

„weil entweder rechtliche Ansprüche gegenüber Dritten, etwa Verkäufern, Vermietern oder Versicherungen, dies zu lassen oder die Bauteile aus psychologischen Gründen ausgetauscht werden, um die Bewohner zu beruhigen.“ (Umweltbundesamt, 2017, S. 160)

Hierfür gibt es im Regelfall gewichtige juristische und wirtschaftliche Gründe:

- Ein nicht ausgebauter Schimmelbefall muss als verdeckter Mangel beim Verkauf eines Gebäudes offenbart werden und führt daher zu einer Wertminderung, die häufig die Sanierungskosten übersteigt.

- Ein nicht ausgebauter Schimmelschaden kann einen nicht sachgemäß reparierten Vorschaden darstellen. Der Einwand eines Vorschadens führt für Haftpflichtgeschädigte regelmäßig zu einem erheblichen Vermögensschaden, wenn es nicht möglich ist, den neuen Schaden gegenüber dem Altschaden abzugrenzen – auch wenn er größer als der alte ist.

Das Forschungsprojekt des AIBau (AIBau, 2019) liefert keine belastbare Überprüfung der Funktionstauglichkeit einer Abschottung, wie sie gemäß der im Schimmelleitfaden definierten Nutzungsklasse IV erforderlich ist. Die durchgeführten Laborversuche in Prüfkammern sind methodisch unzureichend und berücksichtigen primär Baumaterialien statt Baukonstruktionen. Die verwendeten Baukonstruktionen und Anschlüsse entsprechen nicht der üblichen Baupraxis, sodass die Prüfkammerergebnisse nicht auf die Praxis anwendbar sind.

Die Behauptung, die Erstellung „bestimmungsgemäß feuchter Estriche“ aktueller Estrichaufbauten in Innenräumen auf Dämmsschichten sei durch die aktuelle Normung gedeckt, findet sich in den zitierten Normen nicht. Dämmsschichten werden in der DIN 18534-1:2017-07 explizit als Beispiel für feuchteempfindliche Bauteilschichten genannt, die eine Abdichtung darüber zu ihrem Schutz erforderlich machen.

Alle Aussagen der Autoren, dass nicht entfernte bzw. nicht nach den Maßgaben des Schimmelleitfadens des Umweltbundesamtes abgeschottete mikrobielle Belastungen ohne Risiko gesundheitlicher Beeinträchtigungen von Bewohnern verbleiben können, beruhen allein auf Beobachtungen befragter Bausachverständiger im Rahmen der durchgeführten Ortstermine und nicht auf medizinischen oder epidemiologischen Untersuchungen.

Zu den durch das Forschungsprojekt nicht belegbaren Schlussfolgerungen gehört daher auch, dass übliche Bauteilschichten Schimmel innerhalb von Bauteilen gegenüber Innenräumen abschotten und durch üblich verschlossene Estrichrandfugen kein konvektiver Luftaustausch stattfinde (AIBau, 2019, S. 63 Mitte) oder dass an Estrichrandfugen bereits ein Randstellstreifen abschottende Wirkung er-

zielt – auch ohne Fugenverschluss (AIBau, 2019, S. 61 oben).

Die Autoren von AIBau 2019 stellen letztlich selbst fest:

*„Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen war aber nicht validierbar, ob und wie stark Konvektion die Luft zwischen der Ebene unter und über dem Estrich austauscht und so Partikel unter dem Estrich in Innenräume gelangen können. Dies soll in einer gesonderten Untersuchung festgestellt werden.“* (AIBau, 2019, S. 62 unten)

Des Weiteren behaupten die Autoren des AIBau-Berichtes in ihrer Zusammenfassung, dass der Leitfaden des Umweltbundesamts zwar fordere, dass Abschottungen geeignet sein müssten, nicht aber darlege, welche Anforderungen für solch eine Eignung zu erfüllen seien (Zöller et al., 2020, S. 108 rechts unten). Richtig ist, dass keine Konstruktionsbeispiele angegeben werden und keine Stoffe genannt werden, mit denen Abschottungen mikrobiell belasteter Bereiche zu Innenräumen dauerhaft wirksam und zuverlässig hergestellt werden können. Falsch ist, dass die grundsätzlichen Anforderungen nicht nachvollziehbar benannt werden:

■ *„Bei Schäden außerhalb der Diffusionsdichtheitsebene ist daher zunächst zu prüfen, ob diese fachgerecht ausgeführt ist und ein Eintrag von Mikroorganismen oder mikrobiell bedingten Gerüchen in den Innenraum sicher und auf Dauer auszuschließen ist. Nur dann gilt die Nutzungsklasse IV und das mikrobiell besiedelte Material kann an Ort und Stelle verbleiben, wenn die Bauteile hinter der Absperrung bestimmungsgemäß (nach DIN 4108-7) trocken bleiben.“* (Umweltbundesamt, 2017, S. 125 oben)

■ *„[Nutzungsklasse IV:] Luftdicht abgeschottete Bauteile und Hohlräume in Bauteilen oder Räumen, die nach Anforderung der DIN 4108-7 mit geeigneten Stoffen gegenüber Innenräumen abgeschottet sind“* (Umweltbundesamt, 2017, Tabelle S. 125 unten)

■ *„Kann sichergestellt werden, dass die Abdichtung inklusive Randabdichtung komplett dicht ausgeführt wird und dauerhaft dicht bleibt?“* (Umweltbundesamt, 2017, S. 160)

## Anforderungen an Abschottungen von biogenen und chemischen Schadstoffen

Eine Abschottung von biogenen und chemischen Schadstoffen muss – wie im Schimmelleitfaden des Umweltbundesamtes beschrieben – grundsätzlich genauso wie eine Luftdichtigkeitsebene geplant und ausgeführt werden und darüber hinaus luft- und diffusionsdicht sein, ansonsten wird sie nicht funktionieren. Die Funktion einer fachgerechten Abschottung muss prüfbar sein.

Die sachverständige Praxis zeigt, dass der Nachweis der Funktionslosigkeit nicht fachgerecht geplanter Abschottungen oder Luftdichtigkeitsebenen in der Baupraxis regelmäßig über das Blower-Door-Verfahren unter Zuhilfenahme von Theaternebel (Partikel) oder Tracergas (gasförmige Stofffrachten) geführt werden kann.

Im Schimmelleitfaden wurde neben dauerhafter Luftdichtigkeit nicht nur „hilfsweise“, sondern wissenschaftlich begründet für Abschottungen mikrobieller Schäden Diffusionsdichtheit gegenüber geruchsverursachenden Stoffwechselprodukten gefordert.

**Die oben zitierten sowie weitere Textstellen des Schimmelleitfadens definieren nachvollziehbar, welche Anforderungen an fachgerechte Abschottungen mikrobieller Schadstoffe in Innenräumen zu stellen sind:**

- **Planung und Ausführung der abschottenden Ebene analog den Anforderungen an eine Luftdichtigkeitebene gemäß DIN 4108-7:2011-01,**
- **Verwendung von auch gegenüber organischen Stoffen diffusionsdichten Materialien, z. B. Alu-PE-Verbundfolien,**
- **Dauerhaftigkeit der bei der Abschottung eingesetzten Materialien gemäß DIN 4108-11:2018-11 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten“,**
- **Prüfbarbarkeit der Abschottung,**
- **Kennzeichnung und Sicherstellung, dass bei späteren Arbeiten an abgeschotteten Bauteilen der einge-**

**schlossene Befall gemäß Biostoffverordnung zur Planung eines ausreichenden Arbeits- und Umgebungs- schutzes berücksichtigt wird.**

Werden Abschottungen nach diesen Kriterien umgesetzt, können sie helfen, Kosten für Instandsetzungen, Ressourcenverbrauch und Belastungen für die Umwelt zu vermeiden, ohne gesundheitliche Beeinträchtigungen von Bewohnern und Nutzern zu riskieren. Es ist jedoch zu vermuten, dass durch das bestehende Versicherungs- und Schadensersatzrecht (Stichwort „nicht sachgerecht instandgesetzter Vorschaden“) sowie die zwangsläufige Wertminderung der Immobilie der mikrobielle Befall dennoch in den meisten Fällen ausgebaut werden muss.

## Ausblick

Aus wirtschaftlicher, gesundheitlicher und ökologischer Sicht ist zu hoffen, dass sich möglichst bald in Neubau und Sanierung Bauweisen durchsetzen, die besser trockenbar sind und damit bei Wasserschäden weniger zu mikrobiellem Befall neigen. So könnte beispielsweise eine durchgehende Unterströmbarkeit von Estrichdämmplatten von vornherein eingeplant werden. Dafür bieten sich sogenannte Wirrgelege an, die mit 6 mm Höhe die notwendige Belüftung dauerhaft sicherstellen und auch beim Begehen in vernachlässigbarem Maß zusammengedrückt werden (Gebauer, 2020).

Wir hoffen, dass sich das AIBau, dessen konstruktive Arbeiten zum schadensfreien Bauen wir sehr schätzen, sich auch bezüglich der mikrobiellen Schadensproblematik möglicher schadensfreier Bauformen annimmt, anstatt vorhandene Schäden zu verharmlosen.

Bis dahin wird es zu einer Versachlichung der Diskussion notwendig sein, über weitere Forschungsprojekte die Transporteffekte durch Bauteile (wie den Pumpeffekt von Estrichen oder bei der Durchströmung von Ständerwänden) zu quantifizieren.

Hierzu können wir uns ein praxisnahes Projekt vorstellen, welches die Transporteffekte anhand realer Schadensfälle bearbeitet. Nach gründlicher Reinigung des Estrichrandstreifens kann die Erhöhung der Partikelzahlen mit

direktanzeigender Partikelmesstechnik nachvollzogen werden und mit mikrobiologischer Analytik quantifiziert werden. Der Luftwechsel zwischen Estrichdämmeschicht und dem Innenraum kann über den Einsatz von Tracergas und für unterschiedliche Zustände (Ruhe, verschiedene Nutzungsintensitäten) quantifiziert werden.

Da für die Forschung geeignete Schadensfälle in ausreichender Anzahl für einzelne Institute schwer verfügbar sind, stellen wir uns für die Durchführung die Zusammenarbeit unabhängiger, praktisch tätiger Sachverständiger unter einem Dachverband wie der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V. (AGÖF) vor.

## Anmerkungen

Eine Vorversion des Einleitungstextes ist in den Tagungsunterlagen der 24. VDB Schimmelpilztagung 2020 enthalten. Die Ergebnisse der Beitragsdiskussion dieser Fachtagung wurden in dieser Veröffentlichung mit eingearbeitet.

Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird an einigen Stellen auf die geschlechtsspezifische Differenzierung, z. B. Nutzerinnen und Nutzer, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

## Literatur

- AIBau (2019). Instandsetzung von Schimmelschäden durch Abschottung – Partikeldichtheit von Baustoffen. Abschlussbericht. Aachen: Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik, gGmbH
- AWMF (2016). AWMF-Schimmelpilz-Leitlinie „Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen“. AWMF Register-Nr. 161/001 – Endfassung
- Benker, B., Warnecke, R. (2004). Deposition and Permeation [online]. Internet: <https://www.gks-sw.de/images/pdf2004/03-VDI-WF-04-DepositionPermeation%20-%20Benker%20-%20Manu.pdf> [Zugriff: 10.11.2020]
- Biostoffverordnung. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit Biologischen Arbeitsstoffen (BioStoffV) vom 15.07.2013 (BGBl. I S. 2514), die zuletzt durch Artikel 146 des Gesetzes vom 29.03.2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist
- DIN 4108-7:2011-01 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele
- DIN 4108-11:2018-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten
- DIN 18534-1:2017-07 Abdichtung von Innenräumen – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze
- DIN 18534-2:2017-07 Abdichtung von Innenräumen – Teil 2: Abdichtung mit bahnenförmigen Abdichtungsstoffen
- DIN 18560-2:2009-09 Estriche im Bauwesen – Teil 2: Estriche und Heizesträfe auf Dämmeschichten (schwimmende Estriche)
- DIN EN ISO 16000-7:2007-11 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 7: Probenahmestrategie zur Bestimmung luftgetragener Asbestfaserkonzentrationen
- DIN ISO 16000-18:2012-01 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme durch Impaktion
- DIN ISO 16000-20:2015-11 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 20: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Bestimmung der Gesamtsporenanzahl
- DIN ISO 16000-21:2014-05 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 21: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probenahme von Materialien
- EMW filtertechnik (2020). Theorie der Partikelfiltration [online]. Diez: EMW filtertechnik GmbH. Internet: <https://www.emw.de/de/filter-campus/allgemein.html> [Zugriff: 10.11.2020]
- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (2020). Permeationsanalytik [online]. Freising: Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung. Internet: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/verpackung/permeationsanalytik.html> [Zugriff: 10.11.2020]
- Gebauer, R. (2020). Schimmelvermeidung in Schwimmenden Estrichen: Sind schwimmende Estrichaufbauten noch zeitgemäß? deutsche bauzeitung 03, 2020
- Hanika, M. (2003). Zur Permeation durch aluminiumbedampfte Polypropylen- und Polyethylenterephthalatfolien, Dissertation am Lehrstuhl für Feststoff und Grenzflächenverfahrenstechnik 2003, Technische Universität München [online]. Internet: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/601903/601903.pdf> [Zugriff: 10.11.2020]
- Haun, P. (2020). Kritische Auseinandersetzung mit den Abschottungs-Fallbeispielen des Forschungsprojektes der AIBau gGmbH. In: Tagungsband zur 24. Pilztagung 2020 – Gemeinsame Fachtagung für biogene Schadstoffe, veranstaltet vom Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e. V. und dem Bundesverband Schimmelpilzsanierung BSS e. V. Jesteburg: Berufsverband Deutscher Baubiologen e. V.
- Hinds, W. C. (1999). Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. New Jersey, USA: Wiley
- Holbach Umweltanalytik (2018). Probenahmesystem MBASS30V3. Datenblatt [online]. Wadern: Umweltanalytik Holbach GmbH. Internet: [https://www.holbach.biz/upload/mbass30v3datenblatt\\_de.pdf](https://www.holbach.biz/upload/mbass30v3datenblatt_de.pdf) [Zugriff: 10.11.2020]
- Institut für Schädlingskunde (2020). Staubläuse – Psocoptera [online]. Reinheim: Dr. Felke – Institut für Schädlingskunde. Internet: <https://schaedlingskunde.de/schaedlinge/steckbriefe/laeuse/staublaeuse-psocoptera/staublaeuse-psocoptera/> [Zugriff: 10.11.2020]
- Kanchongkittiphon, W. et al. (2015). Indoor Environmental Exposures and Exacerbation of Asthma: An update to the 2000 Review by the Institute of Medicine. Env. Health Perspect. 123, 2015, S. 6–20
- Leicht, K., Moriske, H.-J. (2019). Anwendung der Nutzungsklassen aus dem UBA-Schimmelleitfaden von 2017. Der Sachverständige 11, 2019
- Lohmeyer, G. (1995). Praktische Bauphysik. Stuttgart: Teubner
- Pavidensa (2014). Empfehlung PAV-E 20:2014. Der Randstreifen. Ein wichtiges Bauteil! Bern: Pavidensa [online]. Internet: [https://pavidensa.ch/fileadmin/user\\_upload/pavidensa/public/downloads/de/empfehlungen/estrich/PAV-E\\_20-2014\\_Randstreifen\\_be\\_Estrichen.pdf](https://pavidensa.ch/fileadmin/user_upload/pavidensa/public/downloads/de/empfehlungen/estrich/PAV-E_20-2014_Randstreifen_be_Estrichen.pdf) [Zugriff: 10.11.2020]

- Rack, G. (1963). Kleemannia (Acarina, Ameroseiidae), ein neuer Wohngastling. Ent. Mitt. Zool. Staatsinst. Zool. Mus. Hamburg 2 (44), 1963, S. 407–413
- Rack, G. (1969). Massenvorkommen von *Neoseiulus barkeri* Hughes, 1948 (Acarina, Phytoseiidae) und sechs weiterer Milbenarten in einem Neubau. Anz. Schädlingsk. 43, 1969, S. 184–186
- Rack, G. (1971). Milben in Neubauten. Prakt. Schädlingsbek. 23 (11), 1971, S. 149–152
- Rack, G. (1972). Weitere Beobachtungen über Milben in Neubauten mit Beschreibung einer neuen Art, *Ameroseius pseudoplumosus* sp. n. (Acarina, Mesostigmata). Ent. Mitt. Zool. Mus. Hamburg 4 (77), 1972
- Scholl, W., Kraiß, S. (1995). IBP-Mitteilung 282: Wie Holzbalkendecken schwingen. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- Thumulla, J., Kroczeck, C. (2020). Sanierung von Schimmelschäden durch Abschottung – Luft- und Partikeldichtheit von Bauteilen. In: Tagungsband der 24. VDB Schimmelpilztagung 2020. Jesteburg: Berufsverband Deutscher Baubiologen e. V.
- Tielke, B. (2014). Desinfektion bei Schimmelpilzbefall und die nicht haltbaren Argumente der Desinfektionsgegner. Der Bausachverständige 1, 2014
- Umweltbundesamt (2017). Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- VDI 4300 Blatt 2:1997-12. Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Meßstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibeno-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure
- VDI 4300 Blatt 4:1997-08. Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Meßstrategie für Pentachlorphenol (PCP) und  $\gamma$ -Hexachlorcyclohexan (Lindan) in der Innenraumluft. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure
- Warscheid, T. (2018). 2. Podiumsdiskussion am 17.04.2018, Aachener Bausachverständigentage 2018. Aachen: Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik
- Warscheid, T. (2019). Schimmel ohne Auswirkungen in Innenräumen kann bleiben, Aachener Bausachverständigentage 2019. Aachen: Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik
- WHO Regional Office for Europe (2009). WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Genf: World Health Organization
- Wikipedia (2020). Baustoff. Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Baustoff> [Zugriff: 10.11.2020]
- Wikipedia (2020). Düsenströmung. Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCsenstr%C3%B6mung> [Zugriff: 10.11.2020]
- WISSEN Wiki (2019). Wasserdampfdurchlässigkeit. Internet: <https://wissenwiki.de/Wasserdampfdurchl%C3%A4ssigkeit> [Zugriff: 10.11.2020]
- Zöller, M. et al. (2019a). Schotten dicht – das reicht! B+B Bauen im Bestand 2, 2019
- Zöller, M. et al. (2019b). Antwort der Autoren auf den Leserbrief „Schotten dicht das reicht nicht“ des Bundesverband Schimmelpilzsanierung BSS e.V. B+B Bauen im Bestand 6, 2019, S. 19
- Zöller, M. et al. (2020a). Schotten dicht – das reicht! deutsche bauzeitung 06, 2020
- Zöller, M. et al. (2020b). Und sie funktionieren doch. B+B Bauen im Bestand 4, 2020