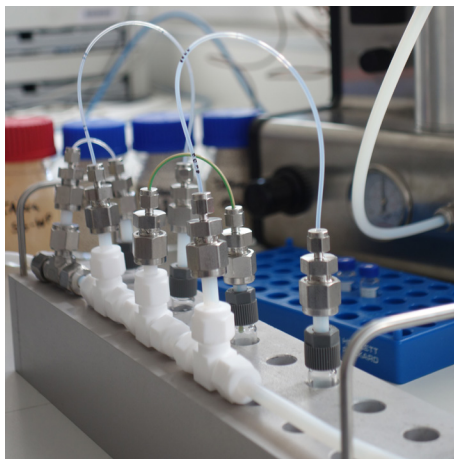


IASca

Einsatz von Scavenger-Materialien zur Verbesserung der Raumluftqualität in Wohnhäusern aus Holz



Projekt IASca

**Einsatz von Scavenger-Materialien
zur Verbesserung der Raumluftqualität
in Wohnhäusern aus Holz**

Endbericht

Projektnr.: 876651

Projektnr. Holzforschung Austria: F 493

DVR-Nr. Holzforschung Austria: 1005316

Gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG)

Unterstützt durch den Fachverband der Holzindustrie Österreichs (FV)

AutorInnen

Mag. Elisabeth Habla (Holzforschung Austria)

DI Dr. Daniel Stratev (Holzforschung Austria)

Wien, März 2021

ProjektmitarbeiterInnen

Holzforschung Austria

DI (FH) C. Fürhapper

Mag. E. Habla

W. Hochschorner

DI Dr. D. Stratev

Ing. DI Dr. M. Weigl

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie

Mag. R. Bintinger

DI B. Damberger

DI Dr. B. Lipp

DI U. Muñoz-Czerny

DI P. Tappler

Medizinische Universität Wien

OA Assoz. Prof. PD DI Dr. med H.P. Hutter

Univ.-Prof. Mag. Dr. T. Waldhör

Doz. Dr H. Moshhammer

MSc K. Lemmerer

Dr. P. Wallner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Projektteil Innenraumluftqualität	2
2.1	Materialien und Methoden	2
2.1.1	Objektauswahl	2
2.1.2	Ablauf Probenahmen	2
2.1.3	Analytik.....	3
2.1.4	Datenauswertung.....	3
2.2	Ergebnisse.....	6
2.2.1	aktuelle Innenraumluftqualität	6
2.2.2	Toxikologische Bewertung	11
2.2.3	Medizinisch-epidemiologische Bewertung.....	12
2.2.4	Vergleich früherer und aktueller Ergebnisse	13
3	Projektteil Charakterisierung von Scavenger-Materialien	20
3.1	Materialien und Methoden	20
3.1.1	Schnelltestaufbau - Small-Scale Versuche	20
3.1.2	Kammerprüfungen	21
3.1.3	Real-Raum Versuche.....	21
3.2	Ergebnisse.....	23
3.2.1	Schnelltests - Small-Scale Versuche	23
3.2.2	Beeinflussung durch Änderung der Umgebungsbedingungen.....	27
3.2.3	Kammerprüfungen	28

3.2.4	Real-Raum Versuche.....	31
4	Zusammenfassung	35
5	Literaturverzeichnis.....	36

1 Einleitung

Das vorliegende Projekt „IASca - Einsatz von Scavenger-Materialien zur Verbesserung der Raumluftqualität in Wohnhäusern aus Holz“ wurde im Rahmen des Basisprogramms „Collective Research“ der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) in den Jahren 2017 bis 2020 durchgeführt. Im Rahmen des Projektes sollte erhoben werden, ob eine Verbesserung der Innenraumluftqualität in Wohngebäuden notwendig ist und inwieweit diese eventuell notwendige Verbesserung mit Scavenger-Materialien, welche Substanzen aus der Innenraumluft binden können, erzielt werden kann. Besonderes Augenmerk lag dabei auf Gebäuden in Holzbauweise, da hier, aufgrund der von Natur aus höheren Emissionen an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in die Innenraumluft, die Innenraumluftqualität oft als schlechter dargestellt wird, als in vergleichbaren Gebäuden in mineralischer Bauweise.

Im Projektteil „Innenraumluftqualität“ sollte die Datengrundlage zur Beurteilung der Notwendigkeit oder Nicht-Notwendigkeit der Reduzierung der Substanzkonzentrationen in der Raumluft erweitert werden. Dazu wurde die Innenraumluftqualität in bereits seit mehreren Jahren bewohnten Gebäuden und deren Einfluss auf das Wohlbefinden der BewohnerInnen erhoben. Zum Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Baumaterialien wurden hier verschiedenste Bauformen (z.B.: Holzriegel, Holzmassiv, Ziegel, Beton) untersucht. Von besonderem Interesse war dabei, welche flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) von den diversen Quellen (z.B. RaumnutzerInnen, Möbel, Baumaterialien) an die Innenraumluft abgegeben werden und in welchen Konzentrationen diese Verbindungen vorliegen. Am Ende der Projektlaufzeit wurden die gesammelten Daten einer toxikologischen Bewertung unterzogen. Weiters wurden von den BewohnerInnen der Gebäude Fragebögen zu Gesundheit und Wohlbefinden ausgefüllt und die dabei erhobenen Daten wurden zu den erhaltenen Messwerten in Bezug gesetzt. Dabei wurden die Probenahmen in den Gebäuden von MitarbeiterInnen des IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie) durchgeführt, während die Analyse der genommenen Proben an der Holzforschung Austria durchgeführt wurde. Die toxikologische und medizinisch-epidemiologische Bewertung wurde von Mitarbeitern der Medizinischen Universität Wien erstellt.

Im Projektteil „Charakterisierung von Scavenger-Materialien“ sollten verschiedene Scavenger-Arten auf ihre Fähigkeit untersucht werden, die in den Innenraumluftmessungen in hohen Konzentrationen gefundenen Substanzen zu binden und damit dauerhaft aus der Raumluft zu entfernen. Aus den getesteten Materialien sollten dann die am besten geeigneten Scavenger ausgewählt, ihre Eigenschaften genau charakterisiert und abschließend in einem Real-Raum Test in einem neu gebauten Wohnhaus aus Holz auf ihre Wirksamkeit geprüft werden.

Sämtliche Arbeiten dieses Projektteils wurden durch die Holzforschung Austria ausgeführt.

2 Projektteil Innenraumluftqualität

2.1 Materialien und Methoden

2.1.1 Objektauswahl

Für die Beschreibung der Innenraumluftqualitätssituation in österreichischen Wohnräumen wurden 74 bestehende Gebäude, welche vor der Messung bereits zwischen 3 und 8 Jahren bezogen waren, ausgewählt. Für alle diese Gebäude waren bereits Daten aus Vorgängerprojekten des IBO (Lüftung 3.0 – Bewohnergesundheit und Raumluftqualität in neu errichteten, energieeffizienten Wohnhäusern, Projektnr. 819037, Endbericht der Studie im Rahmen des Programmes "Neue Energien 2020", Klima- und Energiefonds, [1], [2]) und der Holzforschung Austria (Projekt Wood2New, Projektnummer 101005, HFA-Projektnr. F 471, [3], [4], [5]) aus dem ersten Bezugsjahr vorhanden. Somit konnten zu diesen Objekten auch Aussagen zur Veränderung der Innenraumluftqualität über die Zeit getätigt werden.

Bei den insgesamt 74 untersuchten Gebäuden handelte es sich um 11 Holzmassivgebäude, 29 Holzriegelbauten und 34 Objekte in mineralischer Bauweise (Beton, Ziegel). Der Großteil der Gebäude waren Einfamilienhäuser, aber auch Mehrfamilien- und Reihenhäuser, sowie einige wenige mehrgeschossige Wohnbauten, waren vertreten. 37 der 74 Objekte besaßen eine Wohnraumlüftungsanlage.

2.1.2 Ablauf Probenahmen

Die Probenahmen wurden durch MitarbeiterInnen des IBO in Anlehnung an ISO 16000 -1, -2, -3, -5 und -6 ([6], [7], [8], [9], [10]) durchgeführt, wobei jeweils im Schlafzimmer der Häuser/der Wohnungen beprobt wurde, da das Schlafzimmer für gewöhnlich der Raum mit der längsten täglichen Aufenthaltsdauer ist. Dabei wurde die Luft auf einer Höhe von ca. 1,5 m durch die Probenahmeröhrchen gesaugt, was ungefähr der Nasenhöhe eines Erwachsenen entspricht. Soweit möglich wurde außerdem zu den Wänden und zu Möbelstücken ein Abstand von ca. 1 m eingehalten.

In Gebäuden mit Fensterlüftung wurden die ProbandInnen dazu angewiesen, etwa 8 h vor der Probenahme für 15 min kräftig zu lüften und anschließend die Fenster und Türen bis zur Probenahme verschlossen zu halten (worst-case Zustand nach einer Nacht bei verschlossenem Fenster). In Häusern mit kontrollierter Wohnraumlüftung wurden die Standard-Einstellungen des Lüftungssystems beibehalten. In beiden Fällen mussten Zimmertür und vorhandene Fenster während der Probenahme geschlossen gehalten werden.

2.1.3 Analytik

Die Analyse der Luftproben erfolgte an der Holzforschung Austria. Die Analytik der flüchtigen organischen Substanzen (VOC), welche auf dem Adsorbensmaterial TENAX TA[®] gebunden waren, wurde dabei gemäß ISO 16000–6 [10] mittels GC/MS (Gaschromatographie/Massenspektrometrie), gekoppelt mit einer Thermodesorptionseinheit, durchgeführt. Formaldehyd, sowie kurzkettige Aldehyde und Ketone, wurden bei der Probenahme auf DNPH-Kartuschen (2,4-Dinitrophenylhydrazin) gebunden und nach ISO 16000-3 [8] durch HPLC/DAD-Analyse (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie/Diodenarraydetektor) bestimmt.

Zur Untersuchung auf eventuell vorhandenen Schimmelfall wurden mittels Luftkeimsammler Probenahmen der Innen- und Außenluft auf Nährmedien durchgeführt. Die Prüfung der Raumluft auf Schimmelpilzsporen sowie Hefepilze erfolgte durch Bestimmung der Konzentration an koloniebildenden Einheiten (KBE) je m³ Raumluft im Vergleich zur Referenzkonzentration der Außenluft in Anlehnung an die Normen ISO 16000-17 [11] und ISO 16000-18 [12]. Nach entsprechender Inkubationszeit fand eine visuelle Auszählung/Bestimmung der koloniebildenden Einheiten (KBE) statt. Die Schimmelsporenmessungen und Auswertungen erfolgten durch MitarbeiterInnen des IBO.

2.1.4 Datenauswertung

Zur Bewertung der gemessenen VOC-Konzentrationen wurde die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft des Arbeitskreis Innenraumluft im Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [13] herangezogen. Darin werden im Richtlinienenteil „Summe VOC“ Orientierungswerte zur Einschätzung der Innenraumluftqualität vorgegeben, wobei die Summe der VOC zur Beurteilung herangezogen wird (siehe Tabelle 1). Für den Summenparameter VOC werden die Konzentrationen aller gemessenen und als flüchtige organische Verbindungen definierten Substanzen, welche mit einer Konzentration von $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ detektiert werden, aufsummiert. Aufgrund der großen Anzahl an Substanzen, die zur Gruppe der VOC zählen, kann sich diese Summe jedoch sehr unterschiedlich zusammensetzen. Daher kann anhand dieses Parameters keine Aussage zur eventuellen gesundheitlichen Beeinflussung von BewohnerInnen getätigt werden. Derlei Einschätzungen können nur nach toxikologischer Betrachtung der Einzelsubstanzen durchgeführt werden. Die Summe an VOC eignet sich lediglich als Indikator für die Gesamtsituation. Zur Einschätzung der Konzentrationen der Einzelsubstanzen aus der Gruppe der VOC wurden die entsprechenden Teile der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft herangezogen.

Die toxikologische Bewertung der Daten erfolgte gesammelt nach Abschluss aller Probenahmen. Wurden jedoch bei der Auswertung der Ergebnisse alarmierend hohe Konzentrationen von gesundheitsschädlichen Substanzen festgestellt, so wurden die betroffenen BewohnerInnen unmittelbar davon in Kenntnis gesetzt und Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen besprochen.

Tabelle 1: Beurteilung der gemessenen VOC-Konzentrationen gemäß der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, Richtlinienenteil „Summe VOC“ [13]

Konzentrationsbereich (mg/m ³)	Beurteilung	Bemerkung AK Innenraumluft (Ö)	Bemerkung Ausschuss für Innenraumrichtwerte (D)
< 0,25	niedrig	im langzeitigen Mittel bei Verwendung geeigneter Materialien erreichbar	
0,25 – 0,5	durchschnittlich		
0,5 - 1	geringfügig erhöht	vermutlich VOC-Quellen im Raum, unmittelbar nach Bauarbeiten mit lösemittelfreien Materialien zu erwarten	
1 - 3	deutlich erhöht	VOC-Quellen vorhanden	tolerierbar bis zu 12 Monate
> 3	stark erhöht	unmittelbar nach Bauarbeiten mit lösungsmittelhaltigen Materialien zu erwarten	3 – 10 mg/m ³ tolerierbar bis zu 1 Monat

Die Bewertung der Formaldehydkonzentration erfolgte gemäß den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation [14] (siehe Tabelle 2). Der Unterschied der beiden vorgegebenen Empfehlungswerte lässt sich dabei durch die Vorgaben für die Probenahme erklären. Für den ½-Stunden Mittelwert sollen, wie bei der im Zuge dieses Projektes durchgeführten Probenahme, die Tür und die Fenster des beprobten Raumes verschlossen bleiben. Bei der Messung des 24 Stunden Mittelwertes sind dagegen Lüftungsphasen vorgegeben, die eine „normale“ Raumnutzung imitieren sollen. Für die im Zuge des Projektes durchgeführten Messungen über eine Stunde ohne Lüftung ist daher der ½-Stunden Mittelwert von 0,1 mg/m³ (entspricht Werten < 105 µg/m³) anzuwenden.

Tabelle 2: Beurteilung der gemessenen Formaldehydkonzentrationen gemäß WHO-Air Quality Guidelines for Europe [14]

Stoffname	Beurteilungszeitraum	Empfehlung
Formaldehyd	24 h Mittelwert	0,06 mg/m ³ *
	½ h Mittelwert	0,1 mg/m ³

* mit entsprechend vorgegebenen Lüftungsphasen

Die Beurteilung ob eine Quelle vitaler Pilzsporen im Raum vorhanden ist, wurde gemäß dem österreichischen Schimmelleitfaden [15] durchgeführt. Dabei erfolgt ein Vergleich der Menge an vitalen Pilzsporen in der Außen- und Innenluft. Bei höheren Sporenzahlen im Innenraum (Größenordnung der Differenz je nach Pilzgattung definiert) wird entweder als „Quelle vitaler Pilzsporen im Innenraum möglich“ oder bei hohen Differenzen als „Quelle vitaler Pilzsporen im Innenraum wahrscheinlich“ beurteilt. Bei Vorliegen von auffälligen Ergebnissen im Bereich von „wahrscheinlichen Quellen vitaler Pilzsporen im Innenraum“ wurden die betroffenen BewohnerInnen informiert und mögliche Maßnahmen zur weiteren Vorgehensweise besprochen.

Zur Erhebung des BewohnerInnenwohlbefindens und der Wohnzufriedenheit wurden an die standardisierten Fragebögen SF36 [16] und AUPHEP [17] angelehnte Fragebögen verwendet, welche von allen ObjektbewohnerInnen ab 16 Jahren ausgefüllt wurden. Für jüngere BewohnerInnen wurde der Fragebogen durch einen Erziehungsberechtigten/eine Erziehungsberechtigte ausgefüllt.

2.2 Ergebnisse

2.2.1 aktuelle Innenraumluftqualität

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Summen an VOC in der Innenraumluft der im Projekt untersuchten Objekte im Vergleich, wobei diese Gebäude zum Zeitpunkt der Probenahme zwischen 3 und 8 Jahre bewohnt waren. Die Objekte wurden dabei nach ihrer Bauweise in folgende Kategorien unterteilt: Holzmassivbau (grün), Holzriegelbau (orange) und mineralische Bauweise (grau).

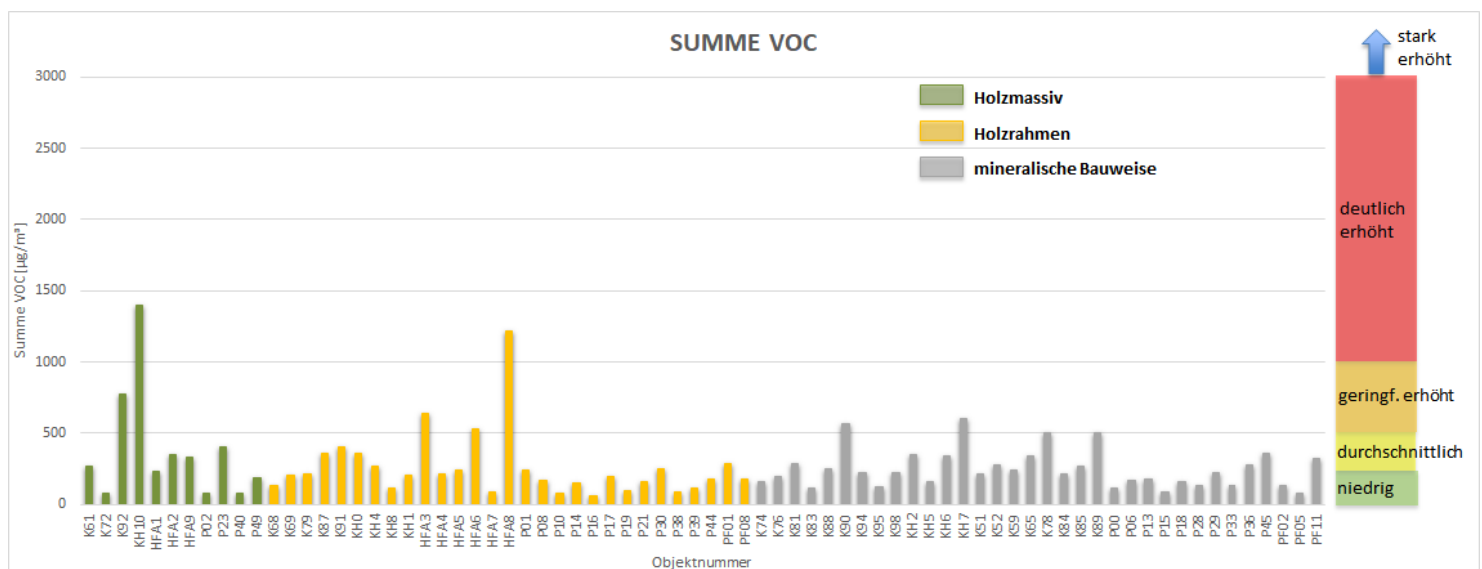


Abbildung 1: Vergleich der Summe an VOC der im Projekt beprobten Objekte; der Balken rechts außen zeigt die Richtwerte gemäß der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft des Arbeitskreises Innenraumluft des BMK [13]

Mit Ausnahme von 8 Objekten (2 Holzmassivbauten, 3 Holzrahmenbauten und 3 mineralischen Bauten) liegen alle untersuchten Objekte im durchschnittlichen bzw. im niedrigen Konzentrationsbereich der VOC Summenkonzentration in der Innenraumluft. Von den 8 Objekten mit höheren Werten werden 6 (1 Holzmassivbau, 2 Holzrahmenbauten und 3 mineralische Bauten) im Bereich der geringfügig erhöhten Emissionen eingestuft. Ein Holzmassivbau (KH10 mit $1.400 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sowie ein Holzrahmenbau (HFA8 mit $1.220 \mu\text{g}/\text{m}^3$) liegen im Bereich der deutlich erhöhten VOC Emissionen. Generell zeigen die Bauweisen untereinander aber eine ähnliche Verteilung der VOC Gesamtkonzentrationen. Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sämtliche Emissionen, auch die, welche der Nutzung/dem BewohnerInnenverhalten und nicht dem Gebäude/Möbeln zuzuordnen sind, dargestellt werden. Eine Quellenzuordnung ist aus methodischen Gründen nicht möglich.

Wie bereits oben erwähnt, erlaubt die Summe VOC jedoch keinerlei Aussage zu einer etwaigen gesundheitlichen Beeinflussung von BewohnerInnen, sondern dient nur der Orientierung bzw. dem

Vergleich der Emissionsmengen. Die toxikologische Bewertung der in der Innenraumluft detektierten Einzelsubstanzen wird gesondert unter Punkt 2.2.1 „Toxikologische Bewertung“ beschrieben.

Abbildung 2 zeigt aus welchen Substanzgruppen sich die Summe an VOC jeweils zusammensetzt. Von besonderem Interesse ist dabei die Tatsache, dass bei Objekt KH10 in Holzmassivbauweise, welches die höchste VOC-Summe der in diesem Projekt gemessenen Objekten zeigt, der Grund nicht in holztypischen VOC-Emissionen liegt, sondern auf eine hohe Menge an Alkanen, nicht identifizierbaren Substanzen und aromatischen Verbindungen zurückgeht. Auch im Fall eines Holzrahmenbaus (HFA3) mit höheren Summenwerten ergibt sich diese Erhöhung nicht durch holztypische Substanzgruppen. Stattdessen finden sich hier, wie auch in den mineralischen Bauten K90 und KH7, erhöhte Werte für die Substanzgruppe der Aromaten. Eine mögliche Ursache für das Auftreten solcher Konzentrationen von aromatischen Verbindungen und Alkanen in der Innenraumluft ist dabei das Eindringen von Kraftstoffdämpfen in die Wohnräume durch unzureichende Abdichtung gegenüber direkt angebundenen Garagen/Autostellplätzen (z.B. Garagen im Kellergeschoß oder direkt angebaute Garagen).

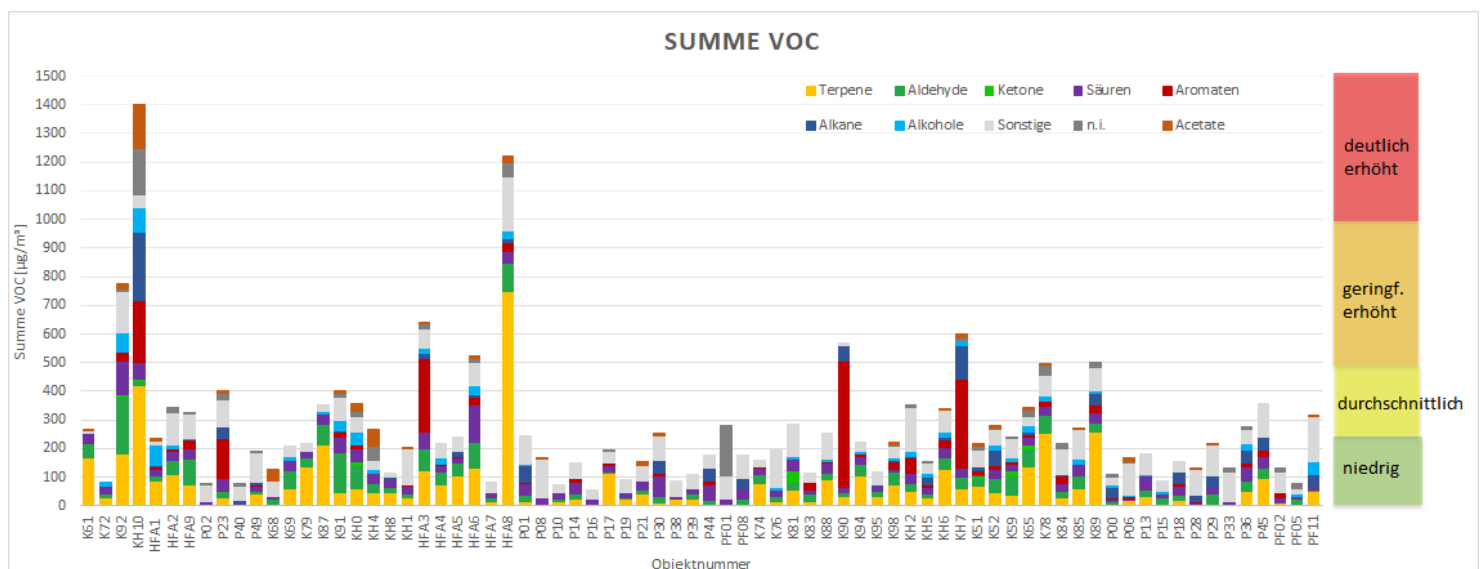


Abbildung 2: Vergleich der Zusammensetzung der Summe an VOC aus verschiedenen Substanzgruppen; der Balken rechts außen zeigt die Richtwerte gemäß der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft des Arbeitskreises Innenraumluft des BMK [13]

Es liegen daher, in den in diesem Projekt untersuchten Gebäuden, nur je ein Objekt in Holzmassivbauweise (K92) und eines in Holzrahmenbauweise (HFA8) vor, bei welchen die erhöhten VOC-Summen zu einem großen Anteil von holztypischen Emissionen wie Terpenen und Aldehyden verursacht werden. Generell ist zu erkennen, dass Terpene zwar in den Gebäuden in Holzbauweise im Vergleich verstärkt auftreten, jedoch sind diese, vermutlich über die Innenausstattung der Räume (z.B. Parkettboden, Möbel), auch in den Objekten in mineralischer Bauweise aufzufinden. Bei den Aldehyden (sekundäre Emissionen, die bei Holz und Holzwerkstoffen ebenfalls verstärkt auftreten) ergibt sich ein

ähnliches Bild. Alle untersuchten Gebäude waren bereits mehrere Jahre bewohnt, wodurch sich auch die Annäherung der Emissionen unter den Bauweisen erklärt.

In Abbildung 3 wird zur besseren Übersicht noch die Summe der Terpene in den Objekten gesondert ausgewiesen, da diese Substanzgruppe meist den mengenmäßig größten Anteil an den sogenannten holztypischen Emissionen in der Innenraumluft darstellt. In dem im Jahr 2020 veröffentlichten Teil der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft zu alpha-Pinen wird ein wirkungsbezogener Innenraumrichtwert (WIR) mit einem Halbstundenmittel von $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [18] empfohlen. Bei Überschreitung dieses Wertes in der Innenraumluft werden Maßnahmen zur Reduktion der Konzentration empfohlen. alpha-Pinen ist dabei nur eine der Einzelsubstanzen die in die Summe der Terpene eingeht.

In den in diesem Projekt untersuchten Gebäuden unterschritten aber auch die Gesamtsummen der Terpene diesen, für die Einzelsubstanz vorgegebenen Richtwert, bereits deutlich. Die höchste gemessene alpha-Pinen Konzentration wurde im Holzriegelbau HFA8 mit $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgehalten.

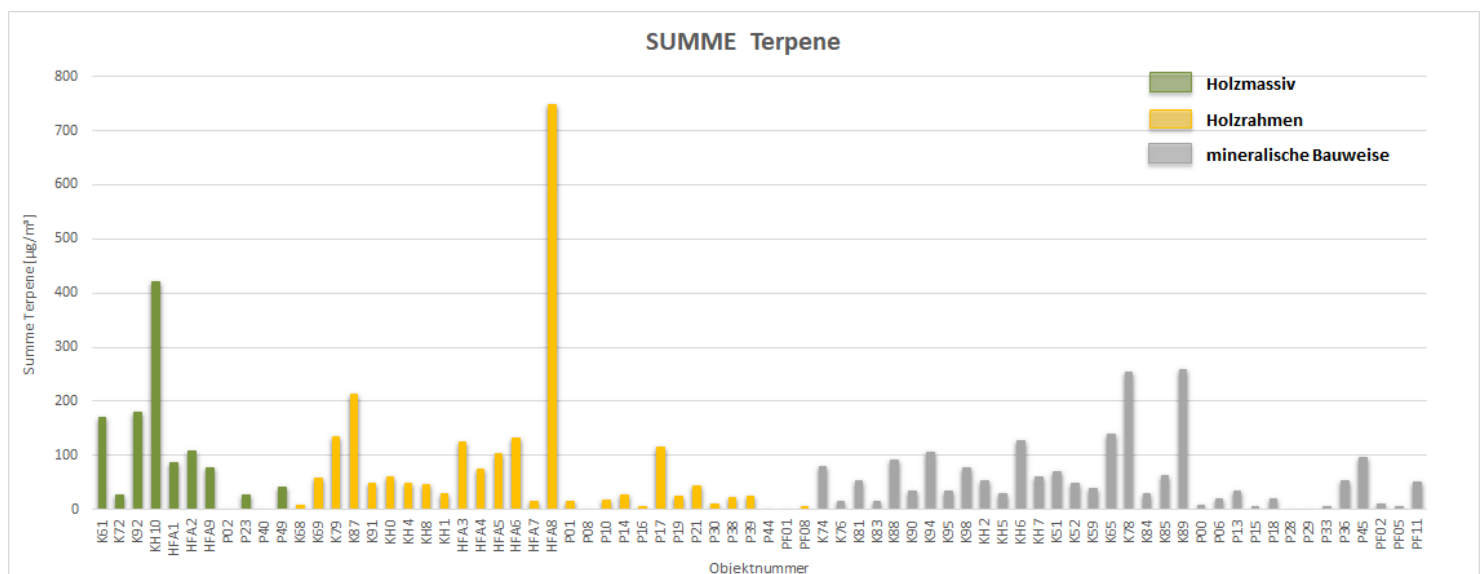


Abbildung 3: Summe der Konzentrationen an Terpenen in den untersuchten Objekten

Eine Übersicht der Formaldehydkonzentrationen in den Schlafräumen der untersuchten Objekte ist in Abbildung 4 dargestellt. In allen untersuchten Schlafzimmern wurde dabei der WHO Empfehlungswert für eine Kurzzeitmessung ohne Lüftungsphasen (wie sie auch im vorliegenden Projekt durchgeführt wurde) von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ [14] deutlich unterschritten.

IASca

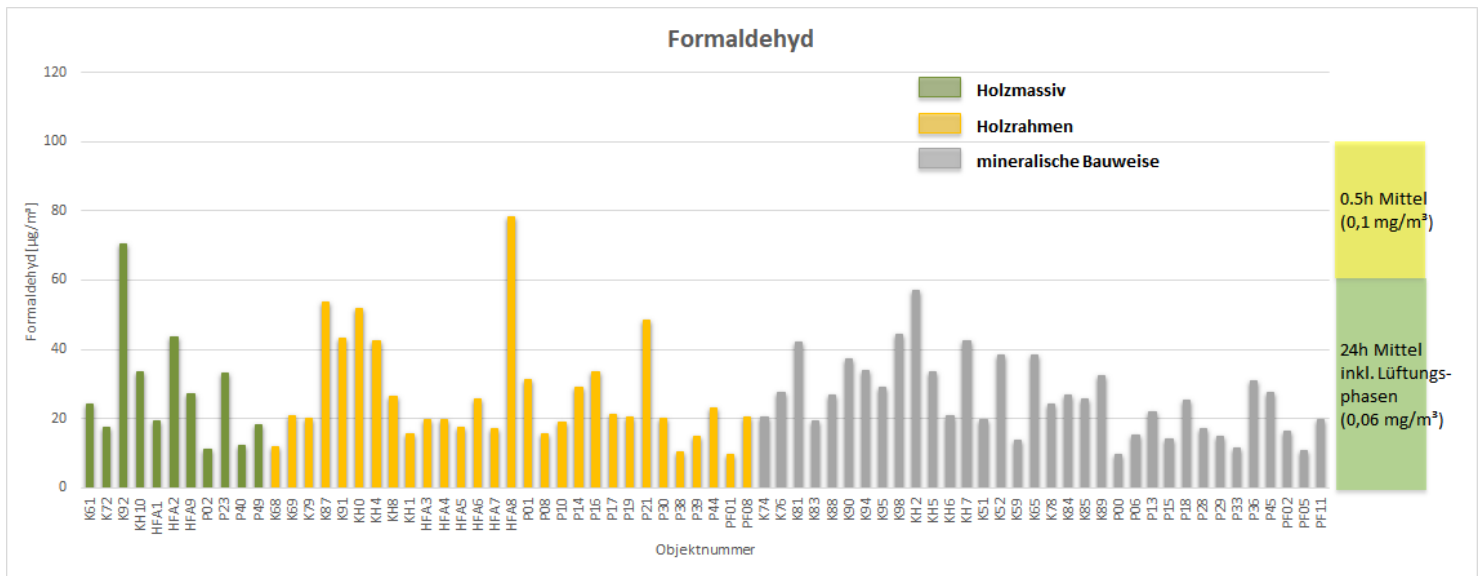


Abbildung 4: Formaldehydkonzentrationen in der Innenraumlufte der im Projekt beprobten Objekte; der Balken rechts außen zeigt die Empfehlungswerte gemäß WHO-Air Quality Guidelines for Europe [14]; für die durchgeführte Art der Messung ist der Empfehlungswert von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (entspricht Werten $< 105 \mu\text{g}/\text{m}^3$) als Beurteilungsgrundlage heranzuziehen

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der gemessenen Konzentrationen an Acetaldehyd in den beprobten Objekten. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieses Projektes lagen noch keine Empfehlungswerte für Acetaldehyd in der Innenraumlufte des österreichischen Arbeitskreises Innenraumlufte im BMK vor, wobei die Einführung eines Empfehlungswertes jedoch diskutiert wurde. Der deutsche Ausschuss für Innenraumrichtwerte AIR (früher Ad-hoc Arbeitsgruppe) gab 2013 für Acetaldehyd einen Richtwert II (Gefahrenrichtwert) von $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ und einen Richtwert I (Vorsorgewert – gesundheitliche Beeinträchtigungen sind bei Unterschreitung auch bei lebenslanger Exposition nicht zu erwarten) von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ vor [19]. Mit Ausnahme eines Holzmassivbaus (K92) der die Vorgabe leicht überschreitet, lagen die Konzentrationen in allen untersuchten Objekten deutlich unter den Richtwert I Vorgaben.

IASca

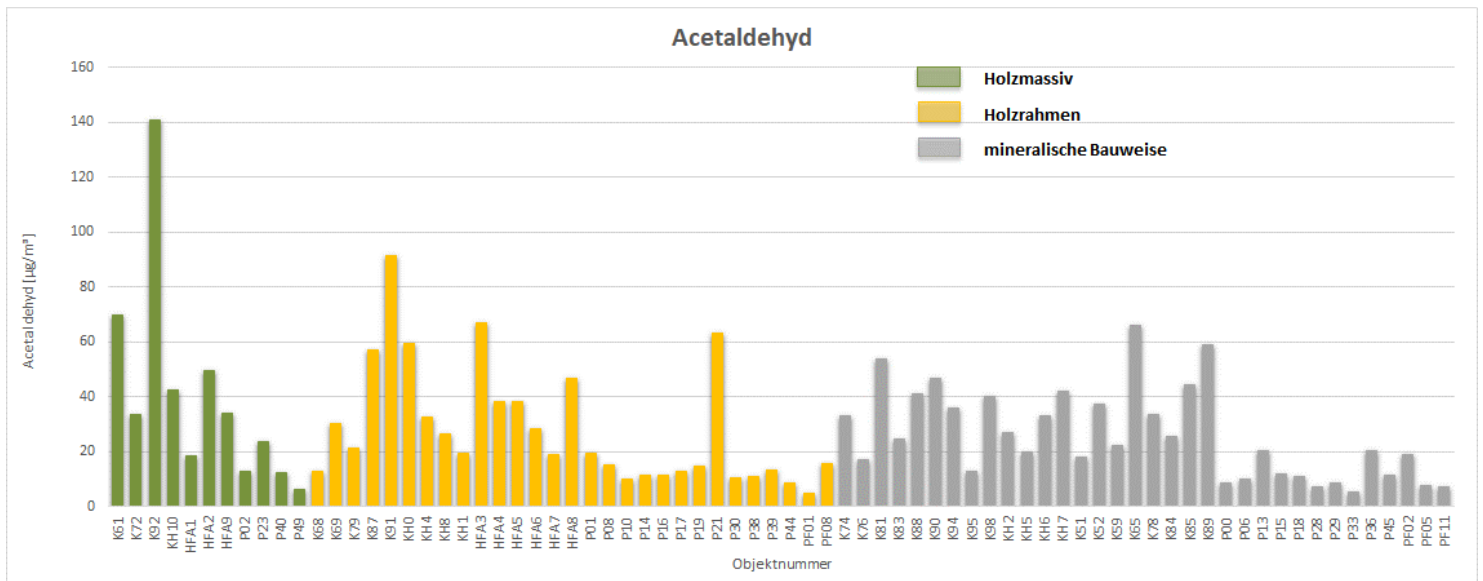


Abbildung 5: Acetaldehydkonzentrationen in der Innenraumluft der im Projekt beprobten Objekte

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der untersuchten Wohnräume bezüglich der Schimmelpilzkonzentrationen im Innenraum. Hinsichtlich der Schimmelpilzkonzentration zeigten sich keine signifikanten Unterschiede, die auf die unterschiedlichen Bauweisen zurückzuführen sind. In vielen Fällen ist eine erhöhte Konzentration vitaler Schimmelsporen im Innenraum auf die Einbringung von außen (beispielsweise in Objekt HFA9, dass sich in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlich genutzten Flächen befindet, auf welchen zum Zeitpunkt der Messung eine Gülleaufbringung erfolgte) bzw. auf vorhandene Topfpflanzen (K79, K87 und KH8) zurückzuführen.

Holzmassiv									
K61	K72	K92	KH10	HFA1	HFA2	HFA9	P02	P23	P40

Holzriegel																						
K68	K69	K79	K87	K91	KH0	KH4	KH8	KH1	HFA3	HFA4	HFA5	HFA6	HFA7	HFA8	P01	P08	P10	P14	P16	P17	P19	P21

mineralische Bauweise																										
K74	K76	K81	K83	K88	K90	K94	K95	K98	KH2	KH5	KH6	KH7	K51	K52	K59	K65	K78	K84	K85	K89	P00	P06	P13	P15	P18	P28

	Quelle vitaler Pilzsporen im Innenraum unwahrscheinlich
	Quelle vitaler Pilzsporen im Innenraum möglich
	Quelle vitaler Pilzsporen im Innenraum wahrscheinlich

Abbildung 6: Beurteilung der Differenz der vitalen Pilzsporen im Vergleich der Innenraum- und der Außenluft der im Projekt beprobten Objekte

2.2.2 Toxikologische Bewertung

Die toxikologische Bewertung der gemessenen Substanzkonzentrationen in der Innenraumluft der untersuchten Objekte wurde durch die am Projekt beteiligten MitarbeiterInnen der Medizinischen Universität Wien durchgeführt. Dabei wurden im Bericht „Indoor Air Scavenger 3.0: Toxikologische Bewertung“ [20] folgende Schlussfolgerungen anhand der Messergebnisse gezogen:

In Bezug auf die Summe der VOC zeigten die Messwerte insgesamt eine unauffällige Situation. Für die beiden Objekte (KH10, HFA8) mit VOC-Summenwerten größer $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lautete die Empfehlung an die NutzerInnen als wesentliche Maßnahme auf ein verstärktes Lüftungsregime zu setzen.

In keinem der Objekte war aufgrund der vorliegenden Summe an Terpenen mit gesundheitlichen Reaktionen zu rechnen. Auch in Bezug auf die Summe an Aldehyden wurden gesundheitliche Beeinträchtigungen ausgeschlossen.

Die gefundenen Formaldehydkonzentrationen wurden als vergleichsweise niedrig und ohne toxikologisch fassbares Risiko eingestuft. Akute und chronische gesundheitliche Beeinträchtigungen der BewohnerInnen konnten daher ausgeschlossen werden.

Die geringfügige Überschreitung des Richtwertes I des deutschen Ausschusses für Innenraumrichtwerte von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ für Acetaldehyd [19] im Objekt K92 wurde als toxikologisch nicht relevant eingestuft.

Hinsichtlich der Summen an Aromaten, vor allem aber auch hinsichtlich der gefundenen Konzentrationen an Toluol- und Xylol in den Gebäuden in mineralischer Bauweise K90 und KH7, war zwar keine toxikologisch relevante Beeinträchtigung zu erwarten, eine Quellensuche und verstärktes Lüften wurde aber empfohlen. Durch die in 12 Objekten in der Innenraumluft nachgewiesenen Benzolkonzentrationen zwischen $1,6$ und $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergibt sich bei langfristiger Exposition eine Wahrscheinlichkeit von zwischen 1:11.000 und 1:107.000, dass die BewohnerInnen erkranken. Es wurde dabei darauf hingewiesen, dass das tatsächliche Risiko, aufgrund der angewendeten Messmethode im Projekt, wahrscheinlich aber deutlich geringer ist. Vor allem für die Objekte K90 und KH7 wurde daher erneut eine Quellensuche und verstärktes Lüften empfohlen. Für die Objekte HFA3 und HFA6, die zusätzlich zum Auftreten geringer Konzentrationen an Benzol auch geringfügig erhöhte VOC Summenkonzentrationen aufwiesen, wurde eine intensivere Lüftung als ausreichend angeführt.

2.2.3 Medizinisch-epidemiologische Bewertung

Die medizinisch-epidemiologische Bewertung der von den BewohnerInnen der untersuchten Objekte ausgefüllten Fragebögen, wurde durch die am Projekt beteiligten MitarbeiterInnen der Medizinischen Universität Wien durchgeführt und im Bericht „Indoor Air Scavenger 3.0: Medizinisch-epidemiologischer Endbericht“ [21] beschrieben. Die Analyse der Ergebnisse erfolgte dabei aus mehreren Blickwinkeln, für welche die Objekte nach verschiedenen Hauseigenschaften eingeteilt wurden (z.B.: energieeffizientes Haus vs. Kontrollgruppe). In diesem Öffentlichkeitsbericht werden nur die Ergebnisse der Analyse mit Blick auf den Vergleich der Bauweisen gekürzt dargestellt, wobei ausschließlich auf Aspekte mit signifikantem oder beinahe signifikantem Unterschied genauer eingegangen wird. Alle Objekte in Holzmassiv- und Holzriegelbauweise wurden für die Analyse in der Gruppe „Holz“ zusammengefasst und der Gruppe „Mineralisch“ gegenübergestellt. Dabei wurden in der Gruppe „Holz“ 133 und in der Gruppe „Mineralisch“ 93 Personenbefragungen in die Auswertung einbezogen.

Bei der Einschätzung des allgemeinen Gesundheitszustandes fand sich ein signifikanter Unterschied ($p=0,009$) zwischen HolzhausbewohnerInnen (78,9% „ausgezeichnet“ oder „sehr gut“) und den BewohnerInnen mineralischer Bauten (66,7% „ausgezeichnet“ oder „sehr gut“), wobei sich dieser aber nur bei den Kindern und nicht bei den erwachsenen TeilnehmerInnen zeigte. HolzhausbewohnerInnen gaben auch signifikant häufiger ($p=0,036$) an „sich ausgezeichneter Gesundheit zu erfreuen“. Der Gesundheitszustand wurde jedoch in beiden Gruppen generell sehr positiv eingeschätzt.

Signifikant häufiger ($p=0,044$ Aussage: „voller Energie“; $p=0,046$ Aussage: „glücklich“) wurde auch die Stimmungslage der HolzhausbewohnerInnen der letzten 4 Wochen vor der Befragung als sehr positiv eingeschätzt.

In Bezug auf die Luftqualität im Wohnraum traten kaum signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen auf, wobei die Raumluft von HolzhausbewohnerInnen zu einem signifikant geringeren Prozentsatz ($p=0,037$) als „abgestanden“ und häufiger als „sehr sauber“ ($p=0,046$) eingestuft wurde. Die Luftqualität wurde aber von beiden Gruppen als überwiegend positiv eingeschätzt. Der Vergleich der Bewertung des Innenraumklimas (Raumtemperatur, Lufttrockenheit, Luftbewegung, Geruchs- und Lärmbelästigung) zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

Die Wohnzufriedenheit im Vergleich zur alten Wohnung zeigte einen signifikanten Unterschied ($p=0,05$) zwischen beiden Gruppen. Wobei hier für die Holzbauten 83,6% viel zufriedener, 6,3% eher zufrieden, 8,6% genauso zufrieden, aber auch 1,3% eher unzufrieden waren. Im Vergleich dazu waren im mineralischen Bau 71,2% viel zufriedener, 21,2% eher zufrieden und 7,5% genauso zufrieden. Auch im Vergleich mit den Wohnungen von Bekannten oder Freunden wurden deutliche Unterschiede festgestellt ($p=0,027$), wobei in der Gruppe „Holz“ 58,2% viel zufriedener, 30,4% eher zufrieden, 8,9% genauso zufrieden, und je 1,3% eher unzufriedener bzw. viel unzufriedener waren. Für die mineralischen Objekte gaben 32% an, viel zufriedener, 45,3% eher zufrieden, 18,8% genauso zufrieden und 3,1% eher unzufrieden zu sein.

2.2.4 Vergleich früherer und aktueller Ergebnisse

Für alle der im vorliegenden Projekt IASca beprobten Gebäude waren bereits im Zuge früherer Projekte des Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) oder der Holzforschung Austria Daten zur Zusammensetzung der Innenraumluft erhoben worden. Dabei wurde im Bereich der VOC-Analytik beim IBO bisher die Methode der Lösemitteldesorption nach ÖNORM M 5700-2 [22] für die Analyse verwendet, während an der Holzforschung Austria die Thermodesorptionsmethode gemäß ISO 16000–6 [10] durchgeführt wurde und wird. Um die Vergleichbarkeit der historischen Daten mit den in diesem Projekt erhobenen zu gewährleisten, wurden anhand einer Vergleichskalibrierung mögliche Umrechnungsfaktoren zwischen den beiden Methoden ermittelt. Die Notwendigkeit solcher Umrechnungsfaktoren entsteht dabei aufgrund der unterschiedlichen, methodeninhärenten Selektivitäten und Sensitivitäten für die große Anzahl an Einzelsubstanzen, welche auch in die Summe an VOC eingehen. Die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse aus früheren Projekten des IBO wurden dann anhand der erhaltenen Umrechnungsfaktoren auf die Thermodesorptionsmethode gemäß ISO 16000–6 umgerechnet.

Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Veränderung der in der Innenraumluft gefundenen Summe an VOC über mehrere Jahre. Dabei ist für die meisten Gebäude, vor allem wenn erhöhte Anfangskonzentrationen vorlagen, bereits eine deutliche Konzentrationsabnahme vom 1. Probenahmetermin (1-3 Monate nach Bezug) zum 2. Probenahmetermin (8 -15 Monate nach Bezug) zu erkennen. Bei bereits geringen Anfangskonzentrationen nach Bezug schwanken die Ergebnisse der 2. und 3. Probenahme (3 bis 8 Jahre nach Bezug) dagegen oft in einem ähnlichen Konzentrationsbereich wie die ersten Messergebnisse. Solche geringen Änderungen können wahrscheinlich zum Teil einerseits auf die Messunsicherheit der angewandten Methoden und andererseits auf natürliche Schwankungen der Umgebungsbedingungen (z.B. der Temperatur) zurückgeführt werden. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist außerdem, dass nach einer gewissen Nutzungsdauer der Anteil der Emissionen der Baustoffe an der Gesamtkonzentration an VOC in der Innenraumluft gegenüber dem Einfluss der nutzungs- und einrichtungsbedingten Emissionen abnimmt.

IASca

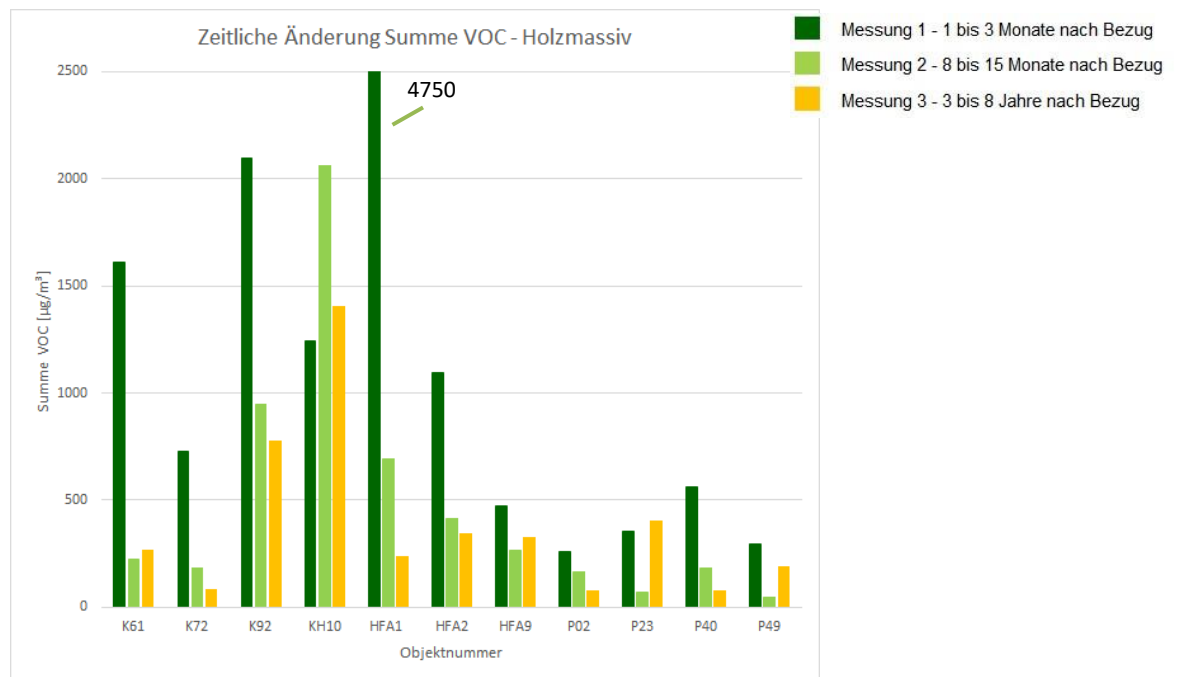


Abbildung 7: Veränderung der Summe an VOC über mehrere Jahre in den Holzmassivbauten

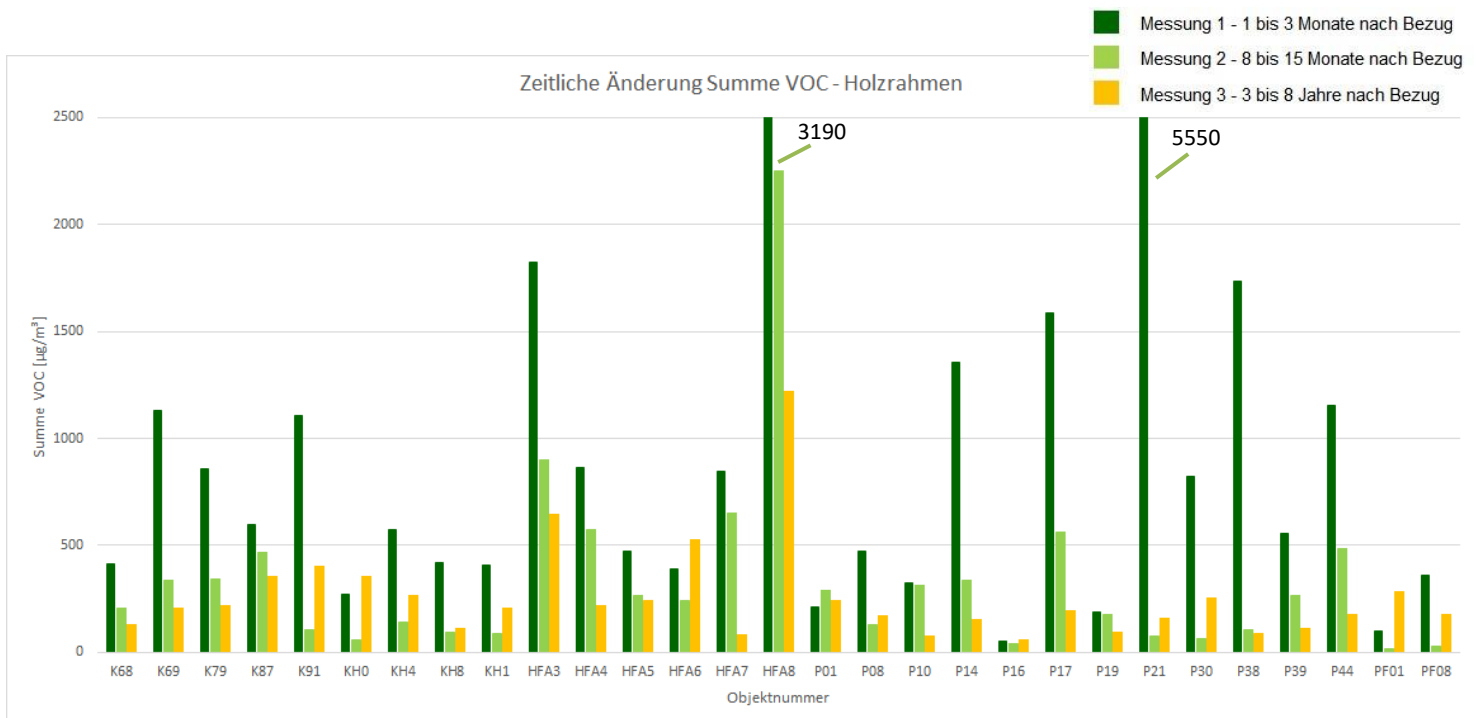


Abbildung 8: Veränderung der Summe an VOC über mehrere Jahre in den Holzrahmenbauten

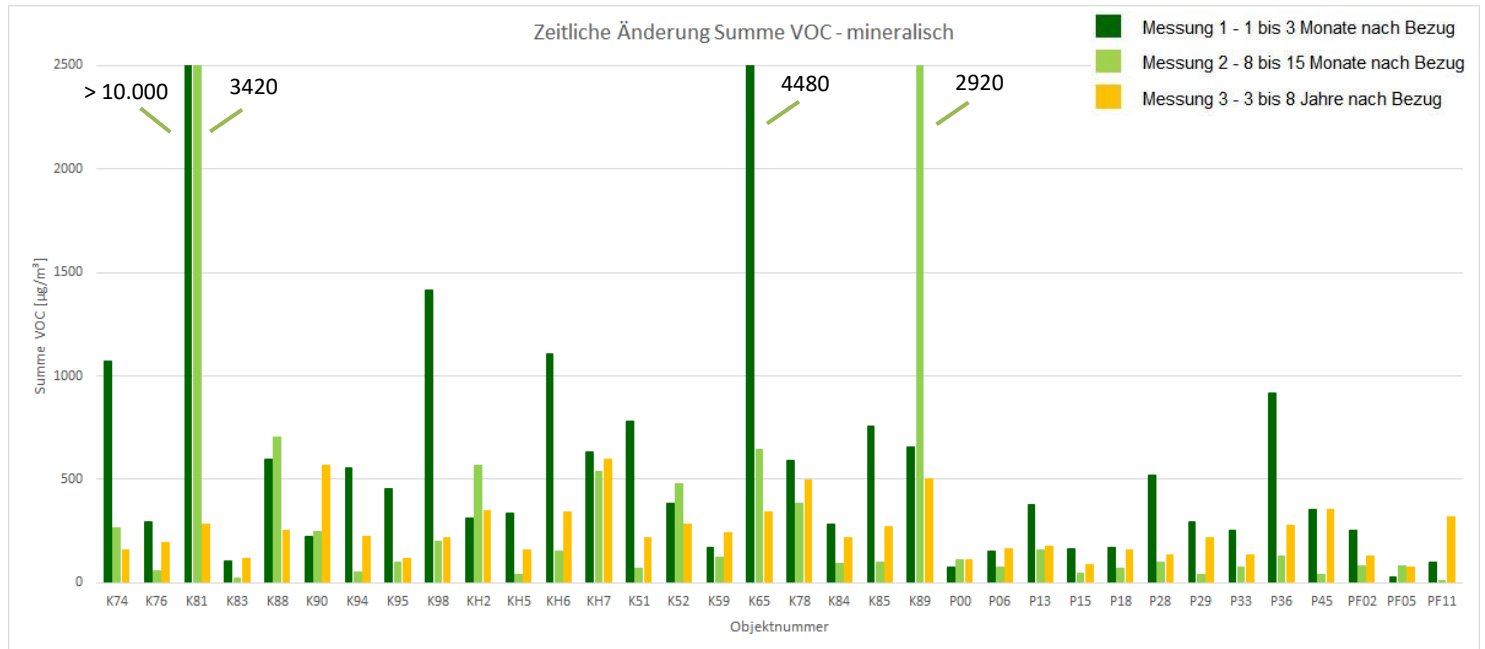


Abbildung 9: Veränderung der Summe an VOC über mehrere Jahre in den mineralischen Bauten

Die Veränderung der gemessenen Formaldehydkonzentrationen über die Jahre sind in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Im Vergleich zur Summe der VOC fällt hier auf, dass die Konzentrationen in den meisten Gebäuden aller drei Bauarten zwar geringfügig schwanken, aber nur selten große Veränderungen detektiert wurden. Dies gilt besonders nach dem ersten deutlichen Abfall der Konzentrationen über die ersten Bezugswochen und -monate. Diese Erkenntnis deckt sich mit dem aktuellen Wissensstand, dass, sobald sich eine gewisse Ausgleichskonzentration bei der Formaldehydabgabe eingestellt hat, Formaldehydemissionen über Jahre stabil bleiben.

IASca

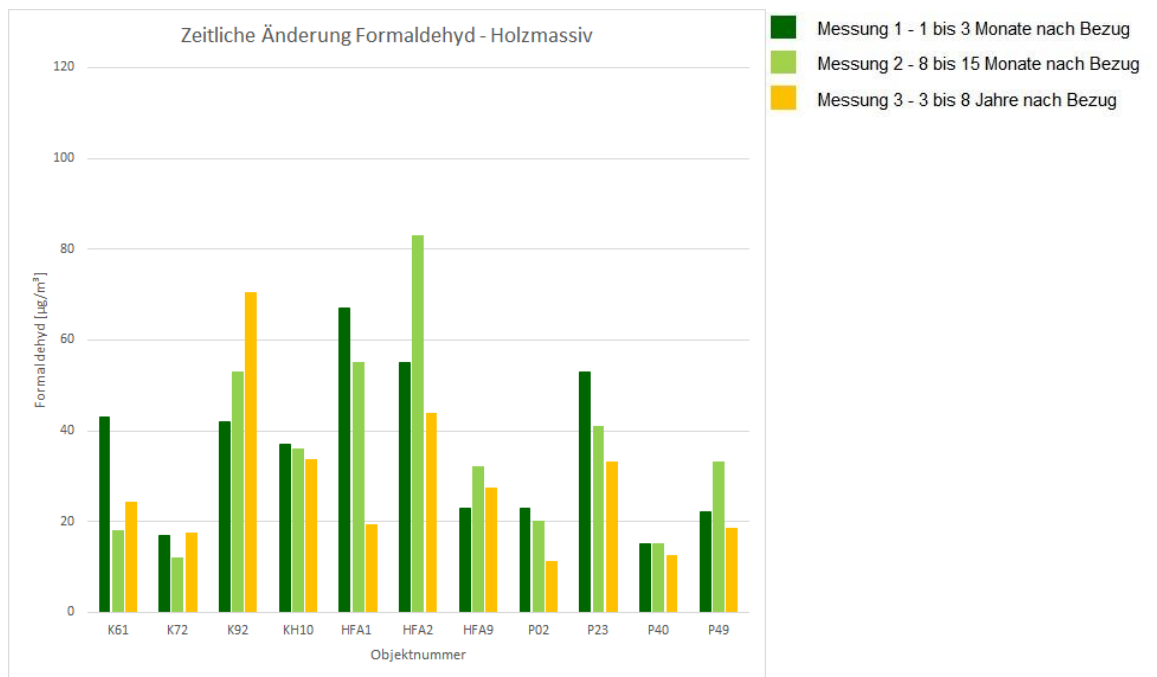


Abbildung 10: Veränderung der Formaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den Holzmassivbauten

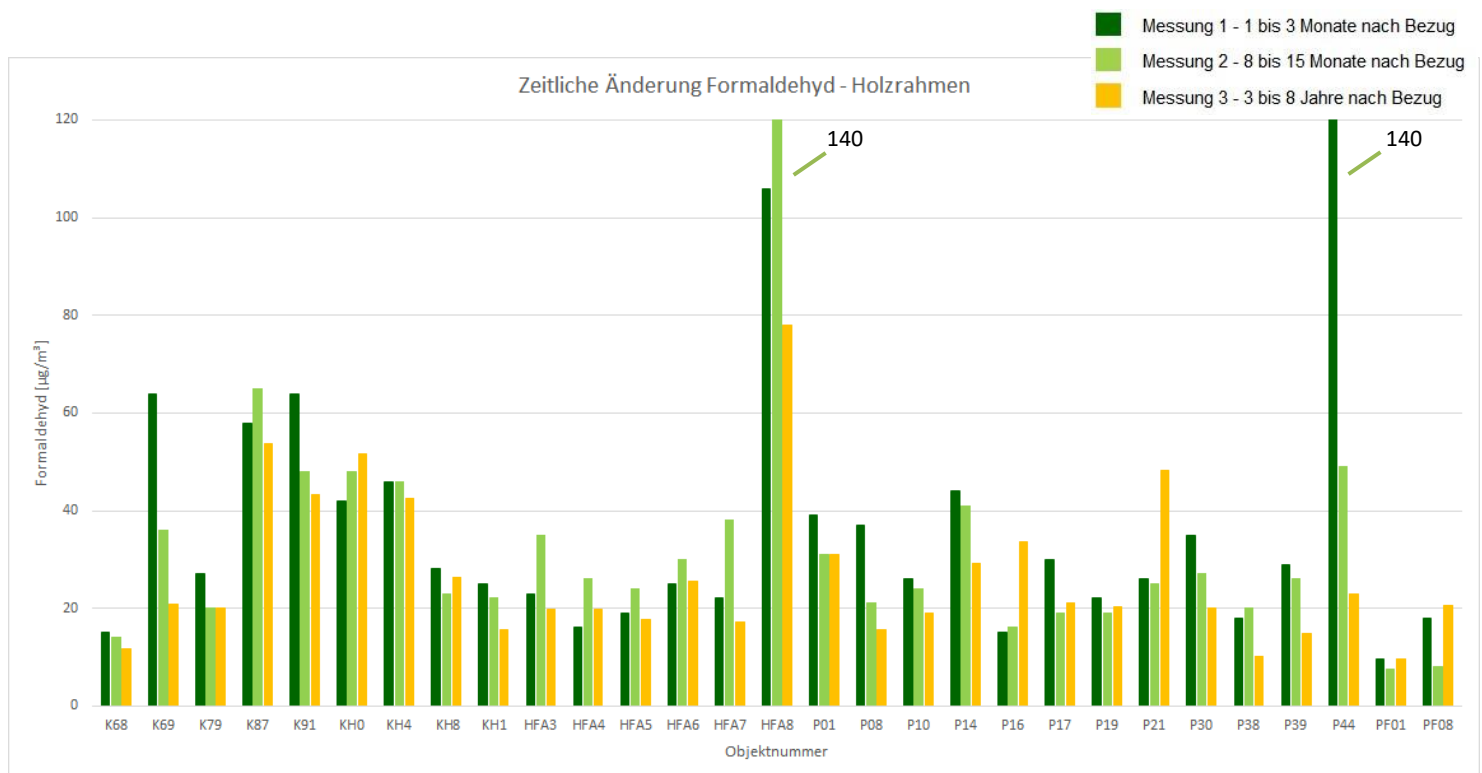


Abbildung 11: Veränderung der Formaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den Holzrahmenbauten

IASca

Die erhöhten Formaldehydwerte der ersten beiden, hier gezeigten, Probenahmen im Holzrahmenbau HFA8 sind vermutlich auf die Verwendung eines speziellen Baumaterials zurückzuführen. Verschiedene, bereits nach den ersten Messungen gesetzte Maßnahmen zur Verringerung der Konzentrationen zeigten hier Erfolg, sodass der Empfehlungswert der WHO ($0,1 \text{ mg/m}^3$) nun unterschritten wird. Auch im Objekt P44, ebenfalls ein Holzrahmenbau, konnte die anfangs erhöhte Formaldehydemission auf unter $0,1 \text{ mg/m}^3$ verringert werden.

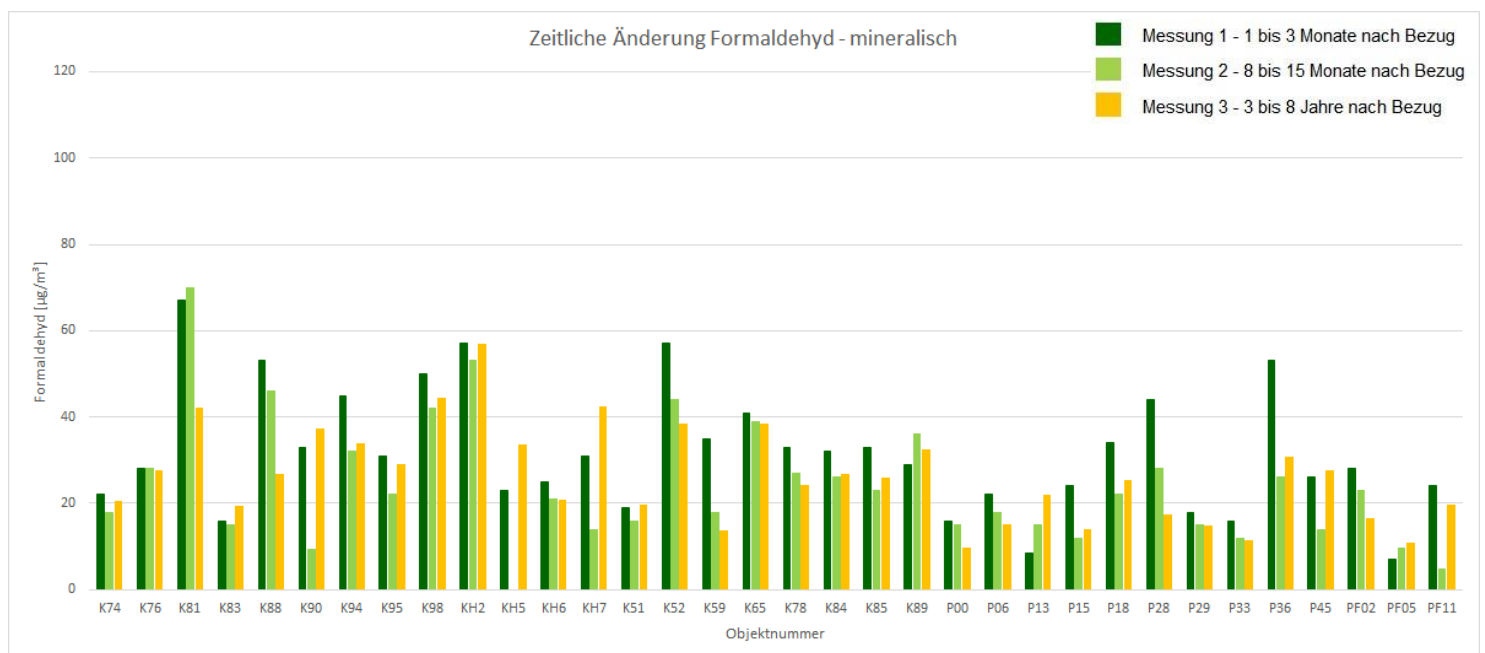


Abbildung 12: Veränderung der Formaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den mineralischen Bauten

Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Veränderung der Acetaldehydkonzentrationen in den beprobten Wohnhäusern. Ähnlich wie bei Formaldehyd sind auch hier, nach der Verringerung der anfänglich höheren Konzentrationen, nur mehr Schwankungen in einem geringen Bereich festzustellen.

IASca

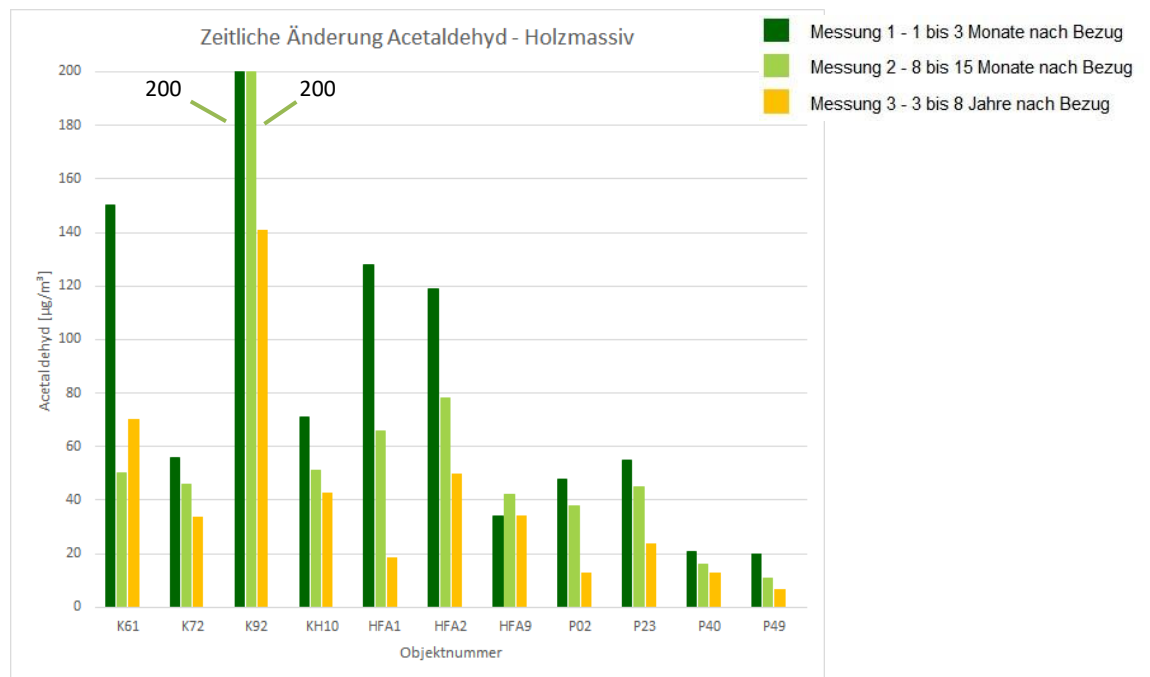


Abbildung 13: Veränderung der Acetaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den Holzmassivbauten

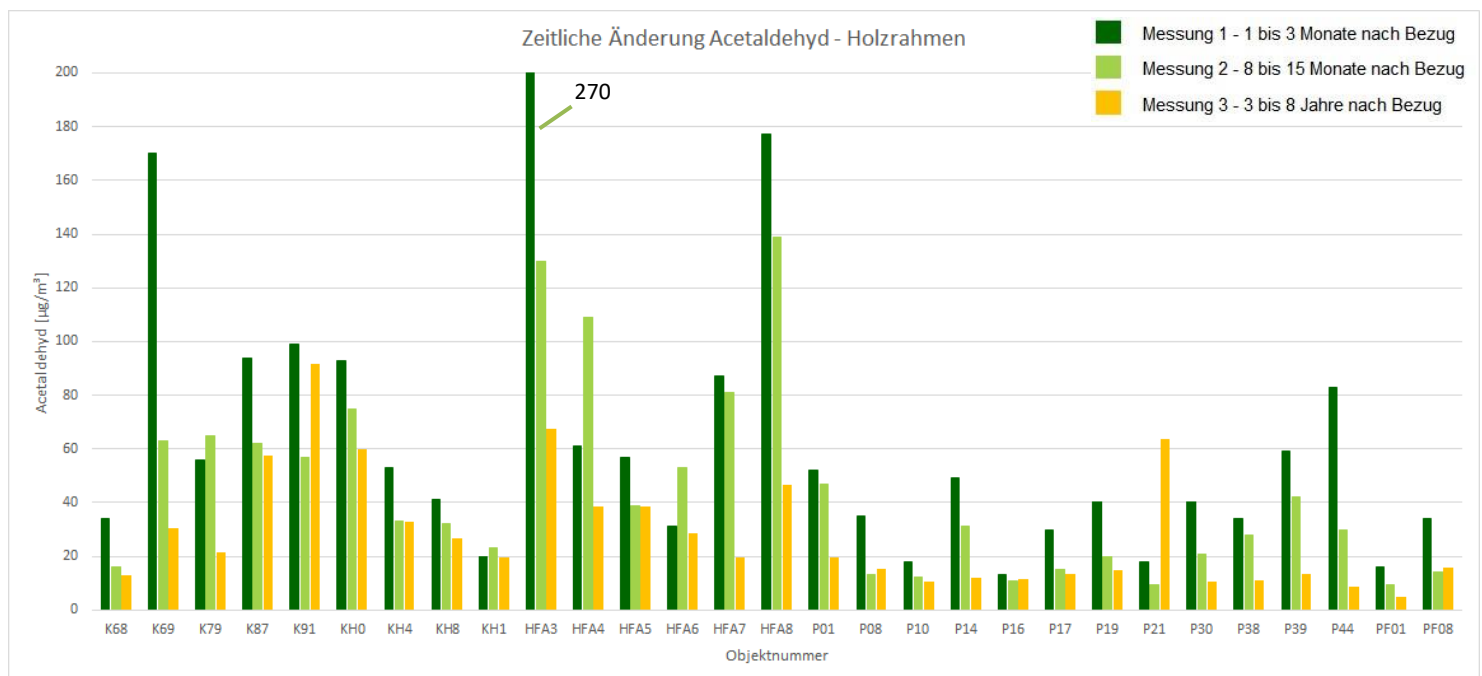


Abbildung 14: Veränderung der Acetaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den Holzrahmenbauten

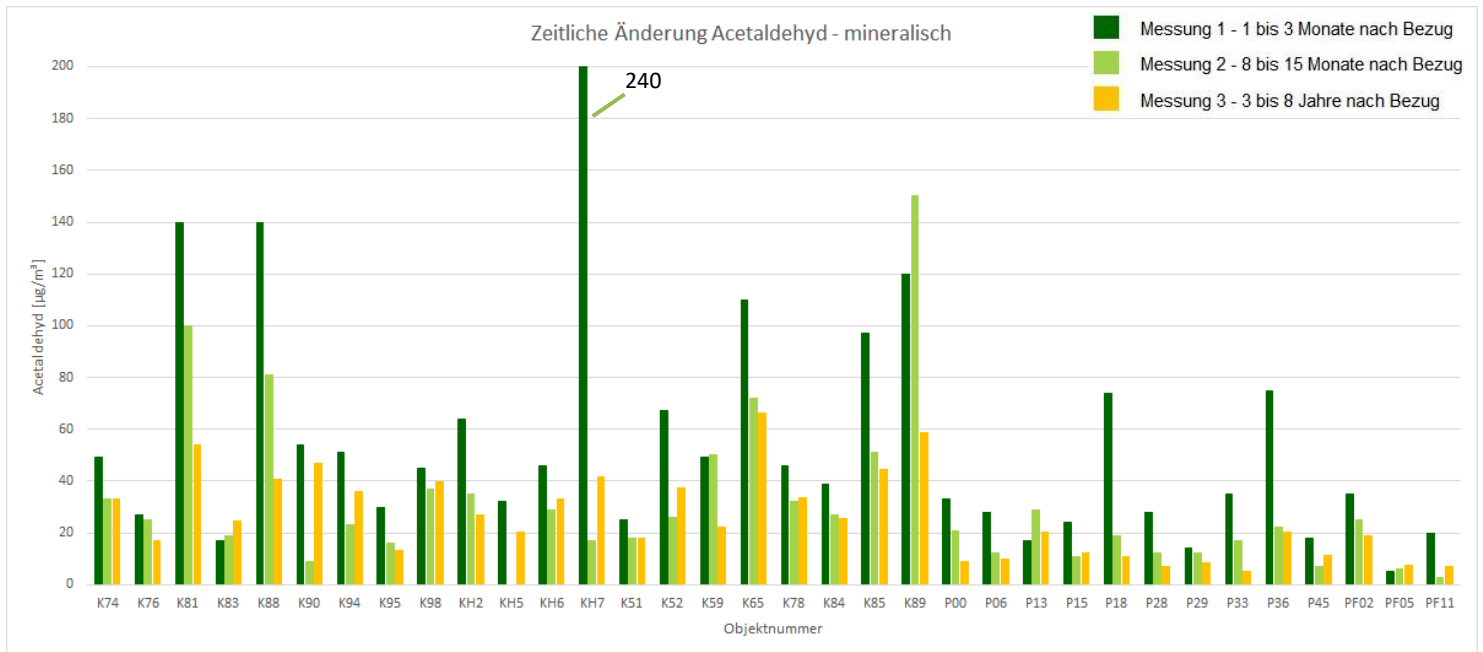


Abbildung 15: Veränderung der Acetaldehydkonzentrationen über mehrere Jahre in den mineralischen Bauten

3 Projektteil Charakterisierung von Scavenger-Materialien

Viele der wesentlichen Inhalte dieses Projektteils wurden auch bereits im Sondertagungsband der WaBoLu Innenraumtage 2020 in der Schriftenreihe Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft veröffentlicht [23].

3.1 Materialien und Methoden

Die Charakterisierung verschiedener Scavenger-Materialien in Hinblick auf ihre Fähigkeit Substanzen aus der Innenraumluft aufzunehmen und dauerhaft zu binden, wurde im vorliegenden Projekt in 3 Stufen aufgeteilt. Im Schnelltest oder Small-Scale Versuch wurde die Performance mehrere Materialarten verglichen, um die zwei aussichtsreichsten Kandidaten für den Einsatz in realen Innenräumen auszuwählen. In den Kammerprüfungen wurden die Eigenschaften dieser ausgewählten Scavenger unter kontrollierten Bedingungen genauer untersucht. Abschließend wurde dann in den Real-Raum Versuchen geprüft, ob die Materialien auch unter den tatsächlich in Neubauten vorliegenden Bedingungen einen messbaren Einfluss auf die Zusammensetzung der Innenraumluft nehmen.

3.1.1 Schnelltestaufbau - Small-Scale Versuche

Für die Schnelltests der Scavenger-Materialien wurde ein selbstdesignter Aufbau, bestehend aus einer FLEC (Field Laboratory Emission Cell) und einem dazu selbthergestellten Aluminiumgefäß, entwickelt. Dieser Methodenaufbau wurde getestet und in mehreren Schritten im Hinblick auf die konstante Konzentration an Standardsubstanzen in der Zuluft verbessert. Die Zugabe der ausgewählten Substanzen erfolgte dabei über temperierte Einzelvials, welche mit dem Zuluftstrom verbunden waren. Besonderes Augenmerk lag auf der Abschirmung des Aufbaus gegen Schwankungen der Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Sonneneinstrahlung). Auch die Probenahme über TENAX TA® Röhrchen aus dem Aufbau (in Anlehnung an ISO 16000-6 [10]) wurde getestet und auf Reproduzierbarkeit überprüft.

Anhand der in den Innenraumluftmessungen erhaltenen Daten wurden folgende Substanzen für die Zugabe während den Schnelltests ausgewählt: Essigsäure, 1-Methoxy-2-propanol, Hexanal und alpha-Pinen. Die Auswahl erfolgte dabei einerseits über die am häufigsten gemessenen Substanzklassen (Säuren, Alkohole, Aldehyde und Terpene) sowie über die in den einzelnen Messungen gefundenen Mengen an diesen Substanzen. Dabei wurden, im Vergleich zu realen Innenraumluftverhältnissen, relativ hohe Substanzmengen zugegeben, um eine Reaktion der Scavenger-Materialien im Schnelltest zu erzielen. Die Zuluft-Konzentrationen der getesteten Substanzen wurden auf ca. je 0,1 ppm eingestellt.

Als mögliche für den Einsatz im Innenraum geeignete Scavenger-Materialien wurden ausgewählt: zwei Arten von Zeolithen (Köstrolith 3AK-3 Å und Köstrolith 13XBFK-9 Å), Aktivkohle (~3 mm, dampfaktiviert, ROTH 0998.3), Silikagel (Siogel engporig SIO-02 und Siogel weitporig SIO-08) sowie beta-Cyclodextrin (Sigma W402826), wobei die Zeolithe und die Silikagele vor den Tests für ca. 20 Stunden bei 180°C regeneriert wurden.

Untersucht wurden im Schnelltest jeweils eine Woche Substanzzugabe (Adsorption) und eine Woche die eventuelle Wiederabgabe der Substanzen.

3.1.2 Kammerprüfungen

Die Kammerprüfungen wurden in zwei der 0,225 m³ Emissionsnormprüfkammern der Holzforschung Austria durchgeführt. Die Kammern wurden, in Anlehnung an die in diversen Normen als Normprüfklima für Europa vorgegebenen Werte, bei einer Temperatur von 23°C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% betrieben. Der Luftwechsel betrug 1 h⁻¹. Die Materialien wurden als „Passivsammler“ eingebracht, d.h. die Luft wurde nicht aktiv durch das Scavenger-Material gesaugt, sondern umspülte die Materialoberfläche. Wechselwirkungen der Scavenger mit den Substanzen fanden daher hauptsächlich an der Materialoberfläche bzw. in der obersten Schicht des Scavenger-Materials statt.

Zum Vergleich der Wirksamkeit der beiden Materialien wurde als Kenngröße das Materialvolumen verwendet. Für die Festlegung der notwendigen Materialmengen wurde als Ausgangspunkt für die Überlegungen der in der EN 16516 [24] definierte Modellraum mit einem Volumen von 30 m³ herangezogen. Um jedoch eine stabile Substanzzugabe und eine genaue Analytik der noch in der Kammerluft vorhandenen Substanzmengen, bei gleichzeitig relativ kurzen Probenahmezeiten, zu ermöglichen, musste eine relativ hohe Menge der Substanzen in die Kammerluft eingeleitet werden. Daher wurde für die Kammerversuche auch ein, in der Umrechnung auf den Modellraum eher zu hoch gegriffenes, Volumen an Scavenger Material von 150 l ausgewählt. Umgerechnet auf das Gewicht der beiden eingesetzten Scavenger-Materialien ergab sich somit eine Einbringmenge von 0,58 kg für die Aktivkohle und eine Menge von 1,10 kg für das Silikagel engporig in die Kammern.

Die Adsorptionsversuche in der Kammer wurden für 23 Tage, die Desorptionsversuche für 29 Tage durchgeführt.

3.1.3 Real-Raum Versuche

Die Real-Raum Versuche fanden in drei vergleichbar ausgestatteten Räumen, mit ähnlichem Raumvolumen, eines kürzlich bezogenen Einfamilienhauses in Holzbauweise (Bezug Dezember 2019 – Messungen Februar und März 2020), statt. Dafür wurden die kurz nach der Baufertigstellung erhöhten Innenraumluftkonzentrationen von VOC bei Anwendung der zwei ausgewählten Scavenger, im Vergleich zu einem Referenzraum ohne Scavenger-Material, verglichen. Alle drei Zimmer waren ausgemalt und der Laminatfußboden war fertig verlegt. Zwei der Räume (Zimmer 3 und 4) waren

teilweise möbliert. Tabelle 3 zeigt einen Überblick der Raumvolumina und des während der Versuche vorliegenden Raumklimas (Daten der Logger-Aufzeichnungen über die Versuchsdauer von 22 Tagen).

Tabelle 3: Beschreibung der Räume für die Real-Raum Versuche

Zimmer-Nr.	Raumvolumen [m ³]	T [°C] Mittelwert ± Standardabweichung	r.F. [%] Mittelwert ± Standardabweichung	Scavenger-Material
2	33	19,2 ± 0,7	47 ± 3	Aktivkohle
3	44	21,7 ± 0,7	43 ± 3	---
4	39	19,3 ± 0,9	40 ± 2	Silikagel engporig

Das Haus verfügte über keine mechanische Wohnraumlüftung. Die drei Vergleichsräume wurden daher von den BewohnerInnen mehrmals pro Woche, immer gleichzeitig und immer für dieselbe Dauer, stoßgelüftet.

Vor Beginn der eigentlichen Versuche mit den Scavengern wurde in allen drei Räumen die Ausgangskonzentrationen an VOC bestimmt. Da aufgrund der Eigenheiten der Räume bereits hier unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten waren, wurde im Vorfeld schon festgelegt die Veränderung der Substanzmengen dann in Prozent der Anfangskonzentration zu bestimmen.

Wie auch in den Kammerversuchen wurden die Scavenger-Materialien als Passivsammler eingesetzt. Im Vergleich zu den Prüfkammeruntersuchungen, wurden die Materialmengen pro m³ jedoch deutlich verringert, um realistischere Einsatzmengen (benötigte Aufstellfläche, Materialkosten) zu bewerten. So wurden von der Aktivkohle ca. 11,4 kg und vom Silikagel ca. 22,7 kg in den Räumen eingesetzt. Je Material wurden zwei flache Behälter am Boden des Raumes aufgestellt. Dabei resultierte in jedem Zimmer eine Oberfläche von 0,4 m² der Scavenger, an der die Wechselwirkungen mit der Raumluft stattfinden konnten. Die Veränderung der Raumluftkonzentrationen wurde dann über 3 Wochen einmal wöchentlich untersucht. Nach der Innenraumluftprobenahme wurden die Materialien jedes Mal per Hand gründlich durchmischt, um wieder unverbrauchtes Material an die Oberfläche zu bringen.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Schnelltests - Small-Scale Versuche

Jedes ausgewählte Material wurde in den Schnelltestaufbau eingebracht und mit Luft umspült, wobei jeweils eine Woche Substanzzugabe (Adsorption) und eine Woche die eventuelle Wiederabgabe der Substanzen untersucht wurde.

Für die Auswertung der Scavenger-Performance wurde die bei der Adsorption in der Zuluft enthaltene Menge an Substanzen (ca. 0,1 ppm) als 100% definiert. Enthielt die in der Messzelle gemessene Luft eben diesen Wert von 100% einer Substanz, so wurde diese Substanz nicht bzw. nicht mehr von dem enthaltenen Scavenger-Material adsorbiert. Bei 0% der Substanz in der Messzellenluft wurde die Substanz dagegen vollständig vom Material zurückgehalten.

Lag die Desorptionskurve dieser Substanz 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.

Die Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die erhaltenen Adsorptions- und Desorptionskurven der untersuchten Zeolithe mit 3 Å und 9 Å. Beide zeigten für die Essigsäure und 1-Methoxy-2-propanol gutes und für Hexanal etwas weniger gutes Adsorptionsverhalten. Alpha-Pinen wurde im Vergleich eher schlecht adsorbiert. Die aufgenommene Menge an Hexanal wird auch von beiden Zeolithen nahezu vollständig wieder abgegeben sobald reine Luft zugeführt wird.

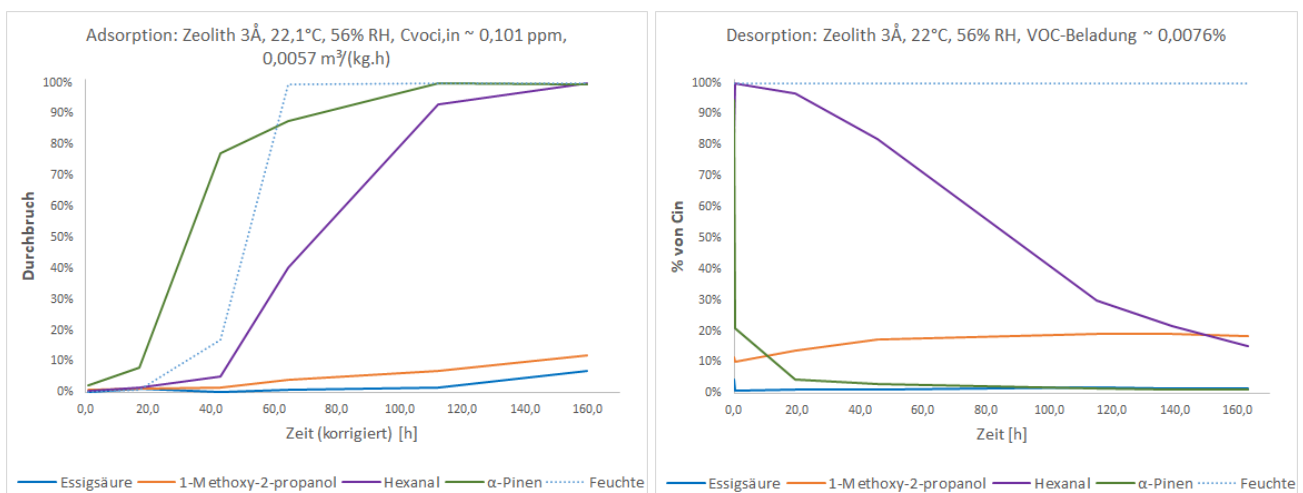


Abbildung 16: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf dem Zeolith 3 Å

IASca

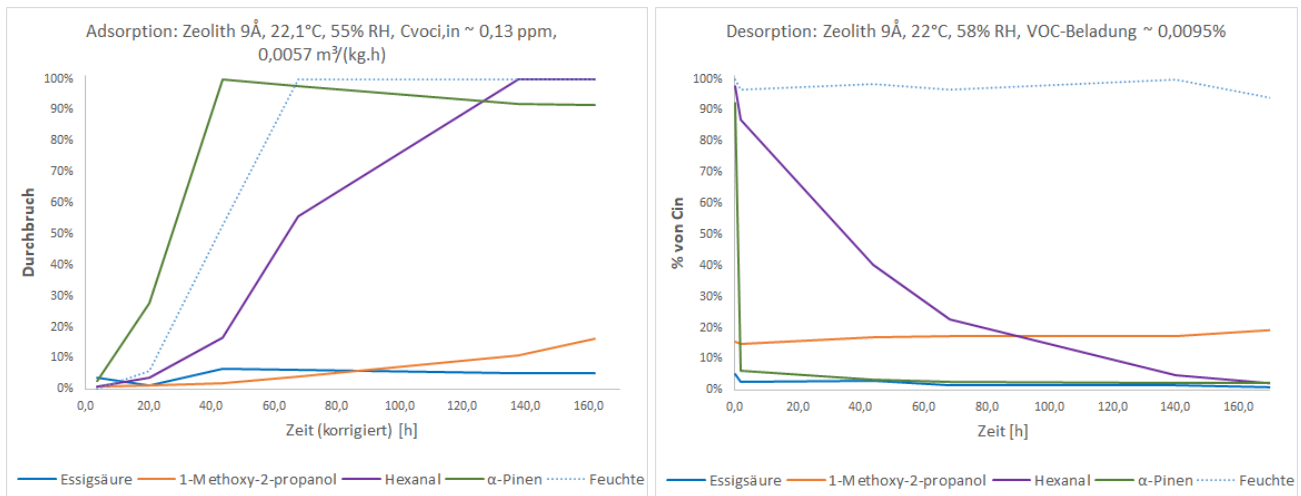


Abbildung 17: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf dem Zeolith 9 Å

Die Silikagel engporig und weitporig zeigten für Essigsäure, 1-Methoxy-2-propanol und Hexanal jeweils gute Adsorption (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). Ein deutlicher Unterschied wurde jedoch in der Adsorption von alpha-Pinen, welches im engporigen Silikagel stärker adsorbiert als in der weitporigen Variante, beobachtet.

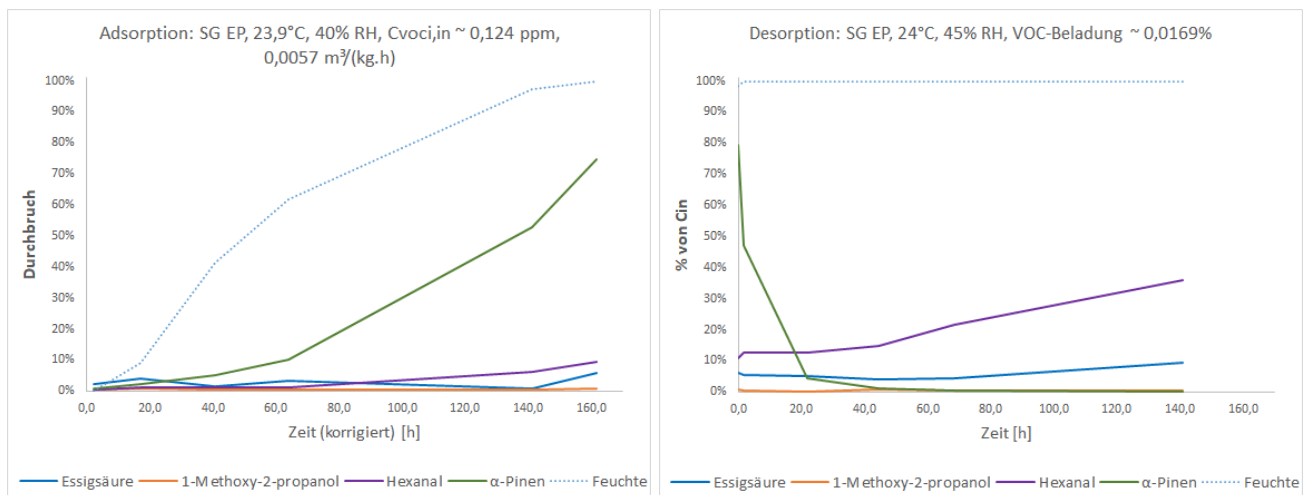


Abbildung 18: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf dem Silikagel engporig

IASca

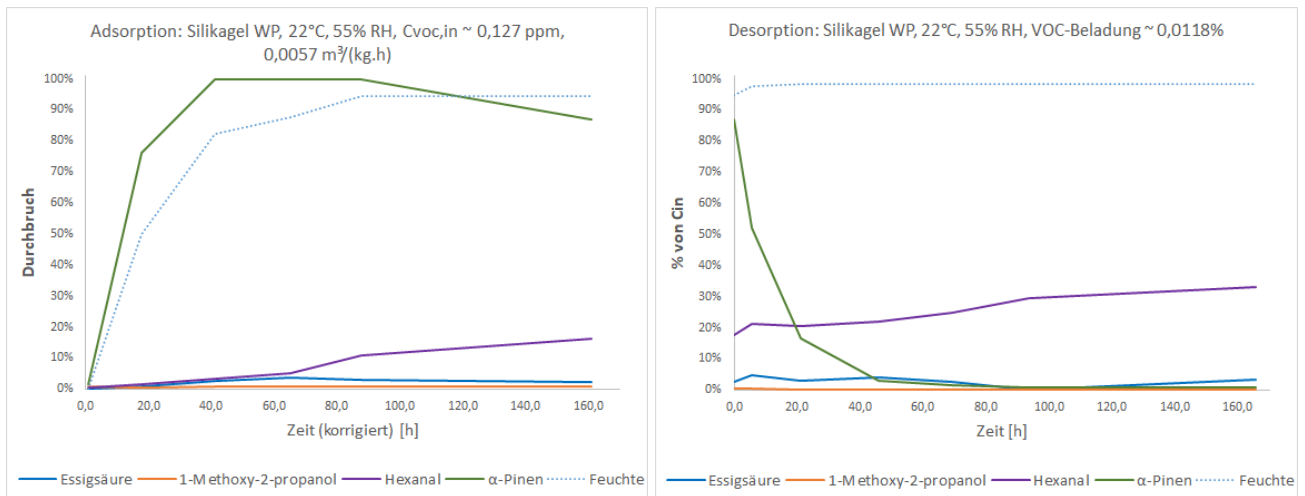


Abbildung 19: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf dem Silikagel weitporeig

Beta-Cyclodextrin wies, mit Ausnahme von Essigsäure und in geringen Mengen 1-Methoxy-2-propanol, keine Adsorption der ausgewählten Verbindungen auf. Aktivkohle zeigte für alle ausgewählten Substanzen sowohl die beste Adsorption als auch die stabilste Bindung der Substanzen.

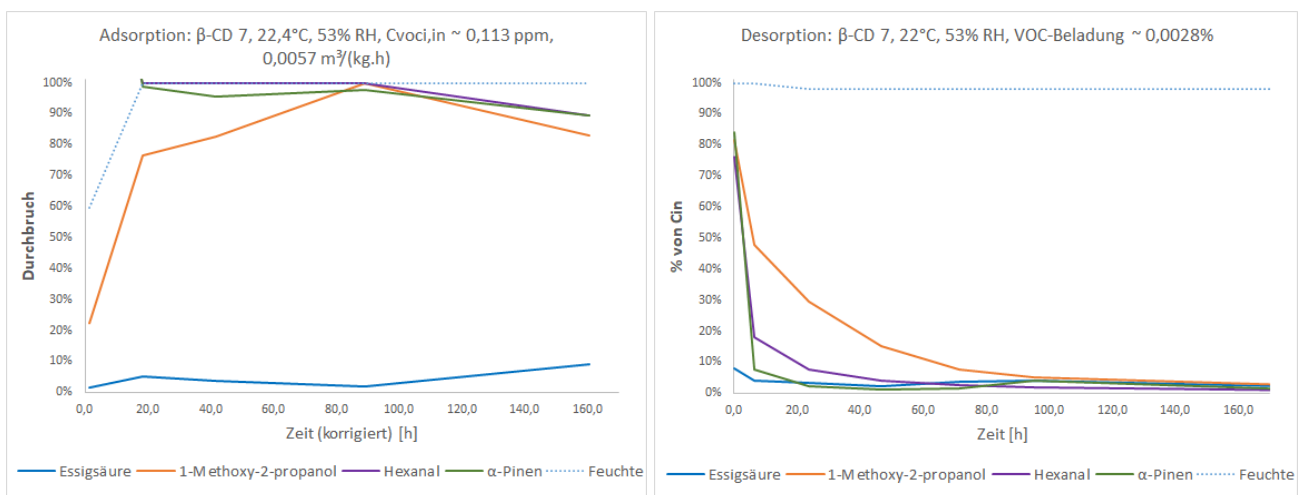


Abbildung 20: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf dem beta-Cyclodextrin

IASca

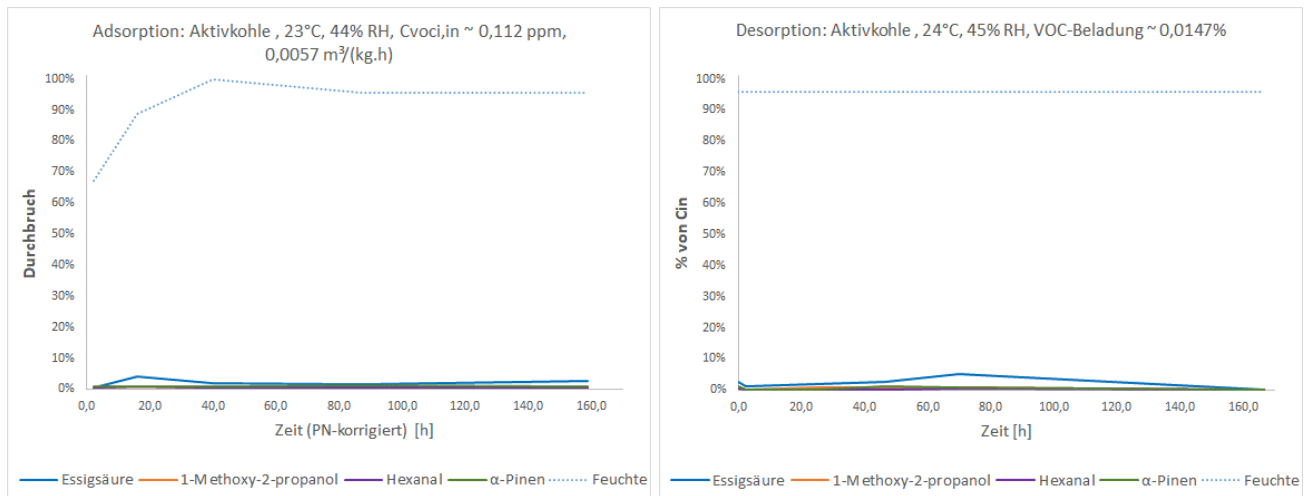


Abbildung 21: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen auf Aktivkohle

Zum besseren Vergleich der Performance der untersuchten Scavenger-Materialien sind in Abbildung 22 die Ergebnisse der Sorptionsversuche als Rückhalteeffizienz über alle untersuchten Substanzen dargestellt. Der erste Balken steht jeweils dafür, wie stark die VOC durch den Scavenger aufgenommen wurden, während der zweite Balken anzeigt in welchem Ausmaß die aufgenommenen VOC dann zurückgehalten wurden. Der dritte Balken stellt dann die Rückhalteeffizienz über den gesamten Versuch für das jeweilige Material dar.

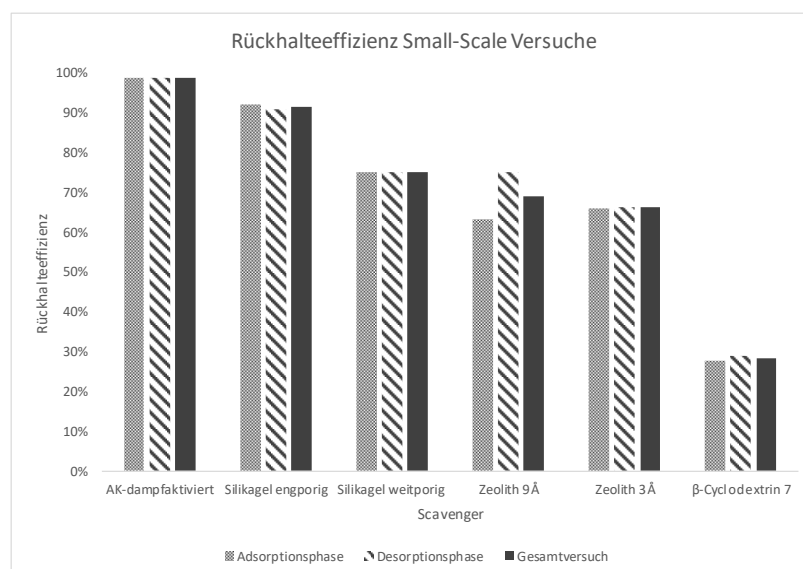


Abbildung 22: Rückhalteeffizienz der untersuchten Scavenger-Materialien im Schnelltest

Aufgrund der guten Adsorption der Aktivkohle über alle Substanzklassen bzw. aufgrund der guten Adsorption von Essigsäure, 1-Methoxy-2-propanol und Hexanal und der, im Vergleich zu den anderen Scavenger-Materialien, besseren Adsorption von alpha-Pinen des Silikagel engporig, wurden diese Materialien für die weitere Projektarbeit ausgewählt.

3.2.2 Beeinflussung durch Änderung der Umgebungsbedingungen

Nach erfolgter Auswahl der beiden Scavenger-Materialien, wurde der selbst entwickelte Schnelltestaufbau verwendet, um die Wirkung von Änderungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Scavenger Aktivkohle und Silikagel engporig zu untersuchen.

Die Beeinflussung der Rückhalteeffizienz durch Veränderung der Wassersättigung (bedingt durch die Wasseraufnahme während des Aufenthaltes des Scavengers unter feuchter (50%) Zuluft) ist in Abbildung 23 dargestellt. Das Silikagel engporig wies dabei eine deutliche Effizienzabnahme bei Erhöhung der Wassersättigung auf. Wahrscheinlich werden hier die Adsorptionsstellen für andere (vor allem apolare) Substanzen von den adsorbierten Wassermoleküle blockiert. Bei Verringerung des Wassergehaltes der Luft zeigte sich hier dagegen kaum eine Veränderung zu den Standardbedingungen. Da die verwendete Aktivkohle durch eine Erhitzung mit Dampf aktiviert wurde und dadurch mit Wassermoleküle noch vor dem Gebrauch gesättigt ist, wurde nicht erwartet, dass eine gezielte Sättigung mit feuchter Luft zu einer Effizienzänderung führen würde. Aus diesem Grund wurde für Aktivkohle nur eine gezielte Reduktion der Wassersättigung getestet. Abbildung 23 zeigt, dass die Reduktion der Wassersättigung bei Aktivkohle fast keinen Einfluss auf die Sorptionseffizienz hat.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der Adsorptions-Rückhalteeffizienz der beiden Materialien über die ersten 40 h der Adsorption dargestellt. Da in Wohnräumen die Temperaturen meist auch im Winter ca. 22 °C betragen und es in den Sommermonaten zu einer Erwärmung kommt, wurde hier nur der Einfluss einer Temperaturerhöhung auf die Scavenger-Performance untersucht. Während für die Aktivkohle nur ein geringer Einfluss der Temperaturänderung detektiert wurde, zeigte das Silikagel engporig einen deutlicheren Abfall der Rückhalteeffizienz. Die Änderungen liegen aber bei beiden Materialien in einem Bereich von weniger als 5% und stellen daher für den Einsatz im Real-Raum keinen Hinderungsgrund dar.

IASca

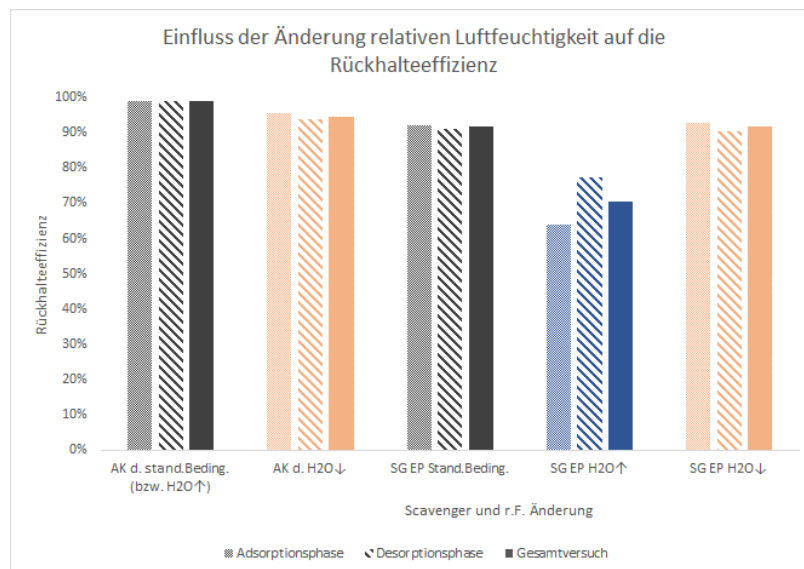


Abbildung 23: Änderung der Rückhalteeffizienz der Aktivkohle und des Silikagel engporig bei Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit

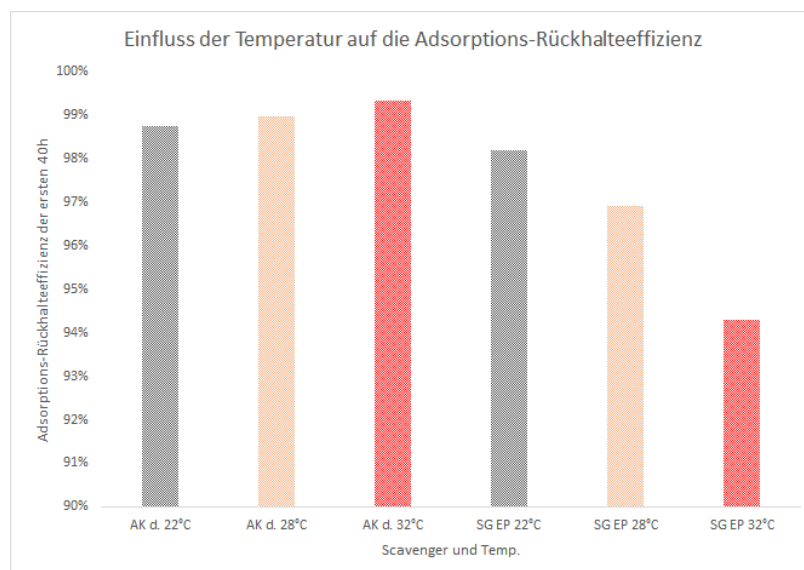


Abbildung 24: Änderung der Adsorptionsrückhalteeffizienz der Aktivkohle und des Silikagel engporig bei Änderung der Temperatur

3.2.3 Kammerprüfungen

In den Kammerprüfungen wurden die beiden ausgewählten Scavenger-Materialien Aktivkohle und Silikagel engporig in größerem Maßstab und über eine längere Dauer (23 Tage Adsorption und 29 Tage Desorption) auf ihre Wirksamkeit untersucht.

IASca

Wie bei der Darstellung der Schnelltest-Ergebnisse, wurde bei der Adsorption die in der Zuluft enthaltene Menge an Substanz als 100% definiert. Erreichte die in der Messzelle gemessene Luft eben diesen Wert von 100% einer Substanz, so wurde diese Substanz nicht bzw. nicht mehr von dem enthaltenen Scavenger-Material adsorbiert. Bei 0% wurde die entsprechende Substanz dagegen vollständig vom Material zurückgehalten. Liegt die Desorptionskurve dieser Substanz 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 Emissionsprüfkammer abgegeben.

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Ergebnisse der beiden ausgewählten Scavenger-Materialien in den Prüfkammern.

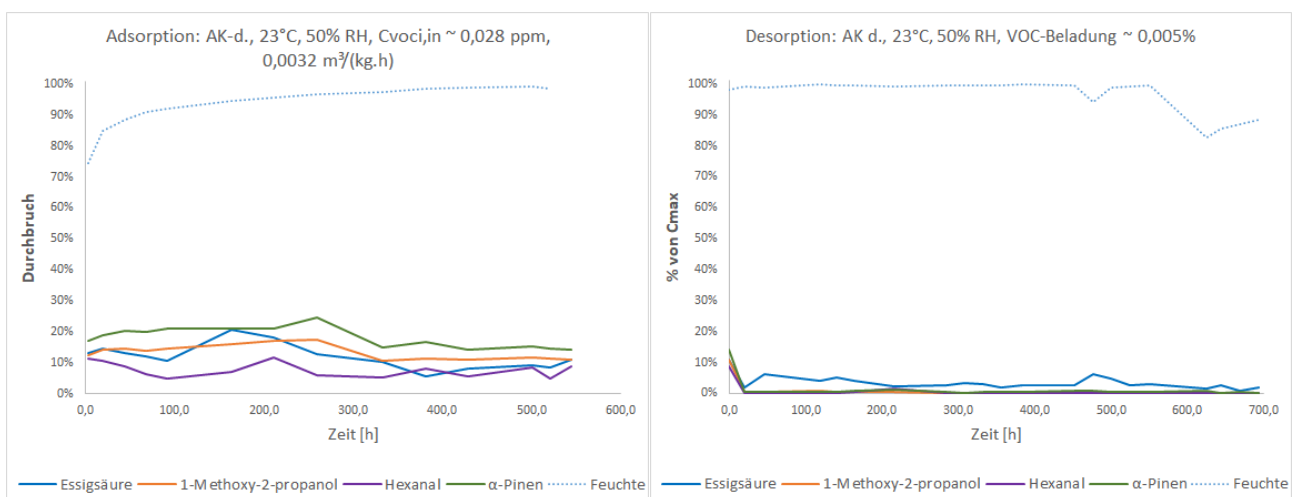


Abbildung 25: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen in der Kammerprüfung auf der Aktivkohle

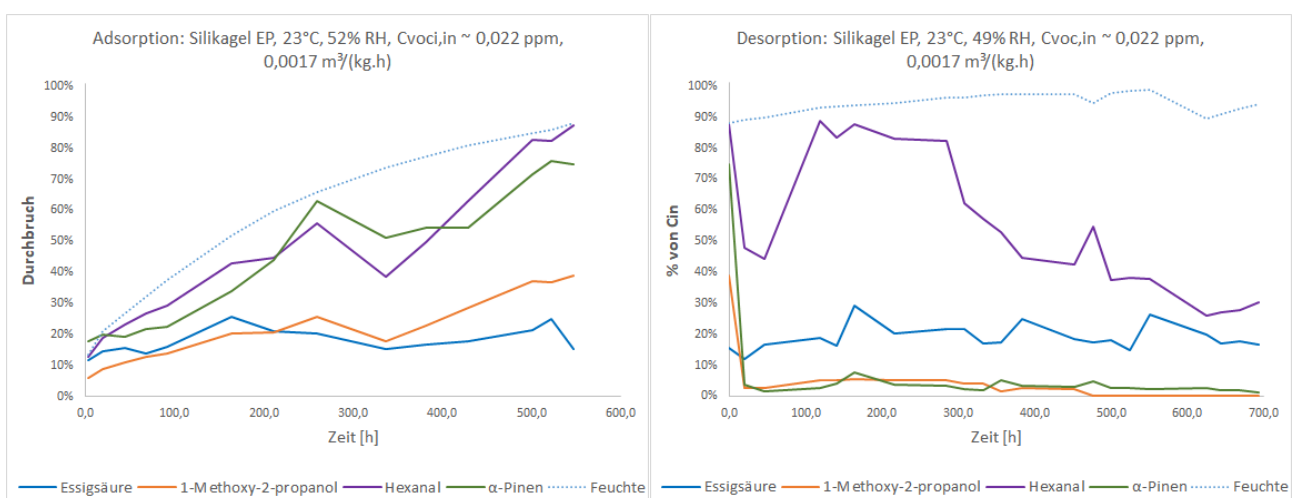


Abbildung 26: Adsorption und Desorption der ausgewählten Substanzen in der Kammerprüfung auf dem Silikagel engporig

Ein besonders deutlicher Unterschied ist bei der Auswirkung auf die relative Luftfeuchtigkeit in den Kammern zu erkennen. Während die Aktivkohle bereits früh mit Wasserdampf gesättigt ist, nimmt das Silikagel weiterhin über die gesamte Adsorptionsphase auch Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit. In Bezug auf die Behaglichkeit in Wohnräumen ist die Luftfeuchtigkeit jedoch ein wichtiger Faktor. Die starke Trocknung der Luft durch das Silikagel könnte daher auf die Behaglichkeit einen negativen Einfluss nehmen.

In Bezug auf die zugegebenen VOC bewies die Aktivkohle über die gesamte Versuchsdauer eine sehr gute Adsorption. Je nach Substanz wurden lediglich 5-25% der zugegebenen Menge nicht gebunden, wobei Hexanal am besten und alpha-Pinen am schlechtesten adsorbiert wurde. Das Silikagel zeigte für die VOC hingegen über die Zeit eine starke Verringerung der Adsorption. Besonders für Hexanal und alpha-Pinen stieg die Durchbruchmenge nahezu kontinuierlich und lag z.B. nach zehn Tagen bereits bei ca. 50% und bei Versuchsende bei etwa 70 bzw. 80% der zugeführten Substanzmenge. Lediglich die Essigsäure wurde annähernd konstant über den gesamten Zeitraum aufgenommen.

Für die grafische Darstellung der Desorptionsversuche wurde als erster Datenpunkt der Endwert der vorhergehenden Adsorptionsversuche verwendet (letzte Messung vor der Beendigung der Substanzzugabe). Der erste Abfall der Messdaten ist daher dadurch bedingt, dass sich erst ein neues Gleichgewicht in der Kammerluft einstellen musste. Besonders die Aktivkohle zeigte eine dauerhafte Bindung der aufgenommenen Substanzmengen. Essigsäure wurde nur im einstelligen Prozentbereich wieder abgegeben, während die gefundenen Mengen der anderen untersuchten VOC vernachlässigbar gering waren. Das Silikagel desorbierte alpha-Pinen und Methoxy-2-propanol ebenfalls nur geringen Mengen wieder. Eine stärkere Wiederabgabe war für die Essigsäure (20-30%) und insbesondere für das Hexanal zu beobachten. Hier wurde insbesondere zu Beginn durch die Desorption sogar wieder 90% der Kammerluftkonzentration erreicht, welche ursprünglich kontinuierlich zugegeben worden war.

Somit wies die untersuchte Aktivkohle gegenüber dem Silikagel insgesamt ein höheres Potential für die effiziente Verringerung der VOC-Konzentrationen in der Raumluft auf. Auch der Effekt, dass beispielsweise Hexanal im Vergleich zu alpha-Pinen durch Aktivkohle stärker aufgenommen wird, könnte helfen, Fehlgerüche im Holzbau gezielt zu reduzieren, und dabei den zumeist positiv assoziierten Nadelholzgeruch (durch Terpene wie alpha-Pinen) in einem gewissen Ausmaß zu erhalten.

3.2.4 Real-Raum Versuche

Die Real-Raum Versuche fanden über einen Zeitraum von 22 Tagen statt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Probenahmetage und die klimatischen Bedingungen direkt während der Luftprobenahmen in den drei Versuchsräumen.

Tabelle 4: Probenahmetage und klimatische Bedingungen in den Zimmern während der Probenahme

Probenahmetag	Datum	Zimmer 2 Aktivkohle Temp; r.F.	Zimmer 3 Referenz Temp; r.F.	Zimmer 4 Silikagel Temp; r.F.
Tag 0 (vor Scavenger-Einbau)	18.02.2020	21°C; 48%	22°C; 45%	21°C; 46%
Tag 7	25.02.2020	20°C; 48%	22°C; 42%	19°C; 41%
Tag 14	03.03.2020	19°C; 46%	22°C; 42%	19°C; 40%
Tag 22	11.03.2020	20°C; 44%	22°C; 41%	20°C; 38%

Abbildung 27 und Tabelle 5 zeigen dazu die Veränderung der gemessenen VOC Konzentrationen als prozentuelle Änderung der Summe an VOC über den Untersuchungszeitraum, wobei die Summe an VOC des ersten Messtages jeweils als Startpunkt (100%) verwendet wird.

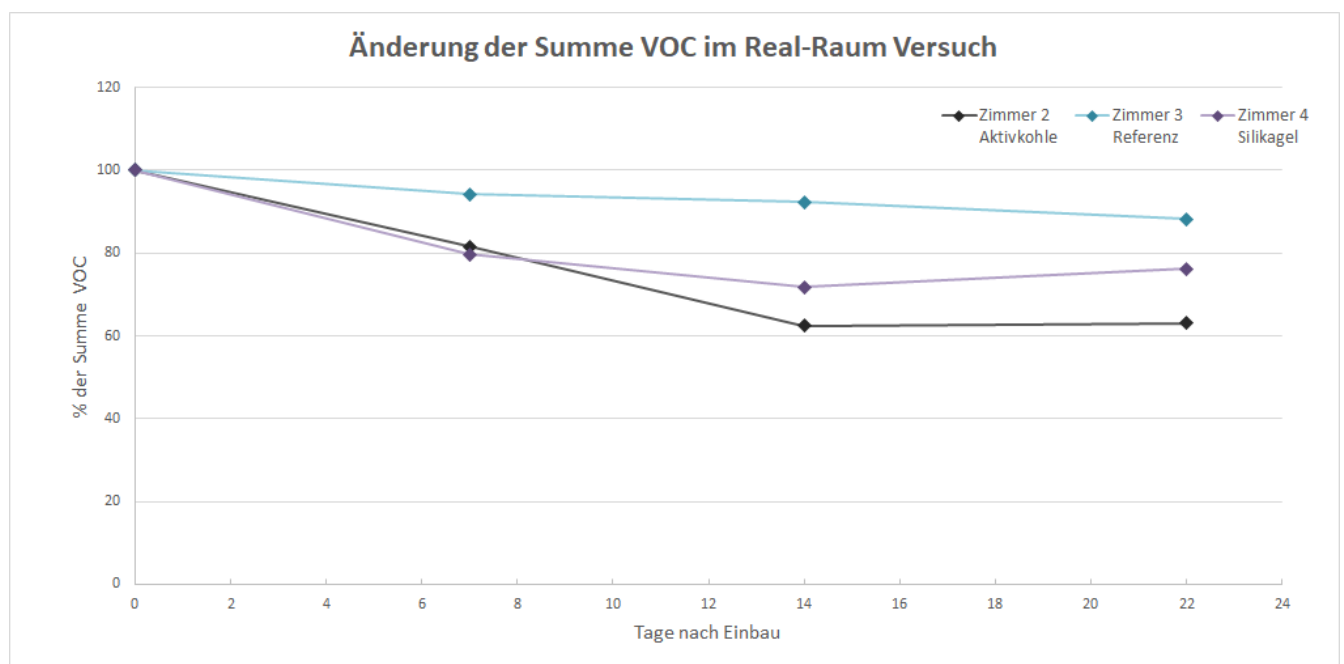


Abbildung 27: Veränderung der Summe der VOC in den Real-Raum Versuchen in % (bezogen auf die ursprünglichen Konzentrationen)

Tabelle 5: Abnahme der Summe an VOC in den Real-Raum Versuchen in %

Zimmer-Nr.	Scavenger-Material	Summe VOC [%]			
		Anfangswert	Tag 7	Tag 14	Tag 22
2	Aktivkohle	100	82	62	63
3	Referenzraum	100	94	92	88
4	Silikagel	100	80	72	76

Wie bereits aus früheren Innenraumluftmessungen von Neubauten bekannt, erfolgt vor allem in den ersten Wochen auch in Räumen ohne Scavenger-Material eine deutliche Abnahme der VOC-Konzentrationen. In diesem Fall kam es im Referenzraum zu einer stetigen Verringerung der Summe an VOC um insgesamt 12%. Im Gegensatz dazu zeigten die Räume in welchen Scavenger-Materialien eingebracht worden waren, besonders in den ersten 14 Tagen, eine steilere Abfallkurve. Die Real-Raum Versuche bestätigen die im Projekt vorangegangenen Kammerprüfungen insofern, dass auch hier die Aktivkohle höhere Adsorptionseffizienz als das Silikagel aufwies. Dann scheinen die Materialien ihre maximale Beladung erreicht zu haben und die Summen an VOC zeigten keine deutliche Abnahme mehr über die nächste Woche. Der in Raum 4 (Silikagel) beobachtete erneute leichte Anstieg der Summe an VOC von Tag 14 auf Tag 22 könnte dabei einerseits auf einen gewissen Grad der Wiederabgabe der Substanzen hinweisen, könnte jedoch auch durch Schwankungen der Umgebungsbedingungen (Luftdruck, Temperatur, Feuchte), oder eine Kombination dieser Effekte, bedingt sein.

Vergleicht man die Ergebnisse der oft als holztypischen Emissionen bezeichneten Terpene und Aldehyde der Räume zueinander, so zeigt sich, dass die Aktivkohle wie in den Kammerprüfungen auch für die Gruppe der Terpene eine deutlich bessere Adsorption als das Silikagel zeigt (siehe Abbildung 28). Nicht mit den Kammerversuchen überein stimmt dagegen die annähernd gleich gute Adsorption der in der Innenraumluft vorhandenen Aldehyde (Abbildung 29).

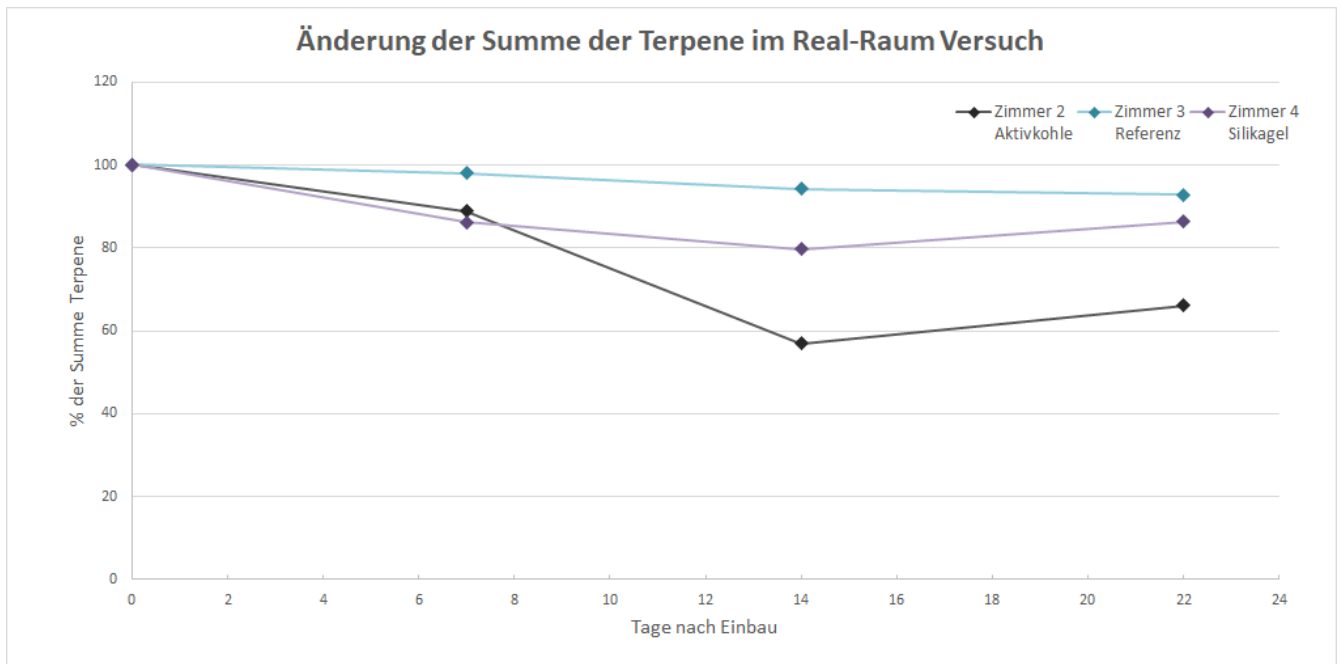


Abbildung 28: Veränderung der Summe der Terpene in den Real-Raum Versuchen in %

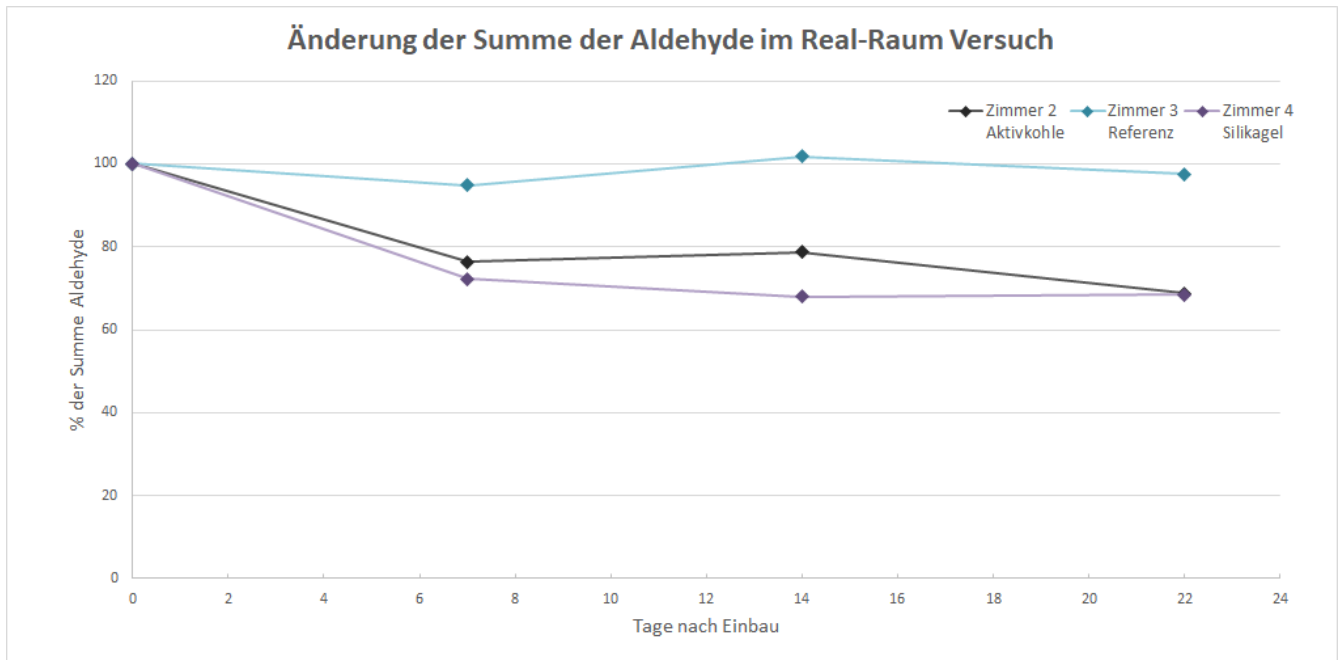


Abbildung 29: Veränderung der Summe der Aldehyde in den Real-Raum Versuchen in %

Die hier eingesetzten Mengen der Scavenger-Materialien werden, aufgrund der relativ kurzen Wirksamkeit von 14 Tagen, wahrscheinlich für den realen Einsatz zur Reduktion von erhöhten VOC-Konzentrationen von Innenräumen wohl zu gering sein. Ein Austausch oder besser eine Regenerierung

des Materials vor erneutem Einsatz wäre anzudenken. Wobei diese Vorgehensweise vor allem beim Einsatz von Aktivkohle aufgrund der aufwendigen Regeneration kostenintensiv ausfallen könnte. Auch eine aktive Luftdurchleitung durch das Material würde die Effektivität mit hoher Wahrscheinlichkeit verbessern.

Im Gesamtvergleich führten die beiden ausgewählten Materialien zwar zu einer Beschleunigung der Verringerung der Innenraumluftkonzentrationen an VOC, jedoch ist die Frage, ob das Ausmaß derselben in normalen Wohnbauten den zusätzlichen Kosten- und Energieaufwand rechtfertigt. Besonders über die ersten Bezugswochen zeigen die hier erhaltenen Daten, dass auch durch normales Stoßlüften eine deutliche Verringerung der Innenraumluftkonzentrationen an VOC erfolgt. Diese initiale Verringerung der VOC-Konzentrationen in den ersten Monaten nach Bezug wurde auch bereits durch frühere Messungen in Neubauten bestätigt [3]. Die Empfehlung eines Einsatzes von Scavenger-Materialien hängt daher stark von den Bedingungen bei Hausbezug ab. Im Falle von Beschwerden aufgrund erhöhter Emissionen ist ihr Einsatz sicher hilfreich. Eine ausreichende Lüftungstätigkeit, entweder durch manuelles Stoßlüften oder durch den Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage, kann jedoch trotzdem nicht ersetzt werden. In bereits länger bezogenen Wohnbauten erfasste Daten, deuten außerdem darauf hin, dass bei fachgerechter Bauweise sowohl bei Häusern aus Holz, als auch in mineralischer Bauweise, keine längerfristige Notwendigkeit zur Verringerung der VOC-Innenraumkonzentrationen besteht. Daher sollte lediglich in Situationen, wo mit Lüftungstätigkeiten nicht die gewünschte Innenraumluftqualität erreicht werden kann, der Einsatz von Scavengern in Erwägung gezogen werden

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „IASca“ wurde untersucht, ob eine Verbesserung der Innenraumluftqualität in bestehenden Wohngebäuden, insbesondere in Objekten in Holzbauweise, notwendig ist und inwieweit Scavenger-Materialien, welche Substanzen aus der Innenraumluft binden können, dafür geeignet wären. 41 Bauten in Holzbauweise und 33 in mineralischer Bauweise wurden untersucht, um eine Aussage zur Innenraumluftqualität in realen österreichischen Wohnräumen treffen zu können. Die Gebäude waren dabei bereits zwischen 3 und 8 Jahre bewohnt und für alle Objekte lagen Messungen aus den ersten Bezugsjahren vor. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass sich die Substanzlevel in den untersuchten Bauweisen nach wenigen Jahren einander angeglichen hatten und in den meisten Gebäuden im Bereich der durchschnittlichen bzw. der niedrigen Konzentrationen von VOC in der Innenraumluft lagen. Auch die toxikologische Bewertung der Ergebnisse der Innenraumluftmessungen zeigte im Vergleich kein gesteigertes gesundheitliches Risiko und damit die Unbedenklichkeit des Holzbaus auf.

Anhand der im Projekt durchgeführten Versuche zu Scavengern wurden zwei Materialien ausgewählt, welche für die Adsorption der in der Innenraumluft vorkommenden VOC geeignet schienen und genauer auf ihre Eigenschaften untersucht. Es handelte sich dabei um Aktivkohle und ein Silikagel. Die Ergebnisse belegen für beide Scavenger-Materialien die Wirksamkeit bei der Reduktion der Summe an VOC in der Raumluft. Ihr Einsatz ist jedoch mit einem gewissen Zeitaufwand und natürlich auch mit einigen Kosten verbunden. Zu beachten ist auch, dass die notwendigen Mengen an Scavenger, die für die deutliche Verringerung der Substanzkonzentration benötigt werden, recht hoch sind. Es ist daher fraglich ob sich der zusätzliche Aufwand immer lohnt, da besonders über die ersten Bezugswochen eines Gebäudes auch durch normales Lüften eine deutliche Senkung der anfänglich erhöhten VOC-Innenraumluftkonzentrationen erfolgt. Auch die Untersuchungen zur Innenraumluftqualität von Bestandsgebäuden gaben keinen Hinweis darauf, dass beim Einsatz von Holz als Baustoff die Verwendung von Scavengern notwendig wäre. Wenn jedoch übliche Lüftungstätigkeiten alleine nicht ausreichen, bzw. auch in den seltenen Fällen, in denen eine ausreichende Lüftung nicht möglich ist und dadurch Beschwerden bei BewohnerInnen auftreten, kann der Einsatz von Scavenger-Materialien hilfreich sein.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Wallner P., Munoz U., Tappler P., Wanka A., Kundi M., Shelton J.F., Hutter H.P., „Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings“. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(11):14132–14147, doi:10.3390/ijerph121114132.
- [2] Wallner P., Tappler P., Munoz U., Damberger B., Wanka A., Kundi M., Hutter H.P., „Health and Wellbeing of Occupants in Highly Energy Efficient Buildings: A Field Study“. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(3):314, doi:0.3390/ijerph14030314.
- [3] Fürhapper C., „Endbericht Wood2New: Konkurrenzfähige Materialien aus Holz für den Innenbereich. Endbericht AP3-Innenraum,“ Holzforschung Austria, Wien, 2017.
- [4] Fürhapper C., Habla E., Stratev D., Weigl M., Dobianer K., „Living Conditions in Timber Houses. Emission Trends and Indoor Air Quality“. *Front. Built Environ.*, 2020, 5:151. doi: 10.3389/fbuil.2019.00151.
- [5] Fürhapper C., Habla E., Stratev D., Weigl M., „Wohnen im Holzbau - Bewertung von Raumluftqualität, Toxikologie und gesundheitlichen Aspekten,“ *Umwelt, Gebäude & Gesundheit, "Neu"- und Altlasten, Innenraumhygiene, Gerüche; Ergebnisse des 12. Fachkongresses am 17. und 18. Oktober 2019 in Hallstadt bei Bamberg*, pp. 59-71, 2019.
- [6] ÖNORM EN ISO 16000-1: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie (ISO 16000-1:2004).
- [7] ÖNORM EN ISO 16000-2: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 2: Probenahmestrategie für Formaldehyd (ISO 16000-2:2004).
- [8] DIN ISO 16000-3: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern - Probenahme mit einer Pumpe (ISO 16000-3:2011).
- [9] ÖNORM EN ISO 16000-5: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC) (ISO 16000-5:2007).
- [10] DIN ISO 16000-6: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID (ISO 16000-6:2011).

- [11] ÖNORM ISO 16000-17: Innenraumluchtverunreinigungen - Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Kultivierungsverfahren (ISO 16000-17:2008 + Cor 1:2009).
- [12] ÖNORM ISO 16000-18: Innenraumluchtverunreinigungen - Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Probenahme durch Impaktion (ISO 16000-18:2011 + Cor 1:2011).
- [13] Arbeitskreis Innenraumlucht im BM für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Bewertung der Innenraumlucht. Flüchtige organische Verbindungen - VOC Summenparameter. In Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlucht,“ Wien, 2005.
- [14] WHO, „Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No 91.,“ World Health Organisation (WHO), Regional Office for Europe, Copenhagen, 2000.
- [15] Arbeitskreis Innenraumlucht im BM für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Schimmelleitfaden,“ 2019.
- [16] Ware J.E. Jr., Sherbourne C.D., „The MOS 36-item short form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection,“ *Med.Care*, 1992, 30, 473-483, doi: 10.1097/00005650-199206000-00002.
- [17] Hauck H., Berner A., Frischer T., Gomiscek B., Kundi M., Neuberger M., Puxbaum H., Preining O., „AUHEP - Austrian Project on Health Effects of Particulates - General Overview,“ *Atmos. Environ.*, 2004, 38, 3905-3915, doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.080.
- [18] Arbeitskreis Innenraumlucht im BM für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlucht – Richtlinienenteil Alpha-Pinen. In Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlucht,“ Wien, 2020.
- [19] Ad-hoc Arbeitsgruppe der Kommission Innenraumlufthygiene und Oberste Landesgesundheitsbehörde, „Richtwerte für Acetaldehyd in der Innenraumlucht,“ Bundesgesundheitsblatt 56:1434-1447, 2013.
- [20] H.-P. Hutter, H. Moshhammer, K. Lemmerer und P. Wallner, „Bericht Indoor Air Scavenger 3.0: Toxikologische Bewertung,“ Medizinische Universität Wien, 2020.
- [21] H.-P. Hutter, H. Moshhammer, K. Lemmerer und P. Wallner, „Bericht Indoor Air Scavenger 3.0: Medizinisch-epidemiologischer Endbericht,“ Medizinische Universität Wien, 2020.
- [22] ÖNORM M 5700-2: Messen von Innenraumlucht-Verunreinigungen - Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen - Teil 2: Aktive Probenahme durch Anreicherung auf Aktivkohle - Lösemittelextraktion (2002).

- [23] Stratev D., Habla E., Fürhapper C., Weigl M., „Gezielte Beeinflussung der Innenraumluftqualität durch Sorptionsmaterialien,“ *Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft, Schriftenreihe zum Schutz von Gesundheit und Umwelt bei baulichen Anlagen, Sonderband der WaBoLu-Innenraumtag 2020*, pp. 31-50, 2020.
- [24] ÖNORM EN 16516: Bauprodukte: Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft (2021).

Bildrechte:

Bild am Cover „moderner Essraum“ © Clipdealer/A:84409920/runna

Alle anderen Bilder und Grafiken © Holzforschung Austria