

Gezielte Beeinflussung der Innenraumlufthqualität durch Sorptionsmaterialien

Targeted influencing of indoor air quality by means of sorption materials

Erhöhte Innenraumlufthkonzentrationen 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 Innenraumlufth auffindbaren Verbindungen untersucht.

Sowohl für Lehmputz als auch für die Scavenger Aktivkohle und Silikagel wurde dabei ein hohes Potenzial zur Innenraumlufth-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

Erhöhte 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 Innenraumlufthausqualität bedienen sich dabei der Summenkonzentration an VOC (TVOC) als Indikator (z. B. Bundesministerium Landwirtschaft, Regionen und Tourismus [BMLFUW] 2005 bzw. DIBt [Deutsches Institut für Bautechnik] 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-Wert¹. Objektnutzung und Lüftungssituation haben hierbei einen großen Einfluss. Basierend auf den oben genannten Untersuchungen wäre eine Beurteilung der Innenraumlufthausqualität 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 Innenraumlufthausmessungen, 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 Innenraumlufthausrelevanz in Bezug auf Produkt- und Anwendungssicht ausgewählt und sind vergleichbar flüchtig wie VVOC (engl.: very volatile organic compounds). Es wurden Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) und Kohlendioxid (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 (NO_x), Schwefeldioxid (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 Innenraumlufthaus 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

¹ Flüchtige organische Verbindungen (VOC) umfassen Verbindungen im Retentionsbereich C_6 bis C_{10} , 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 Innenraumlufte bekannt ist. Zusätzlich sind Wechselwirkungen unterschiedlicher Substanzgruppen bei der Sorption üblicherweise unbekannt, womit eine Produktauswahl für unspezifische Anwendungen wie die Verbesserung der Innenraumluftequalität 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 FLEC-Kammer-Aufbaus,
- 2) als Langzeitversuch in Normprüfkammern mit einem Volumen von 0,225 m³ 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 komplementäre Nachweistechniken (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer [FTIR] und Tenax-TD-Gaschromatografie/Massenspektrometrie [-GC/MS]) kombiniert sowie 3 Systeme zur Erzeugung von praxisnahen Gas-Wirkstoff-Ge-

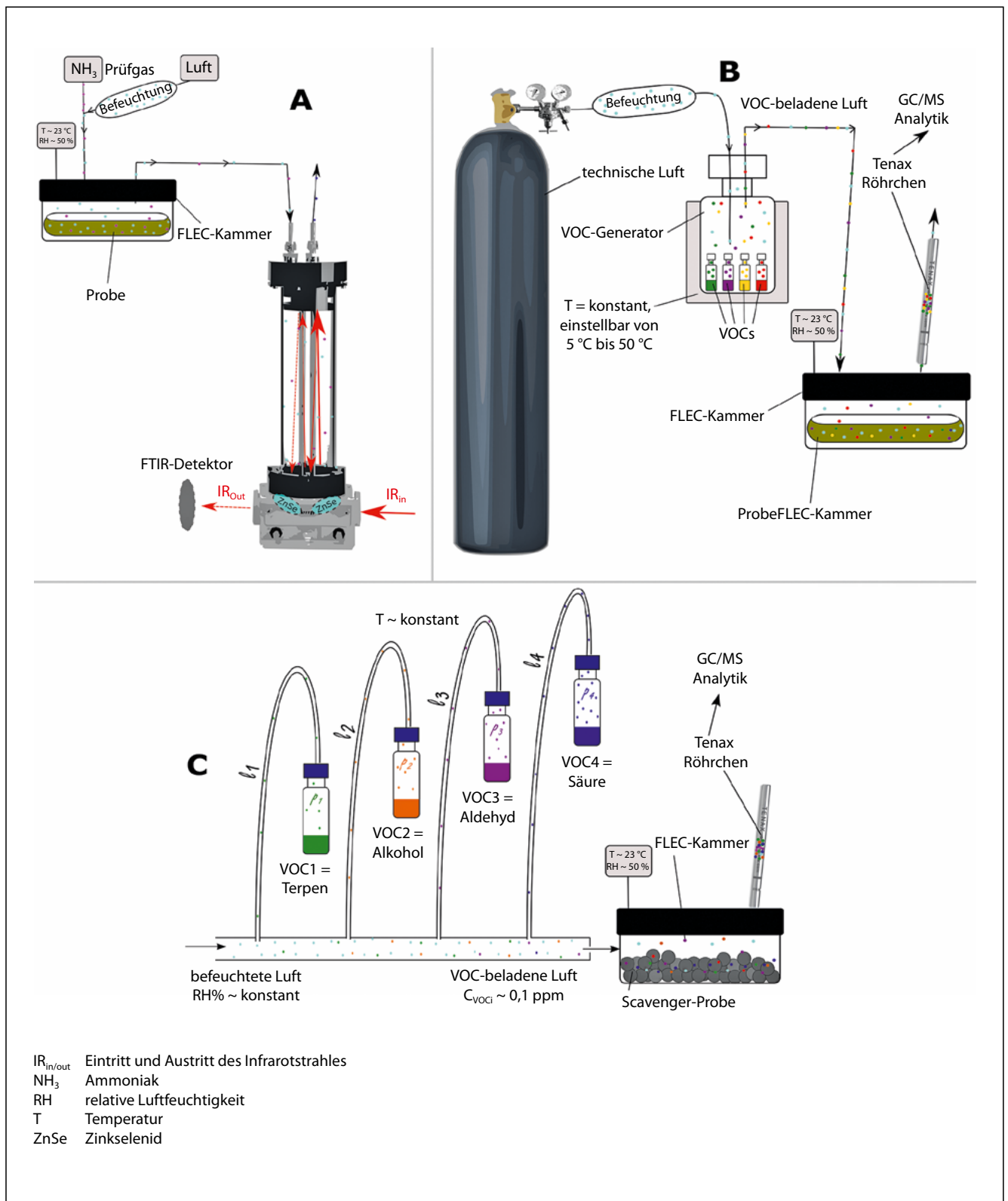


Abb. 1: Untersuchungs-Setups. Links oben: Lehmputz-Sorption extremflüchtiger Substanzen und FTIR-Detektion; rechts oben: Lehmputz-Sorption von VOC und GC/MS-Detektion; unten: Scavenger-Sorption von VOC und GC/MS-Detektion

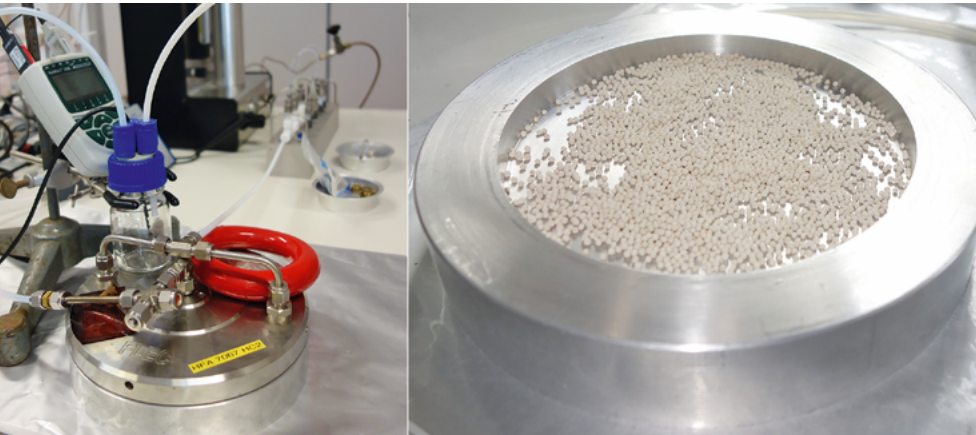


Abb. 2: Links: FLEC-Kammer und Luftfeuchtebestimmungsgesäß; rechts: 20 g Scavenger verteilt im zylindrischen Prüfraum (Höhe 13 mm)

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
Kanten verklebt	ja	ja
Unterseite verklebt	ja	ja
Prüfkammerdurchmesser [m]	0,15	0,15
Prüfstückdurchmesser [m]	0,142	0,085
Masse der Probe [kg]	1,09	0,19
Dichte der Probe [kg/m³]	3.527	1.709
Prüfkammertiefe [m]	0,05	0,05
Prüfkammer + FLEC-Volumen [l]	0,919	0,919
Probenstärke [m]	0,022	0,020
Emissionsfläche [m²]	0,0140	0,0057
Luftdurchfluss [ml/min]	100	100
Ist-Flächen-spezifische Durchflussrate -q [m³/(m²h)]	0,4	1,1
Temperatur [°C]	~ 23	~ 23
relative Luftfeuchtigkeit [%]	~ 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_{Test}) und die entsprechenden maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK²) 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_{Test} [ppm]	MAK-Wert² [ppm]	BW_{Innenraum} [ppm]	Vorbereitung der Testkonzentration durch
NH₃	~ 24	20–25	< 0,1 ³	Verdünnung von NH ₃ (~ 80 ppm NH ₃ in technischer Luft) mit Druckluft (3:10)
CH₄	~ 500	1.000	< 100 ⁴	Verdünnung von CH ₄ 2.5 (~ 1.000.000 ppm CH ₄) mit Druckluft (5:10.000)
CO₂	~ 350	5.000	< 1.000 ⁵	Verdünnung von technischer Luft (< 1 ppm CO ₂) mit Druckluft (~ 500 ppm) (3:10)
BW Beurteilungswert CH ₄ Methan CO ₂ Kohlendioxid MAK maximale Arbeitsplatzkonzentration NH ₃ Ammoniak				

2 MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration, GESTIS International Limit Values, abgerufen am 12.02.2018

3 RAL-UZ 176 (2013)

4 Annahme

5 ÖNORM EN 13799 (2012) (RAL3 – mittlere Raumluftqualität)

Verhalten von Lehmputz gegenüber Volatile und Very Volatile Organic Compounds

Das Ziel der Auswahl der zu untersuchenden VOC war es, ubiquitäre flüchtige Innenraumbestandteile zu selektieren, die auch ein Risikopotenzial in Hinblick auf eine AgBB⁶-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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für Xylol, 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für Formaldehyd, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für Hexanal und je 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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^3) angestrebt und für Xylol wurde

6 AgBB = Ausschuss für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten

Tabelle 3: Ausgewählte Innenraumsbstanzen

Substanz	Geruch	typische Quelle	Relevanz	Risikopotenzial
Formaldehyd	stechend	Bindemittel, Einrichtung, Bauprodukte	krebserregend in hohen Konzentrationen	35
Hexanal	ranzig	Möbel, Öle, Lebensmittel	Leitsubstanz Aldehyde	1
Benzol (versuchstechnisch ersetzt durch Xylol)	nach Lösemittel	Rauchen, unvollständige Verbrennungsprozesse	krebserregend	> 95
α-Pinen	nach Nadelholz	Möbel, Baumaterialien, Reinigungsmittel	Leitsubstanz Nadelholz	<< 1
Phenol	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 luftfeuchtereulierende 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
Z3Å	~ 3,0 Å*	Zeolith 3Å	CWK (Köstrolith 3AK)
β-CD	7,5 Å**	β -Cyclodextrin-7	Sigma (W402826-25G)
AK d.	5–40 Å***	Aktivkohle dampfaktiviert, ~ 3 mm	ROTH (0998.3)
SG-EP	< 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

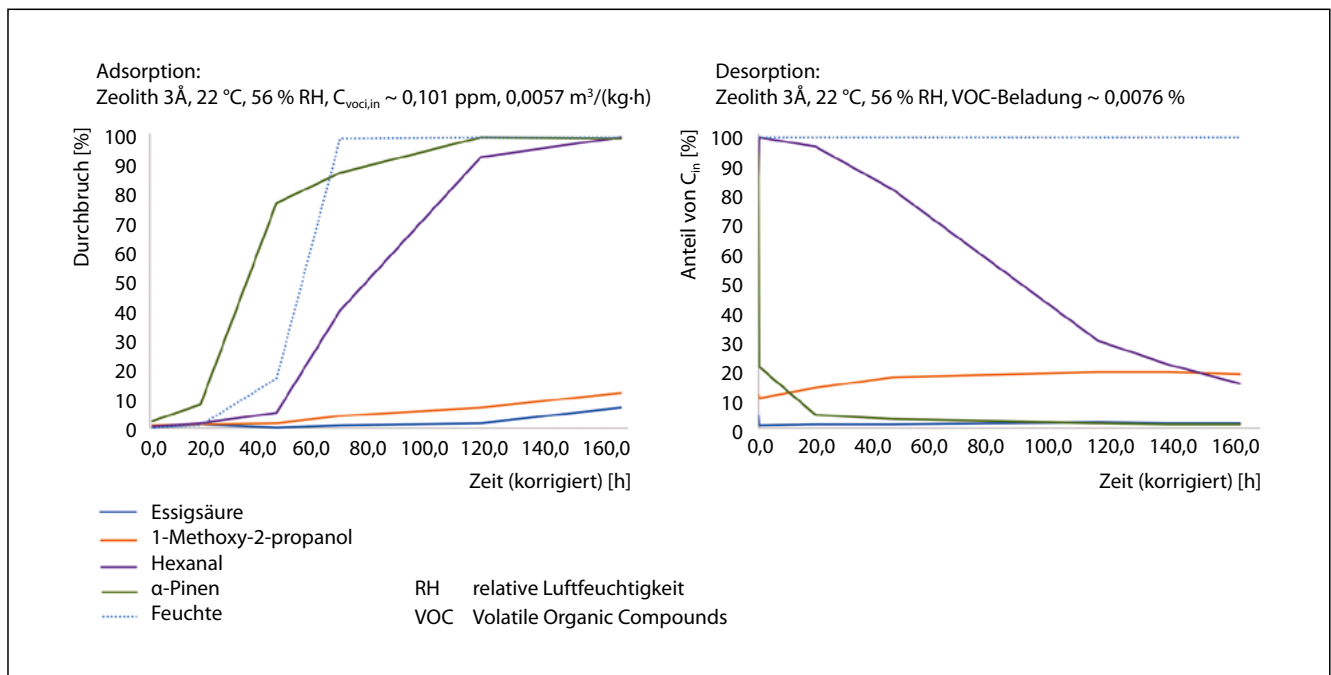


Abb. 3: Beispiel für die Konzentrationsänderungen bei einem Adsorption/Desorption-Zyklus im Schnelltest

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 Innenraumlufthverhältnissen im Schnelltest relativ hohe Substanzmengen zugegeben, um eine Reaktion der Materialien zu erzielen. Die Zuluftkonzentrationen der getesteten Substanzen wurden dabei auf $\sim 0,1 \text{ ppm}$ 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 $\sim 23 \text{ °C}$, $\sim 50 \%$ relativer Luftfeuchtigkeit (RH) und bei einem Durchfluss von $\sim 105 \text{ ml/min}$ durchgeführt.

Als Vorbereitung für die Schnelltests mittels FLEC-Kammer wurden der ausgewählte Zeolith und das Silikagel vor den Versuchen für ~ 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. β -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 ($\sim 0,1 \text{ ppm}$) 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
Modellraumvolumen [m ³]	30	
Soll-Scavenger-Volumen im Modellraum [m ³]	0,15	0,15
Schüttdichte [kg/m ³]	515	977
Menge im Modellraum [kg]	77	147
Prüfkammervolumen [m ³]	0,225	0,225
spezifische Beladung (m/V) [kg/m ³]	2,6	4,9
spezifische Beladung (V/V) [l/m ³]	5,0	5,0
notwendige Menge an Scavenger in der Prüfkammer [kg]	0,58	1,10

etwas geringeres Adsorptionsverhalten. α -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 m³ 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⁻¹ 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 Nordnordwest (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 m² 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: Realraumbeschreibung, Raumklima (basierend auf kontinuierlichen Messungen, $n = 1.055$) und eingesetzte Scavenger

Zimmer-Nr.	Fläche [m ²]	Höhe [m]	Volumen [m ³]	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 (ΔC) ~ 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 Ammoniak-Konzentration in der FLEC-Kammer für diese Periode betrug 93%.

Nach Probenausbau erhöhte sich die Ammoniak-Konzentration 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, α -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_{Hexanal} 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:

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

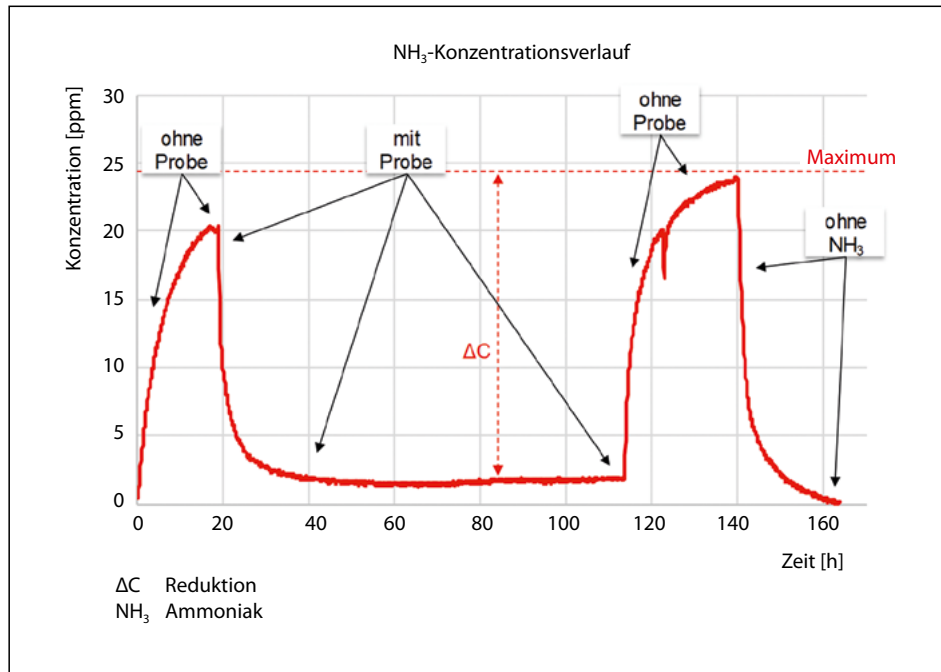


Abb. 4: Änderung der Ammoniak-Konzentrationen mit der Zeit im Schnelltest von Lehmputz

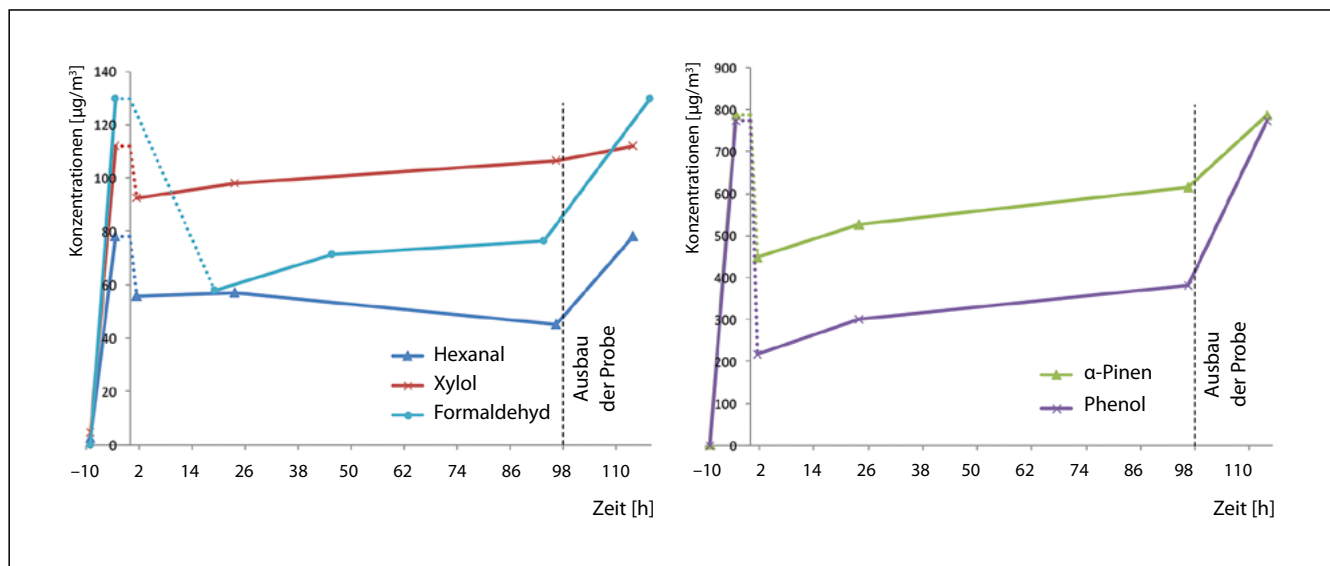


Abb. 5: Änderung der Konzentrationen der getesteten Substanzen mit der Zeit im Schnelltest von Lehmputz

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 α -Pinen am schlechtesten.

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

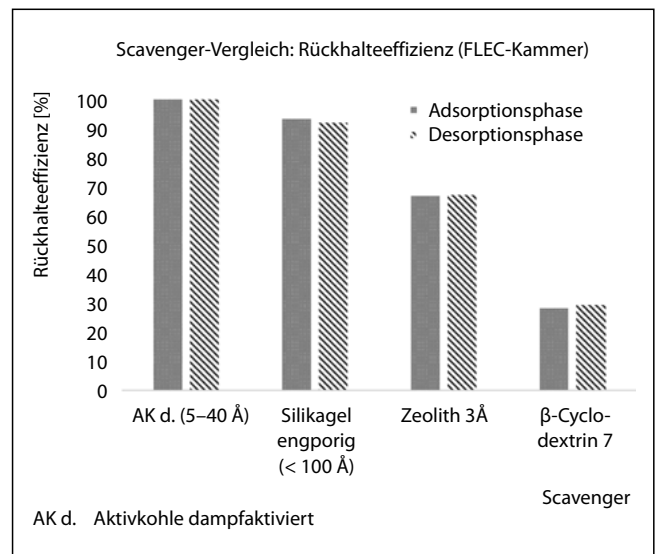


Abb. 6: Wirkungsgrad der Scavenger gegenüber dem vorgelegten VOC-Substanzgemisch in der Adsorptionsphase (grau) und deren Abgabe bei der Desorption (gestreift)

tionierung. Die Sorptionswirkung des Silikagels war lediglich zu Versuchsbeginn etwa vergleichbar effektiv wie jene der Aktivkohle. Besonders für Hexanal und α -Pinen stieg die Durchbruchmenge 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 α -Pinen und 1-Methoxy-2-propanol beobachtet. Essigsäure wurde in einem Ausmaß von etwa 20 bis 30 % wieder abgegeben, Hexanal vor

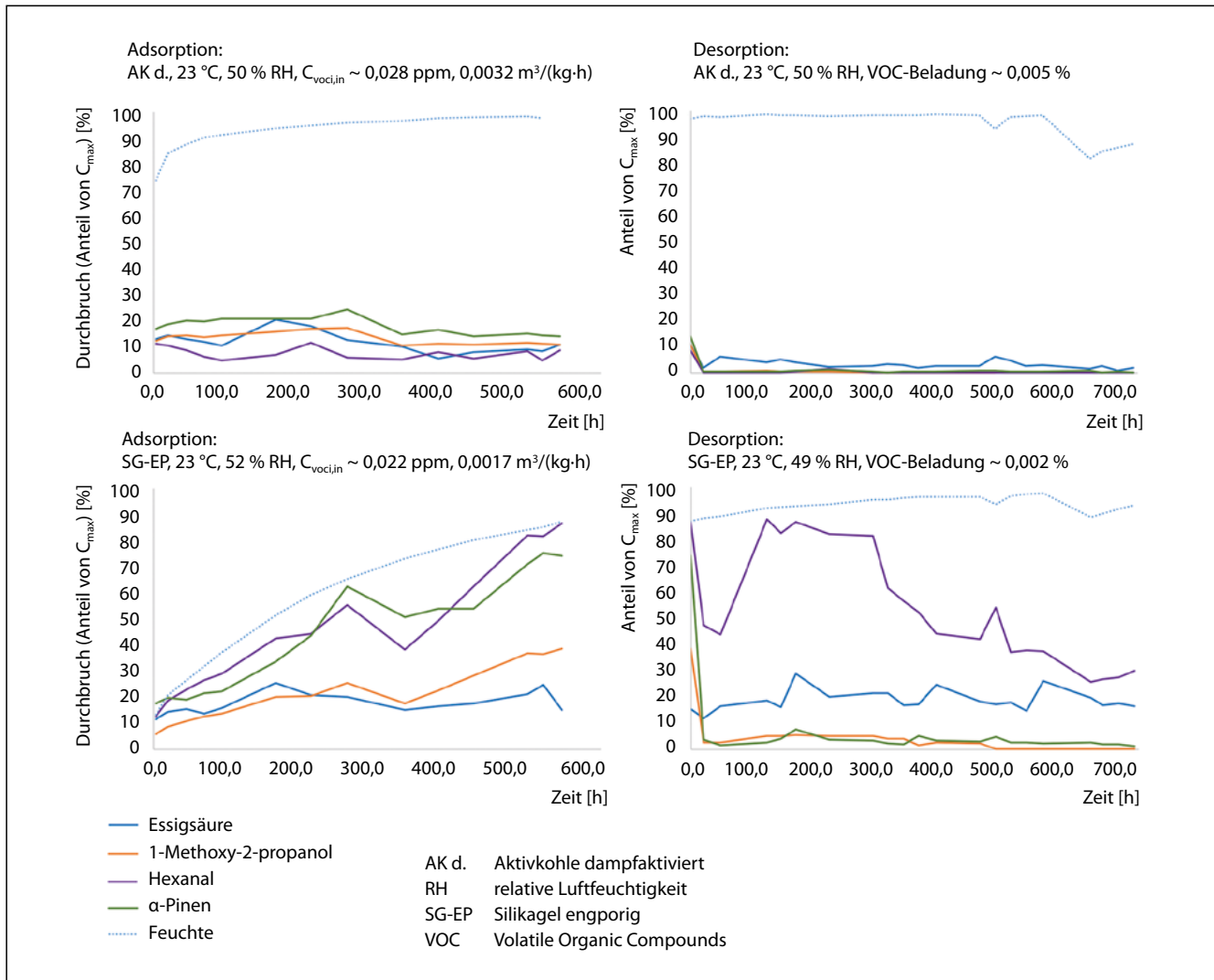


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Adsorption (links) und Desorption (rechts) von Aktivkohle (oben) und Silikagel (unten) ausgewählter VOC

allein 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

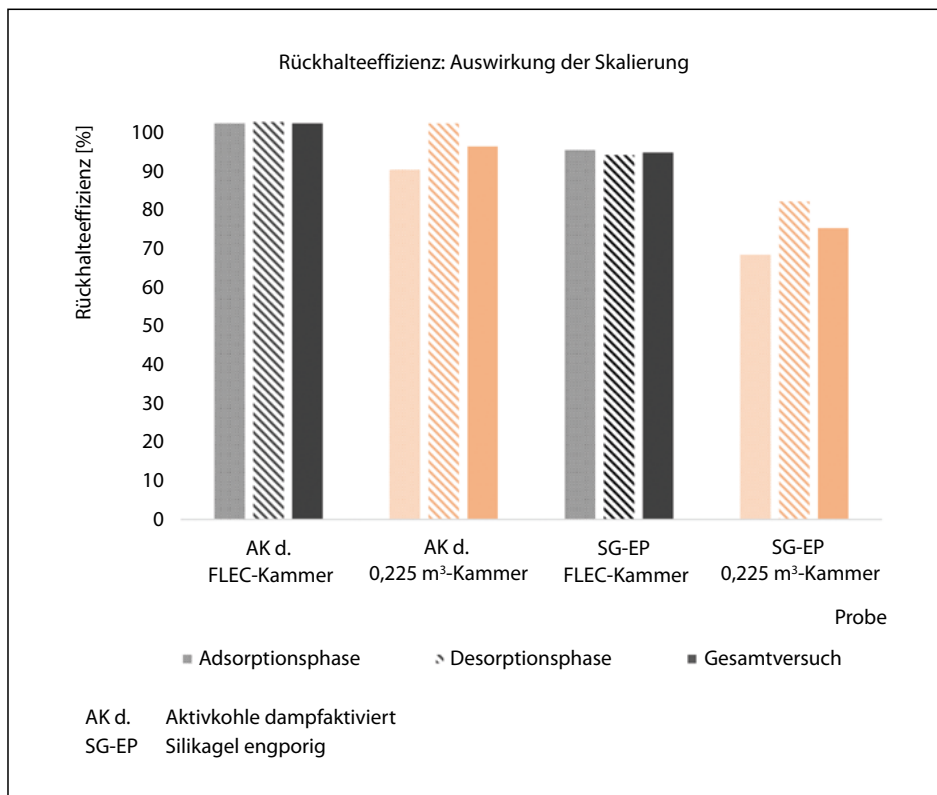


Abb. 8: Wirkungsgrad der Scavenger in den Schnelltest- und Langzeitversuchen

Silikagel war dieser Skalierungseffekt etwas stärker ausgeprägt, womit die gesamte Rückhalteeffizienz hier im Langzeitversuch demnach bei 73 % lag.

Eine wesentliche Ursache für diese Skalierungseffekte dürfte im Untersuchungs-Setup liegen. Während in den Schnelltests die Scavenger-Stücke (Silikagel-Perlen bzw. Aktivkohle-Presslinge) vereinzelt in der FLEC-Kammer mit einer höheren flächenspezifischen Beladung exponiert wurden, waren diese Bedingungen in den Langzeitversuchen mit einer Materialschüttung und einer geringeren Beladung realitätsnäher.

Verhalten von Scavengern gegenüber Volatile Organic Compounds in Realraumversuchen

Die Auswirkung der Scavenger auf die zeitliche TVOC-Entwicklung in den realen Räumen eines neu errichteten Holzbaus 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-

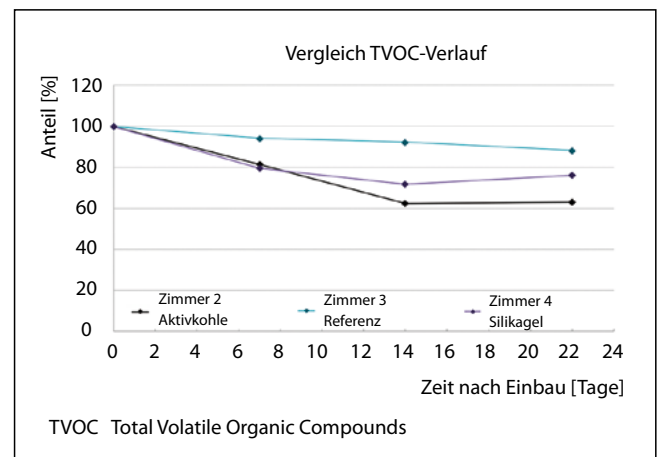


Abb. 9: Zeitliche Entwicklung des TVOC in den 3 Realräumen und Auswirkung der Scavenger

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-

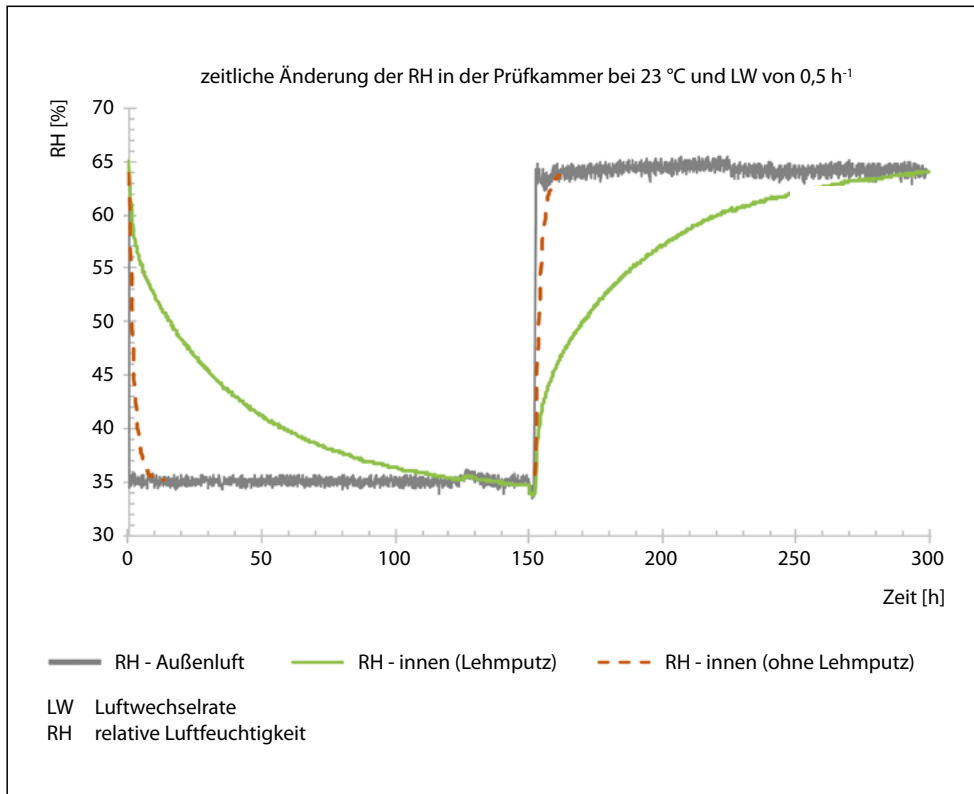


Abb. 10: Feuchtregulierende Wirkung von Lehmputz

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-

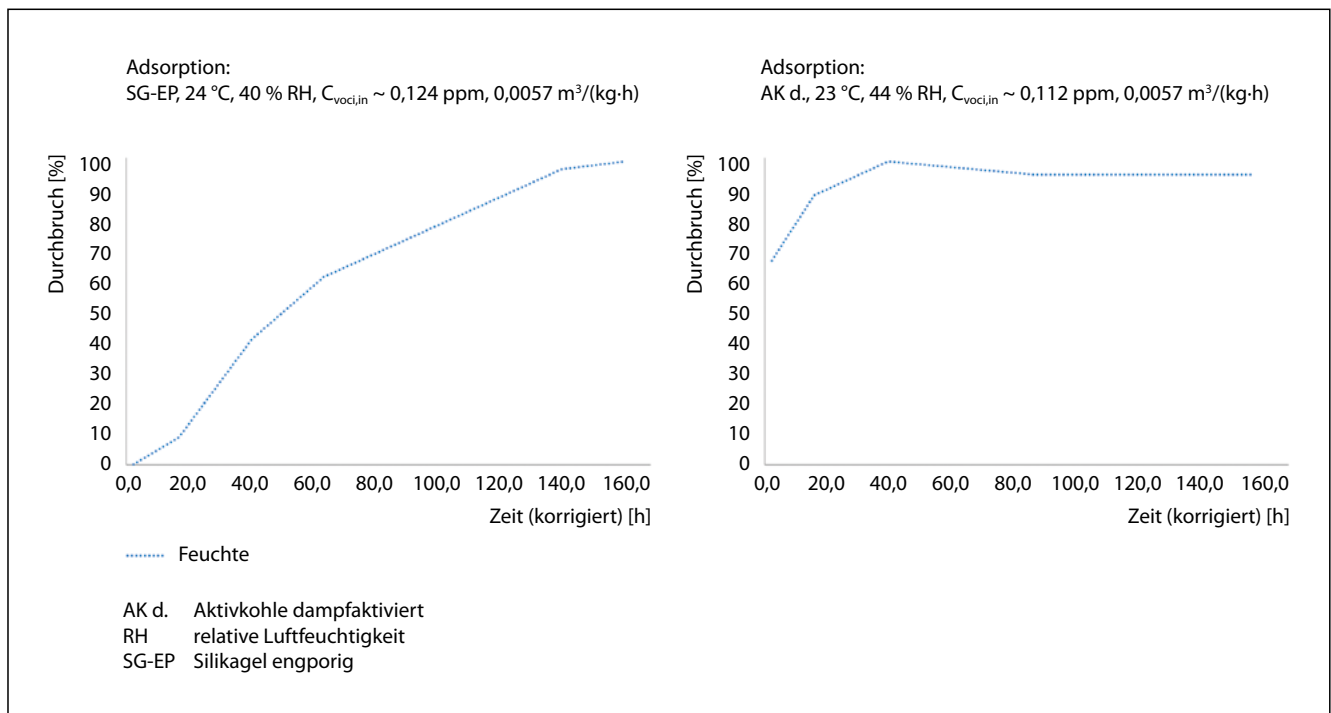


Abb. 11: Auswirkung von Scavengern auf die Luftfeuchte

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 massenspezifischer Luftwechsel gewählt wurde.

Aus den Untersuchungsbedingungen im Schnelltest kann der Schluss gezogen werden, dass die Porensättigung 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 α -Pinen) adsorbiert.

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

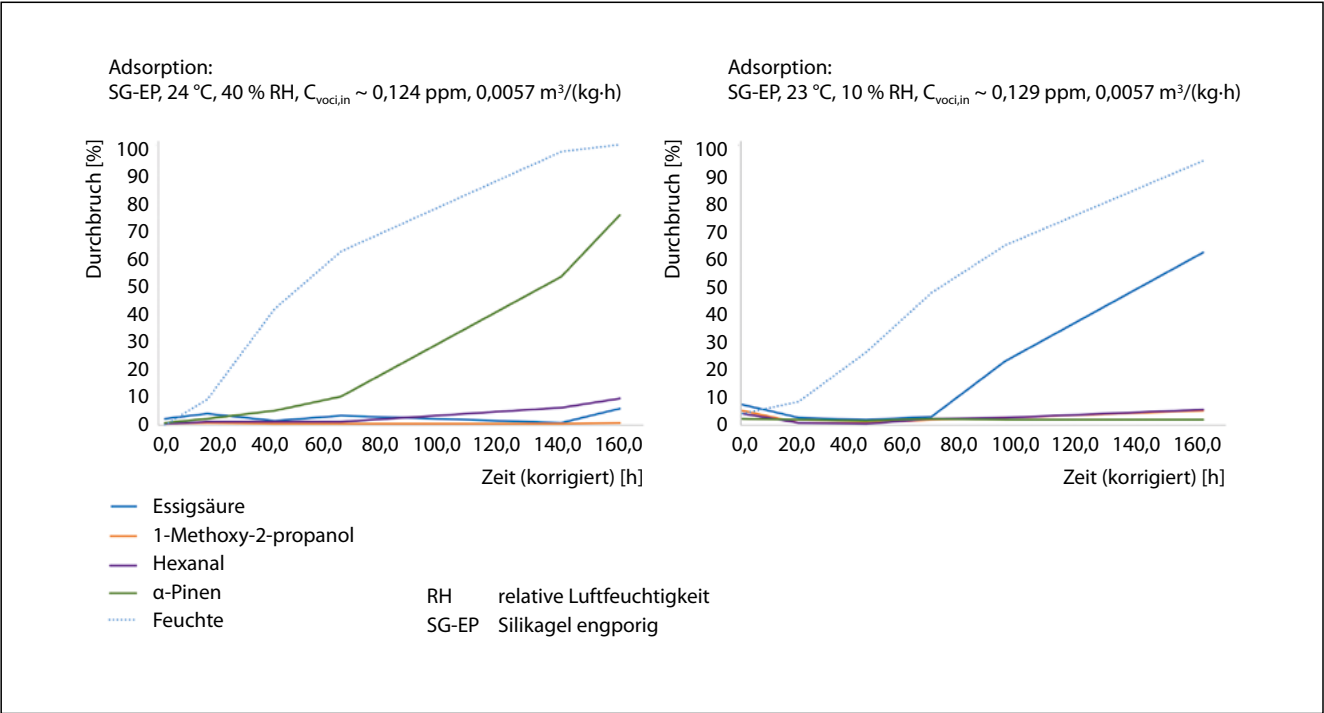


Abb. 12: Selektivität der VOC-Adsorption von Silikagel (engporig) bei unterschiedlichen RH

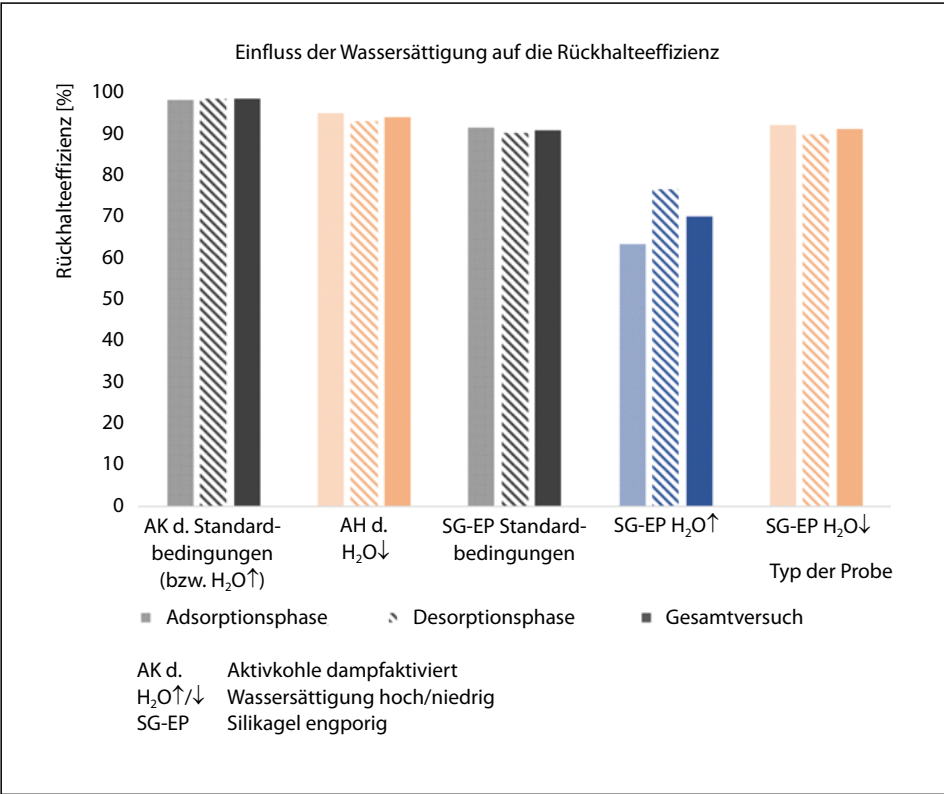


Abb. 13: Auswirkung der Wassersättigung von Scavengern auf deren Effizienz, VOC zu binden

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 Feuchtebelastung. Die Ergebnisse aus Abb. 8 dienen hier als Bezugspunkt und sind in Grau/Schwarz dargestellt. Silikagel bei geringer Feuchtebelastung (orange, ganz rechts) zeigte somit dieselbe Rückhalteeffizienz wie bereits zuvor beschrieben. Aktivkohle zeigte eine geringfügig reduzierte Rückhalteeffizienz unter reduzierter Feuchtebelastung (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 α -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, reproduktionstoxisch) wurde an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen.

Lehmputz

Allgemein zeigt sich, dass Lehmputz ein hohes Potenzial zur Regelung der Innenraumlufthqualität 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/-befeuchtung 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 Innenraumlufthverschmutzung. 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 Innenraumlufthkomponenten 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 einsetzbar 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 α -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 Grüner 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 Reinhaltung 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.holzforchung.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
- Holzforchung Austria (Hrsg.) (2014): HFA-TIMBER. Vom Stamm bis zum Gebäude. Abschlussbericht. Holzforchung 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.; Haghighat, 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 [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; Salthammer, 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): β -Cyclodextrin. Product information [online]. Internet: 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. Holzforchung Austria, Wien [online]. Internet: https://www.holzforchung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/BigConAir-Holzforchung-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