

Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein

Teil 6: Auswertung von Beschwerdefällen der Jahre

2002 bis 2011



Herausgeber:
Ministerium für Soziales, Gesundheit,
Wissenschaft und Gleichstellung
des Landes Schleswig-Holstein
Adolf-Westphal-Str. 4
24143 Kiel

in Zusammenarbeit mit dem
Landesamt für soziale Dienste
des Landes Schleswig-Holstein
Brunswiker Str. 4
24105 Kiel

Ansprechpartnerin:
Gudrun Petzold
Tel. 0431/988-5421
Foto: www.grafikfoto.de
ISSN 0935-4379

Juli 2015

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der schleswig-holsteinischen Landesregierung herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Personen, die Wahlwerbung oder Wahlhilfe betreiben, im Wahlkampf zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Landesregierung im Internet:
www.landesregierung.schleswig-holstein.de

Inhalt

Kurzfassung	5
Verzeichnis der Abkürzungen und Fachbegriffe	6
1 Einleitung	7
2 Untersuchungsmethoden	8
2.1 Probenahme	8
2.2 Analytik	9
2.3 Auswertung	9
2.4 Auswahl der Objekte und Ergebnismitteilung	9
3 Allgemeine Angaben	10
4 Auswertung der VOC-Messungen	11
5 Raumlufthygienische Bewertung der Proben	17
5.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen	17
5.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept	19
6 Einflussfaktoren für die VOC-Belastung	21
6.1 Gebäudecharakteristika	21
6.2 Lüftung	21
6.3 Renovierungsmaßnahmen	22
6.4 Feuchtigkeit der Räume	23
6.5 Subjektive Einschätzung der Räumlichkeiten durch die Nutzenden	25
7 Auswertungen zu Gerüchen	25
7.1 Geruch und VOC-Konzentration	25
7.2 Geruchsleitwerte	28
7.3 Geruch und Schimmelpilzwachstum	31
7.4 Geruch und Gesundheitsbeschwerden	31
8 Auswertungen zu Gesundheitsbeschwerden	32
8.1 Häufigkeit von Gesundheitsbeschwerden	32
8.2 Gesundheitsbeschwerden und Angaben zu den Raumverhältnissen	33
8.3 Gesundheitsbeschwerden und VOC-Exposition	34
9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	39
10 Literatur	40
Anhang	42
A1 Fragebögen	42
A2 Kurzbeschreibung der Labormethode zur VOC-Messung mittels GC-FID	46
A3 Statistische Kenngrößen für die häufigsten VOC	47
A4 Statistische Kenngrößen für Proben unter Nutzungs- und unter Ausgleichsbedingungen	50
A5 Richtwerte der Ad-hoc-AG und Definition der TVOC-Stufen	52
A6 Häufigkeit der Angabe von Geruch bei unterschiedlichen Konzentrationen ausgewählter VOC	55
A7 Vorläufige Geruchsleitwerte	56
A8 Überschreitungen von Geruchsleitwerten	57

Kurzfassung

Dem Dezernat „Umweltbezogener Gesundheitsschutz“ des Landesamtes für soziale Dienste Schleswig-Holstein (LAsD) liegen aus Schulen, Kindergärten und Büroarbeitsplätzen zahlreiche Raumluftmessungen auf flüchtige organische Schadstoffe (VOC) aus Beschwerdefällen vor. Im vorliegenden Bericht wurden 1897 dieser Untersuchungen aus den Jahren 2002 bis 2011 ausgewertet.

Bei der Auswertung wurden die VOC-Belastungsprofile dieser Beschwerdefälle mit Ergebnissen früherer Studien verglichen und die Messwerte an Hand von Richt- und Leitwerten für die Innenraumluft gesundheitlich und hygienisch bewertet. Im Rahmen der Luftmessungen wurden mittels Fragebogen Charakteristika der Liegenschaften und Räume sowie Beschwerden der Nutzer erfasst. Es wurde versucht, Zusammenhänge zwischen VOC-Konzentrationen einerseits und Quellen sowie Gesundheitsbeschwerden und Geruchsbelästigungen andererseits herauszuarbeiten.

Die wichtigsten VOC-Stoffgruppen in der Raumluft der Beschwerdefälle waren Alkohole, Alkane, Aromaten und Terpene. Die statistischen Kennwerte der Konzentrationen der meisten VOC lagen etwas über den üblichen Hintergrundwerten. Über die Jahre 2002 bis 2011 sind bei einigen Stoffen Veränderungen der Nachweishäufigkeit feststellbar, die auf die Weiterentwicklung der Bauprodukte zurückzuführen sind.

Die Gesamtbelastung mit VOC (TVOC) war insgesamt gering. Lediglich 0,8 % der 534 unter Nutzungsbedingungen entnommen Proben fielen in die TVOC-Stufe 3 („hygienisch auffällig“) oder schlechter. Bezieht man auch die Proben unter Ausgleichsbedingungen ein, waren es 3,5 %. In den 534 Proben unter Nutzungsbedingungen wurden 66 Richtwert-I-Überschreitungen und 2 Richtwert-II-Überschreitungen festgestellt. Dies entspricht rund 13 % der Proben. Bezieht man auch die Proben unter Ausgleichsbedingungen ein, so steigt der Anteil der Beanstandungen auf 25 %.

Für verschiedene geruchsintensive VOC ergaben sich plausible Korrelationen zwischen der Häu-

figkeit von Geruchsbeschwerden und der VOC-Konzentration, zum Beispiel für Hexanal, während andere Stoffe wie Limonen oder Alkane in den gemessenen Konzentrationen nicht zu vermehrten Geruchsbeschwerden geführt haben. In anderen Fällen lässt sich die Plausibilität des Anstiegs der Beschwerdehäufigkeit mit der Konzentration wegen fehlender verlässlicher Geruchsschwellenwerte nicht verifizieren. Insgesamt lagen bei 55% der Proben Geruchsbeschwerden vor, von denen sich der weit überwiegende Teil mit den gemessenen Stoffen nicht plausibel erklären lässt.

Die bisher von der Ad-hoc-AG abgeleiteten vorläufigen Geruchsleitwerte wurden an Hand der Daten auf ihre Eignung geprüft. Die vorläufigen Geruchsleitwerte erwiesen sich grundsätzlich als brauchbarer Maßstab für die Bewertung einer Geruchsbelästigung. Eine Häufung von Geruchsbelästigungen trat ab einer Konzentration eines Stoffes in Höhe des sogenannten vorläufigen Geruchsleitwertes I (vGLW I, „geruchlich auffällig“) auf. Konzentrationen in dieser Höhe werden in den realen Proben selten erreicht, die vorgeschlagenen vGLW I nur zu einem geringen Prozentsatz ausgeschöpft. Die wenigen bisher vorliegenden vGLW vermögen nur einen geringen Teil der Geruchsbeschwerden zu erklären, so dass vGLW für weitere geruchsaktive Stoffe wünschenswert wären. Es wird aber auch die Limitierung des Modells, welches die Hedonik, also den Charakter des Geruchs, nicht betrachtet, deutlich. So wurden Limonenkonzentrationen oberhalb des GLW I offenbar nicht als belästigend empfunden.

Statistisch signifikante und medizinisch plausible Zusammenhänge zwischen VOC-Konzentration und dem Auftreten von Gesundheitsbeschwerden waren nicht erkennbar. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass trotz der insgesamt großen Probenzahl nur sehr wenige Proben mit hoher, gesundheitlich relevanter VOC-Belastung vorlagen. Es wurde deutlich, dass ein erheblicher Teil der Gesundheitsbeschwerden der Nutzerinnen und Nutzer nicht mit den gemessenen VOC erklärbar war.

Verzeichnis der Abkürzungen, Einheiten und Fachbegriffe

Ausgleichsbedingungen: (auch „worst-case“) Messung unter ungünstigsten Rahmenbedingungen: z.B. Fenster und Türen mindestens 8 Stunden vor und während der Messung geschlossen.

BG: Bestimmungsgrenze - geringste mit dem gewählten Verfahren bestimmbare Konzentration.

Box-Plot: (auch Box-Whisker-Plot oder Kastengrafik) grafische Darstellung der Verteilung von Daten mittels einheitlicher Streuungs- und Lagemaße (Median und Perzentile, Ausreißer).

CAS-Nr.: Internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe.

Emission: Abgabe Luft verunreinigender Stoffe in die Umgebung.

k. A.: keine Angabe.

KI: Konfidenzintervall, Vertrauensbereich der Lageschätzung eines Parameters.

Median: (auch 50-stes Perzentil, P50, Zentralwert) statistische Kenngröße. Der Wert, der von der Hälfte der Werte über-, von der anderen Hälfte der Werte unterschritten wird.

MW: Arithmetischer Mittelwert einer Gruppe von Werten.

NB: Messung unter Nutzungsbedingungen, wie unter üblicher Nutzung und Lüftung.

NL: Normliter, Luftvolumen bezogen auf eine Lufttemperatur von 0°C und einen Luftdruck von 1013 Hektopascal.

OR: Odds Ratio (auch Quotenverhältnis), statistische Maßzahl über die Stärke eines Zusammenhangs von zwei Merkmalen.

Perzentil: (auch Prozentrang) statistische Kenngröße, die von der angegebenen Prozentzahl der Werte unter-, von den übrigen Werten überschritten wird. In dieser Arbeit verwendet: P50, P75, P90, P95.

Referenzwert: Bezugsgröße zur Einordnung eines Messwertes im Vergleich zu anderen Messungen. Üblicherweise wird als Referenzwert derjenige Wert benutzt, unterhalb dessen 95 % aller Messwerte von üblichen Proben liegen (95 Perzentil).

RW I / RW II: Richtwert I (= Zielwert), Richtwert II (= Eingriffswert); Konzentrationswerte für flüchtige Schadstoffe in der Innenraumluft; mit empfehlendem Charakter.

TVOC: Total Volatile Organic Compounds (englisch) - Gesamtmenge flüchtiger organischer Verbindungen in Siedebereich von n-Hexan bis n-Hexadecan.

VOC: Volatile Organic Compounds (englisch) - flüchtige organische Verbindungen.

mg/m³: Konzentrationsangabe in Tausendstelgramm pro Kubikmeter (entspricht pro 1000 Liter).

µg/m³: Konzentrationsangabe in Millionstel Gramm pro Kubikmeter (entspricht pro 1000 Liter).

l/min: Volumenstrom in Litern pro Minute .

°C: Temperaturangabe in Grad Celsius.

1. Einleitung

In Schleswig-Holstein hat das Landesamt für soziale Dienste (LAsD) die Aufgabe, für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz Sorge zu tragen (Dezernat 34 „Umweltbezogener Gesundheitsschutz“). Ein Schwerpunkt ist die Problematik von Schadstoffen und gesundheitlichen Beschwerden in Innenräumen ohne Gefahrstoffumgang und die toxikologische Bewertung der Innenraumluftqualität.

Im Falle von Nutzerbeschwerden werden Messungen vorgenommen und die örtlichen Gesundheitsbehörden, der Arbeitsschutz und die Gebäudeverwaltung beraten. Das LAsD führt aber auch regelmäßig Studien durch, mit denen spezielle Fragen beleuchtet werden sollen. Beispielsweise über die Raumluftqualität in Schulen, in Containnerklassen, in Neubauten für Schulen und Kindergärten oder in Altenheimen [1]. Anhand der Daten konnten Vergleichswerte (Referenzwerte) für Luftschadstoffe für Schulen und Kindergärten erstellt werden. Die Untersuchungsprogramme leisten darüber hinaus sowohl zur Erkennung der Ursachen von Schadstoffbelastungen wie auch zur Vorsorge wichtige Beiträge. Sie geben Hinweise für Pflege, Renovierung, Sanierung und Neuplanung (ökologisches Bauen) von Häusern und Wohnungen.

Häufig klagen Nutzerinnen und Nutzer im Zusammenhang mit dem Aufenthalt in Innenräumen über Befindlichkeitsstörungen, deren Ursache nicht klar ersichtlich ist. Im Rahmen einer umfassenden Bewertung ist zu klären, ob chemische Einflüsse für die Beschwerden verantwortlich sein können. Daneben können auch physikalische Einflussfaktoren oder psychische Faktoren wie Stress bei der Arbeit die Ursache sein [2]. Diese sind nicht Gegenstand dieses Berichtes. Auch Arbeitsplätze mit Gefahrstoffumgang werden nicht betrachtet, da deren Überwachung eine Aufgabe des Arbeitsschutzes, nicht des Gesundheitsschutzes ist.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Raumluftqualität in „Beschwerdefällen“, d.h. der

Auswertung von Untersuchungen in Innenräumen, die aufgrund von Gesundheitsbeschwerden, vermuteten Schadstoffbelastungen oder im Zusammenhang mit Geruchsauffälligkeiten in den letzten Jahren durchgeführt wurden. Haben sich Verdachtsmomente auf luftgetragene Verunreinigungen ergeben, so wird die Durchführung von Messungen allgemein empfohlen. Diese Messungen dienen dem Ziel, die Art, die Höhe und den Umfang der Exposition festzustellen, um auf dieser Grundlage über die Notwendigkeit von Maßnahmen zu entscheiden. Unter „Beschwerdefälle“ in diesem Bericht sind solche Messungen in fast ausschließlich öffentlichen Gebäuden zusammengefasst, die auf Veranlassung und im Auftrag der Gesundheitsbehörden der Kreise und Kreisfreien Städte, der Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR (GMSH), der Unfallkasse Nord (UK-Nord) oder, seltener, auf Initiative der Träger selbst durchgeführt wurden¹⁾.

Die Probennahme erfolgte in der Regel durch die Auftraggeber. Es wurden nur solche Messungen einbezogen, die mittels Adsorption auf Aktivkohle und nachfolgender Desorption mit CS₂ gewonnen wurden. Die Analyse erfolgte mit Gaschromatographie mit Flammenionisationsdetektion.

Im Unterschied zu den in den vorherigen Berichten dargestellten Untersuchungen [1], deren Räume im Rahmen von Studien gezielt durch das LAsD ausgewählt wurden, sind die hier zusammengestellten Fälle durch Initiative von außen und eine „subjektive“ Auswahl zustande gekommen. Sie sind deshalb sehr heterogen und nicht für die Ableitung von Referenzwerten geeignet.

Der große Datenumfang von nahezu 1897 Untersuchungen auf VOC aus den Jahren 2002 bis 2011 mit den zugehörigen Fragebögen bietet die Möglichkeit zu prüfen, ob Gesundheitsbeschwerden, die oft aktueller Anlass für die Überprüfung der Raumluftqualität waren, mit gemessenen Schadstoffgehalten im Zusammenhang stehen könnten.

1) Die Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR nimmt die staatlichen Bauherren- und Planungsaufgaben für Land und Bund in Schleswig-Holstein wahr. Zudem ist sie zuständig für die Bewirtschaftung der vom Land genutzten Liegenschaften. Die Unfallkasse Nord ist die gesetzliche Unfallversicherung für den öffentlichen Dienst in Schleswig-Holstein und Hamburg.

2. Untersuchungsmethoden

2.1 Probenahme

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der örtlichen Gesundheitsbehörden, der GMSH, der UK-Nord oder des LAsD haben die 1897 Luftproben zwischen 2002 und 2011 im Rahmen ihrer jeweiligen Zuständigkeiten genommen. Gleichzeitig wurden Daten zu den Gebäuden und Räumen und zu den Beschwerden der Nutzer erhoben und mittels Fragebogen (Anhang 1) dokumentiert. Die Probenahme erfolgte in 61 % (n = 1158) der Fälle unter Ausgleichsbedingungen („worst case“, d.h. letzte Lüftung mindestens 8 Stunden zurückliegend) und zu 28 % (n = 534) unter Nutzungsbedingungen (NB), d.h. die Räume wurden wie üblich genutzt und gelüftet. Bei 11 % der Proben fehlen die entsprechenden Angaben.

Für Messungen unter Nutzungsbedingungen, d.h. unter Berücksichtigung der Lüftungsemp-

fehlungen werden nach vorangegangener intensiver Lüftung (drei Minuten im Winter, bis 10 Minuten im Sommer) die Fenster und Türen geschlossen¹⁾. Die Messung erfolgt nach einer Stunde. Bei Langzeitmessungen von mehr als einer Stunde Dauer wird die Probenahme unter Einhaltung der empfohlenen Raumlüftung [3] bei üblicher Nutzung durchgeführt. Die auf diese Weise erhaltenen Messergebnisse sind zum Vergleich mit Richtwerten [4] geeignet.

Für Messungen unter Ausgleichsbedingungen wird der Raum zunächst gründlich gelüftet und anschließend mindestens 8 Stunden lang, in der Regel über Nacht, geschlossen gehalten. Die Probenahme erfolgt im Anschluss im ungelüfteten Raum [5].

Tabelle 1: Probenahmebedingungen und -technik der ausgewerteten Messungen

Probenahmeart	Ausgleichsbedingungen (n=1158)		Nutzungsbedingungen (n=534)		keine Angabe (n = 205)	
	aktiv	passiv	aktiv	passiv	aktiv	passiv
Anzahl (n)	1152	6	244	290	167	38
Prozent	99,5	0,5	45,7	54,3	81,5	18,5

Die VOC-Probenahme erfolgte entweder aktiv durch Luftpumpen mit einem Luftvolumen von 400 – 500 Normlitern bei 2 Liter/Minute oder durch Passivsammler, in der Regel Typ ORSA, über einen Zeitraum von mindestens 7 Tagen. Adsorptionsmedium waren Aktivkohle oder synthetischer Kohlenstoff. Die Probenahmebedingungen und -technik der ausgewerteten Proben

Normliter (NL) - 1 Mol = 22,4 L

- Normbedingungen (STP): p = 1013 hPa, T = 273,15 K (0° C)

MAK-Liter (ML) - 1 Mol = 24,1 L

- Normalbedingungen: p = 1013 hPa, T = 293,15 K (20° C)

Betriebsliter (L)

- ATP-Bedingungen: Ambient Temperature and Pressure – tatsächliche Lufttemperatur und Luftdruck

Durch den Bezug auf Normliter (NL) sind die angegebenen Messwerte im Unterschied zu Betriebslitern theoretisch um 10 % höher, was noch

sind in Tabelle 1 zusammengestellt. 1563 der insgesamt 1897 Proben wurden aktiv entnommen, 334 passiv.

Konventionelle Pumpensysteme können die gezogenen Volumina unterschiedlich angeben. Allgemein kann unterschieden werden:

im Bereich einer akzeptablen Gesamtmessunsicherheit (< 30 %) liegt.

¹⁾ Bei einer Messdauer von bis zu 1 h soll der Raum weiterhin geschlossen bleiben.

2.2 Analytik

Die auf Aktivkohle gesammelten VOC wurden mittels Schwefelkohlenstoff desorbiert und nach gaschromatographischer Trennung mittels Flammenionisationsdetektor (GC-FID) bestimmt. Details sind in Anhang 2 beschrieben. Die Be-

stimmungsgrenze beträgt bei dem angegebenen Probenahmevolumen für die einzelnen VOC circa $0,5 - 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.3 Auswertung

Statistische Auswertungen erfolgten mit den Programmen PSPP, SPSS und Microsoft Excel. Vergleiche von Raumluftkonzentrationen wurden mit verteilungsfreien Statistikmethoden vorgenommen. Die Ergebnisse werden im Bericht anhand der Verteilungen der Messwerte vereinfacht tabellarisch oder graphisch mittels der Kennzahlen (Median, Perzentile) präsentiert.

Die hygienische und gesundheitliche Bewertung der VOC und des Gesamtgehaltes an flüchtigen Luftschadstoffen (TVOC) erfolgte anhand der Richtwerte und Kategorien der Ad-hoc-Arbeitsgruppe¹⁾ [4, 5, 6, 7].

2.4 Auswahl der Objekte und Ergebnismitteilung

Die Objekte wurden aufgrund von externen Anfragen, in der Regel der örtlichen Gesundheitsbehörden, der GMSH, der UK Nord oder der Träger der Einrichtung, wegen Verdacht auf Schadstoffbelastungen, Geruchsbelästigungen und/oder Beschwerden der Raumnutzerinnen und -nutzer beprobt. Es handelt sich zu über 95 % um Räume in öffentlichen Gebäuden, Schulen, Kindergärten, Verwaltungsgebäuden. In Fällen von besonderem allgemeinem Interesse werden ausnahmsweise auch Privathäuser untersucht. Zu nennen sind

hier unter anderem besondere Bauweisen (Holzbauten) oder besondere Bautechniken (Auschäumen von zweischaligem Mauerwerk zur Wärmeisolierung). Die individuellen raumbezogenen Ergebnisse mit einer Bewertung stellte das LASD den jeweiligen Auftraggebern oder Einrichtungen zur Verfügung. Bei auffälligen Messwerten erfolgten in der Regel Beratungen für die Raumnutzerinnen und -nutzer sowie gegebenenfalls Nachkontrollen.

¹⁾ Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe („Ad-hoc-AG“) besteht aus Fachleuten der Innenraumluftkommission und der Arbeitsgruppe Innenraumluft der Länderarbeitsgruppe Umweltbezogener Gesundheitsschutz (LAUG) der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Sie wurde mit Mandat der Gesundheitsministerkonferenz im Dezember 1993 ins Leben gerufen, um Verunreinigungen der Innenraumluft quantitativ zu bewerten und bundeseinheitliche Richtwerte für die Innenraumluft festzusetzen. Im Jahr 2015 wurde die Arbeitsgruppe umbenannt in „Ausschuss für Innenraumluftrichtwerte“, AIR. Im weiteren Text wird die alte Bezeichnung Ad-hoc AG verwendet, da die hier genutzten Richt- und Leitwerte, Konzepte und Empfehlungen unter diesem Namen veröffentlicht worden sind.

3 Allgemeine Angaben

Insgesamt wurden die Daten von 1897 Raumluftuntersuchungen ausgewertet. Diese stammen aus 1866 Räumen in 714 Gebäuden. Die Charakteristika der Räume sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Das älteste Gebäude soll etwa auf

das Jahr 1500 zurückgehen, die neuesten Gebäude stammen aus dem Jahr 2010. Der Median für alle Gebäude lag bei Baujahr 1965 (bei Angabe „Altbau“ 1960, bei Angabe „Neubau“ 2000).

Tabelle 2: Charakteristika der untersuchten Räume/Proben (N = 1897)

Gebäudeart	Anzahl (%)	Raumausstattung	Anzahl (%)
Altbau	1412 (74%)	Boden	
Neubau	188 (10%)	Teppichboden	1054 (56%)
Steinhaus	1197 (63%)	verklebt	987 (52%)
Holzhaus	20 (1%)	nicht verklebt	48 (3%)
Fertighaus	43 (2%)	Kunststoffboden	246 (13%)
Niedrigenergiehaus	11 (0,6%)	Linoleum	195 (10%)
Hauptverkehrsstraße: Ja	461 (24%)	Fliesen-, Steinboden	48 (3%)
Hauptverkehrsstraße: Nein	1309 (69%)	Naturfaser	34 (2%)
		Holzboden, Dielen	292 (15%)
		geölt, gewachst	188 (10%)
		lackiert	36 (2%)
		Wände	
		Putz	1034 (55%)
		Rauhfaser	408 (22%)
		Holzverkleidung	213 (11%)
		imprägniert	81 (4%)
		Kunststofftapete	121 (6%)
		Papiertapete	74 (4%)

Lediglich 11 Proben stammten aus Gebäuden, für die angegeben wurde, dass sie einem Niedrigenergiestandard entsprächen. Dieses Merkmal war nicht weiter definiert. Die Zahl legt aber nahe, dass öffentliche Gebäude mit über die Energieeinspar-Verordnung hinausgehender Energieeffizienz eine Ausnahme darstellen.

Die Lüftung erfolgte fast ausschließlich über Fenster, nur 72 Proben wurden in Räumen mit einer raumluftechnischen Anlage genommen.

Rund die Hälfte aller Räume waren mit Teppichböden ausgestattet, ein Viertel mit wischbaren Fußbodenbelägen (Linoleum, PVC, Fliesen).

4 Auswertung der VOC-Messungen

Die VOC-Analytik des LAsD erfasst 280 unterschiedliche Verbindungen von denen 206 in der Raumluft vorkamen, viele jedoch nur selten oder sogar nur einmal. Auf die häufigsten 62 VOC entfallen 95 % der Nachweise. Dies entspricht den Erfahrungen aus früheren Untersuchungsreihen. Die passive Probenahme mit Sammlern ORSA (Fa. Dräger) erweist sich dabei als deutlich unempfindlicher als die aktive Probenahme. So wurden bei aktiver Probenahme durchschnittlich 33 verschiedene VOC in einer Probe nachgewiesen, bei passiver Probenahme mit ORSA lediglich 14 VOC. Dies ist bei der Betrachtung der folgenden Tabellen zu berücksichtigen. Insbesondere dienen die dargestellten Kenngrößen nicht als allgemeine Referenz, sondern beschreiben lediglich die Gesamtheit der hier ausgewerteten Proben.

Die Tabellen 3 und 4 zeigen statistische Kennwerte für die 139 VOC, die mindestens vier Mal

nachgewiesen wurden und für die Summe ausgewählter Stoffklassen. Dabei wurden nur Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze berücksichtigt. Die Auswertung bei Einbeziehung auch der Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze findet sich in Anhang 3. In Anhang 4 sind ergänzend die Mediane und 95. Perzentile für Proben unter Nutzungs- und unter Ausgleichsbedingungen gegenübergestellt.

Ein direkter Vergleich mit den Konzentrationen aus der schleswig-holsteinischen Schul- und Kindergartenstudie und anderen Berichten [8, 9,10] ist mit Vorbehalt vorzunehmen, weil die Probenahmebedingungen (Ausgleichs- oder Nutzungsbedingungen) sich unterscheiden und die vorliegenden Messungen anlassbezogen erfolgten [4]. Dies kann grundsätzlich zu unterschiedlichen statistischen Kennwerten der VOC-Konzentrationen führen.

Tabelle 3: Statistische Kenngrößen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) für die häufigsten VOC, aktive und passive Probenahme, nur Werte > BG

Bezeichnung	CAS-Nr.	n	% > BG	MW	Median	P95	Max
Alkane, Cycloalkane							
n-Hexan*	110-54-3	1196	63	7	3	8	3694
n-Heptan	142-82-5	1852	98	4	1	10	609
n-Octan	111-65-9	759	40	5	1	10	596
n-Nonan	111-84-2	637	34	14	2	62	508
n-Decan	124-18-5	1163	61	23	2	56	2411
n-Undecan	1120-21-4	1235	65	22	2	49	2541
n-Dodecan	112-40-3	1234	65	10	2	19	1263
n-Tridecan	629-50-5	850	45	5	1	9	1100
n-Tetradecan	629-59-4	1126	59	2	1	5	260
n-Pentadecan	629-62-9	917	48	2	1	4	130
n-Hexadecan	544-76-3	1026	54	1	1	3	25
n-Heptadecan	629-78-7	564	30	1	1	2	22
n-Octadecan	593-45-3	102	5,4	1	1	2	11
n-Nonadecan	629-92-5	5	0,3	5	5	8	8
n-Eicosan	112-95-8	4	0,2	5	3	13	13
3-Methylhexan*	589-34-4	225	12	9	4	36	94
2,3-Dimethylpentan*	565-59-3	86	4,5	7	4	20	108
2,4-Dimethylpentan*	108-08-7	20	1,1	8	3	52	53
2,3,4-Trimethylpentan*	565-75-3	276	15	4	4	10	20
4-Methylheptan*	589-83-7	4	0,2	74	5	284	284
2,2,4-Trimethylpentan*	540-84-1	36	1,9	6	4	22	41
Methylnonan*	34464-38-5	10	0,5	14	8	75	75
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	13475-82-6	194	10	19	7	79	96
Heptamethylnonan*	34464-38-5	86	4,5	12	5	59	84
Cyclohexan	110-82-7	865	46	7	2	17	430

Bezeichnung	CAS-Nr.	n	% > BG	MW	Median	P95	Max
Methylcyclopentan	96-37-7	515	27	3	1	9	187
Methylcyclohexan	108-87-2	726	38	6	1	14	664
Ethylcyclohexan*	1678-91-7	34	1,8	18	3	180	239
Alkene, Cycloalkene							
1-Hepten*	592-76-7	8	0,4	17	4	110	110
5-Methyl-hexen-2*	3404-62-4	191	10	12	4	34	307
1-Octen*	11-66-0	74	3,9	5	1	6	137
1-Decen*	872-05-9	150	7,9	8	2	36	180
1-Undecen	821-95-4	4	0,2	3	3	4	4
1-Dodecen*	112-41-4	9	0,5	2	2	5	5
Pentamethylhepten*	141-70-8	90	4,7	5	3	14	101
3-Methyl-pentadien-1,3*	4549-74-0	5	0,3	13	3	56	56
Cyclohexen*	110-83-8	15	0,8	5	4	8	8
Cyclohepten*	628-92-2	4	0,2	20	9	60	60
Alkohole							
Ethanol*	64-17-5	1450	76	7	3	25	329
1-Propanol	71-23-8	887	47	47	5	142	3975
2-Propanol	67-63-0	1640	87	71	15	180	17156
1-Butanol	71-36-3	1669	88	10	6	33	340
Isobutanol*	78-83-1	276	15	5	3	17	63
1-Octanol*	111-87-5	5	0,3	3	2	4	4
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	1285	68	7	4	22	351
Benzylalkohol*	100-51-6	62	3,3	36	14	58	98
1-Octen-3-ol*	3391-86-4	5	0,3	3	1	10	10
Aromaten							
Benzol	71-43-2	936	49	3	1	6	147
Toluol	108-88-3	1788	94	9	4	27	1459
m-Xylol	108-38-3	1448	76	6	2	17	821
p-Xylol	106-42-3	1006	53	4	1	13	361
o-Xylol	95-47-6	1098	58	4	1	12	322
Ethylbenzol	100-41-4	1183	62	4	1	11	314
Styrol	100-42-5	828/	44	4	1	14	90
1,2,3-Trimethylbenzol*	526-73-8	72	3,8	9	3	44	150
1,2,4-Trimethylbenzol	95-63-6	1174	62	1	2	19	1286
1,3,5-Trimethylbenzol	108-67-8	485	26	7	1	24	490
2-Ethyltoluol	611-14-3	486	26	9	1	35	450
3-Ethyltoluol	620-14-4	867	46	8	1	16	820
4-Ethyltoluol*	622-96-8	150	7,9	19	2	193	382
n-Propylbenzol	103-65-1	491	26	5	1	21	254
Isopropylbenzol*	98-82-8	9	0,5	16	6	56	56
1,2,4,5-Tetramethylbenzol*	95-93-2	12	0,6	2	2	4	4
1,2,3,5-Tetramethylbenzol*	527-83-7	20	1,1	3	1	9	9
1,2,3,4-Tetramethylbenzol*	488-23-3	16	0,8	2	1	7	7
Dodecylbenzol*	123-01-3	5	0,3	3	2	9	9
Naphthalin	91-20-3	687	36	6	1	25	269
1-Methylnaphthalin*	90-12-0	30	1,6	3	2	11	12
2-Methylnaphthalin*	91-57-6	50	2,6	4	3	19	22
Diisopropylnaphthalin*	28640-62-9	23	1,2	11	7	47	50
Terpene							
a-Pinen	80-56-8	1654	87	28	7	94	2400
β-Pinen	127-91-3	861	54	5	2	16	630
3-Caren	498-15-7	1138	60	10	3	36	546
Limonen	138-86-3	1505	73	13	5	47	544

Bezeichnung	CAS-Nr.	n	% > BG	MW	Median	P95	Max
Camphene*	79-92-5	28	1,5	7	4	38	41
Myrcene*	123-35-3	11	0,6	4	2	10	10
α -Terpinen*	99-86-5	28	1,5	5	3	20	20
Cineol*	470-82-6	32	1,7	19	7	120	247
Linalool*	78-70-6	5	0,3	3	2	6	6
dl-Menthol*	1490-04-6	24	1,3	5	3	31	37
α -Terpineol*	98-55-5	4	0,2	4	4	4	4
Longifolen	475-20-7	471	25	2	1	4	40
trans-Caryophyllene*	87-44-5	11	0,6	3	1	16	16
Aldehyde							
Butanal	123-72-8	768	41	5	3	14	88
Pentanal	110-62-3	998	53	6	3	16	170
Hexanal	66-25-1	1458	77	10	5	28	630
Heptanal*	111-71-7	71	3,7	2	2	5	6
Octanal*	124-13-0	100	5,3	3	3	7	10
Nonanal	124-19-6	1030	54	7	6	16	92
Decanal*	112-31-2	44	2,3	2	2	4	5
Benzaldehyd	100-52-7	1053	61	6	3	16	193
Ketone							
Methyl-iso-butylketon	108-10-1	34	1,8	6	5	21	35
Diisopropylketon*	565-80-0	4	0,2	7	5	14	14
2-Heptanon*	110-43-0	18	0,9	3	3	6	6
Cyclohexanon	108-94-1	380	20	2	1	6	53
Acetophenon*	98-86-2	530	28	3	1	10	37
Ester, Ether							
Ethylacetat*	141-78-6	28	1,5	33	25	107	127
n-Butylacetat	123-86-4	967	51	9	2	23	1433
Isobutylacetat*	110-19-0	22	1,2	5	5	13	14
Linalylacetat*	115-95-7	9	0,5	3	2	12	12
Dimethylphthalat	131-11-3	186	9,8	3	1	12	32
Diethylphthalat	84-66-2	300	16	2	1	5	14
Dibutylether*	142-96-1	6	0,3	31	5	160	160
Tetrahydrofuran*	109-99-9	15	0,8	16	7	60	60
Glykolverbindungen							
Ethylenglycolmonomethylether	109-86-4	525	28	10	7	31	129
Ethylenglycolmonoethylether	110-80-5	89	4,7	5	3	15	27
Ethylenglycolmonobutylether	111-76-2	917	48	11	5	41	323
Ethylenglykolmonophenylether (Phenoxyethanol)	122-99-6	930	49	10	3	29	908
2-Ethoxyethylacetat	111-15-9	210	11	3	3	9	42
Diethylenglykol*	111-46-6	5	0,3	18	7	67	67
Diethylenglycoldimethylether*	111-96-6	5	0,3	10	7	24	24
Diethylenglycolmonoethylether*	111-90-0	62	3,3	28	20	98	162
Diethylenglycolmonobutylether	112-34-5	566	30	14	4	52	292
Diethylenglykolbutyletheracetat (Butyldiglykolacetat)	124-17-4	272	14	5	1	11	270
Propylenglycolmonomethylether*	107-98-2	57	3,0	12	4	59	113
Propylenglycolpropylether*	1569-01-3	6	0,3	10	6	23	23
Propylenglykolmonophenylether (Phenoxypropanol)*	770-35-4/ 4169-04-4	14	0,7	46	19	198	198
Dipropylenglykol*	25365-71-8	7	0,4	29	16	90	90
Dipropylenglykolmonomethylether*	34590-94-8	32	1,7	48	22	285	423
Methoxypropylacetat*	84540-57-8	51	2,7	27	4	117	800

Bezeichnung	CAS-Nr.	n	% > BG	MW	Median	P95	Max
Methoxybutanol*	2517-43-3	9	0,5	11	2	70	70
3-Methoxybutylacetat*	4435-53-4	6	0,3	4	3	10	10
Hexylenglycol (2-Methylpentan-2,4-diol)*	107-41-5	5	0,3	5	3	11	11
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol-monoisobutytrat (Texanol)*	25265-77-4	46	2,4	11	7	62	104
Propylenglykolmonobutylether*	5131-66-8	98	5,2	13	5	51	196
Dipropylenglykolmonobutylether*	29911-28-2 35884-42-5	81	4,2	19	10	86	174
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol-diisobutytrat (TXIB)	6846-50-0	497	26	3	1	9	80
Chlorverbindungen, Sonstige							
1,1,1-Trichlorethan	71-55-6	86	4,5	9	3	43	170
Trichlorethen*	79-01-6	4	0,2	27	5	95	95
1,4-Dichlorbenzol	106-46-7	63	3,3	9	3	39	86
1-Chlornaphthalin	90-13-1	145	7,6	3	1	10	32
2-Chlornaphthalin	91-58-7	5	0,3	1	1	3	3
Octamethylcyclotetrasiloxan (D4)*	556-67-2	18	0,9	14	4	120	120
Decamethylcyclopentasiloxan (D5)*	541-02-6	328	17	13	5	46	910
Benzothiazol*	95-16-9	9	0,5	13	9	37	37
Phenol*	108-95-2	5	0,3	14	17	20	20
Nicotin*	54-11-5	4	0,2	2	2	2	2
Summe nicht identifizierte VOC* ¹		469	24,3	542	34	2450	40000

% > BG: Anteil der Werte oberhalb Bestimmungsgrenze; *: Berechnet als Toluoläquivalent; ¹: In der Regel isomere aliphatische Kohlenwasserstoffe und höhere Alkylaromaten

Die mindestens in jedem zweiten Raum gefundenen Verbindungen sind in Abbildung 1 dargestellt. Am häufigsten wurden n-Heptan und Toluol nachgewiesen, welche in über 90% der der

untersuchten Räume vorhanden waren. Ebenfalls sehr häufig (> 75 %) kommen Alkohole, Terpene, Hexanal und Xylole vor.

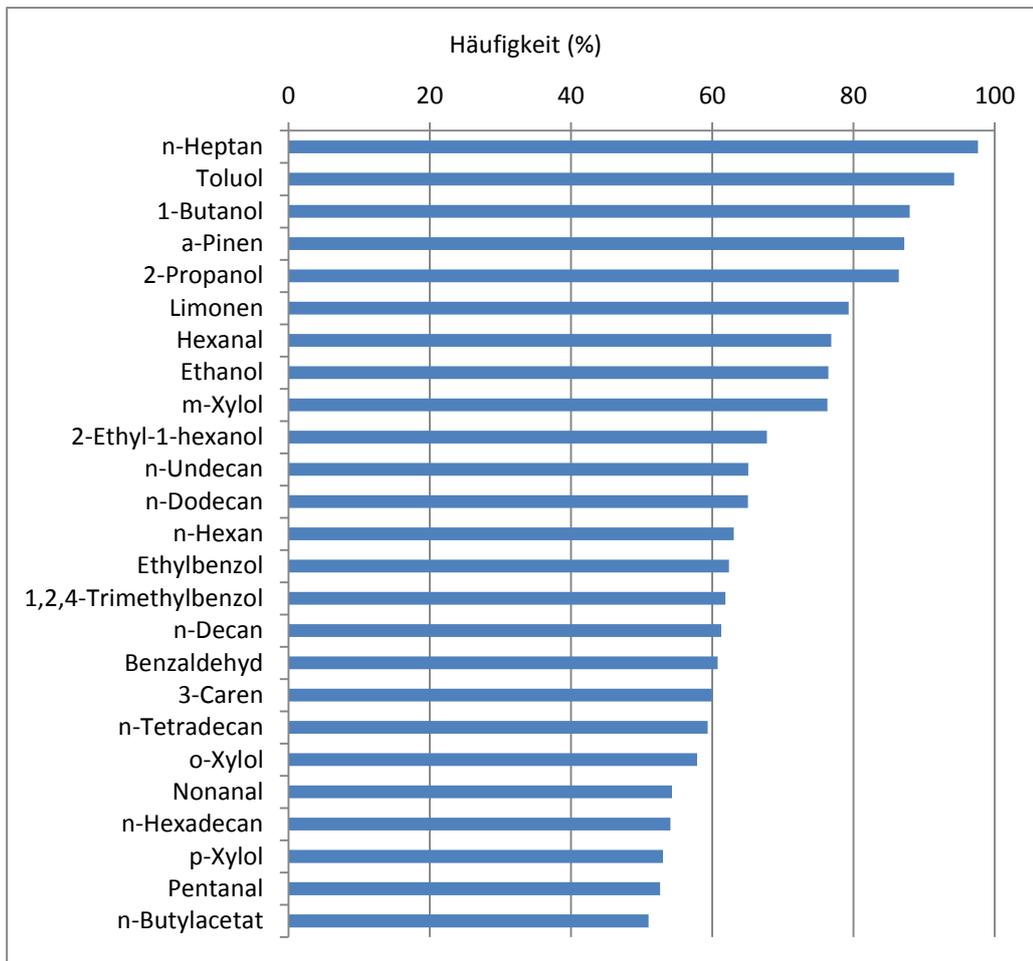


Abbildung 1: Häufigkeit des Nachweises (% aller Proben) einzelner Substanzen in der Raumluft

In Tabelle 4 sind chemisch verwandte Substanzen zu Klassen zusammengefasst und der TVOC-Wert [5, 6] berechnet. Die Konzentrationsverteilung der VOC-Gruppen ist in der Abbildung 2 grafisch dargestellt. Wiederum wurden für die Berechnung der Perzentile nur

Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze berücksichtigt. Die nicht identifizierten VOC, deren Konzentrationen erheblich sein können, sind nicht berücksichtigt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um aliphatische Kohlenwasserstoffe oder Alkylaromaten.

Tabelle 4: Statistische Kenngrößen für verschiedene Substanzklassen, aktive und passive Probenahme, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=1897)

Gruppe	% > BG	MW	Median	P95	MAX
Alkane (ohne nicht identifizierte VOC)	100	65	17	145	5509
Cycloalkane	99	8	2	16	1315
Aromaten	100	48	17	110	3686
Terpene, gesamt	100	45	16	149	3145
Alkohole	100	104	34	262	17573
Aldehyde (ab Butanal)	100	21	12	64	851
Ketone	96	7	4	20	580
Ester	100	7	3	19	1443
Ether	2	17	5	125	160
Glykolverbindungen	100	27	10	105	963
TVOC (ohne nicht identifizierte VOC)	100	243	104	691	9533

Nur Werte > BG berücksichtigt

Alkohole als Gruppe weisen danach die höchsten Konzentrationen (95. Perzentil > 250 µg/m³) auf. Alkane, Aromaten, Terpene und Glykolverbindungen weisen jeweils ein 95. Perzentil > 100

µg/m³ auf, während Ketone und Ester üblicherweise nur in geringen Konzentrationen (< 20 µg/m³) nachgewiesen werden.

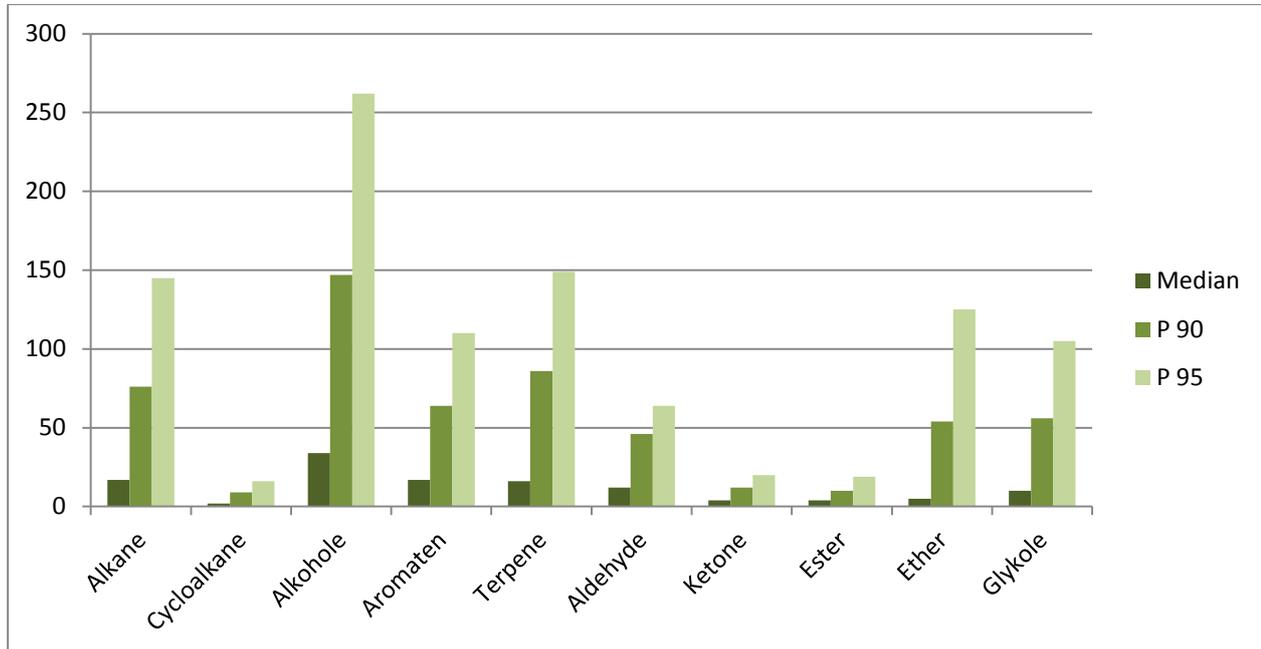


Abbildung 2: Verteilung der Konzentration der verschiedenen VOC-Gruppen (µg/m³)

Die Konzentrationen der meisten VOC lagen etwas oberhalb der Hintergrundwerte, die in Schulen und Kindergärten in Schleswig-Holstein gemessen wurden [10]. Auch die Gesamtbelastung, beschrieben als TVOC-Wert, war geringfügig höher. Zu berücksichtigen sind bei diesem Vergleich aber der unterschiedliche Anlass der Untersuchungen und die zum Teil unterschiedlichen Probenahmebedingungen.

Bei den Alkoholen handelte es sich überwiegend um Ethanol und Propanole. Sie kommen zum Beispiel in Reinigungs- und Desinfektionsmitteln vor und werden auf diesem Wege regelmäßig in die Raumluft eingetragen. Sie unterscheiden sich

in dieser Hinsicht von Emissionen aus Baustoffen oder Einrichtungsgegenständen. Bedeutendste VOC-Gruppen mit den höchsten Konzentrationen nach den Alkoholen waren die Alkane/Cycloalkane mit einem 95. Perzentil von 145 µg/m³ / 16 µg/m³, drittichtigste Gruppe die Terpene mit einem 95. Perzentil von 149 µg/m³.

Aromaten, Glykolverbindungen und Aldehyde liegen mit Medianwerten zwischen 10 und 20 µg/m³ und 95. Perzentilen zwischen 60 und 120 µg/m³ darunter. Ketone und Ester kamen in den Proben nur in vergleichsweise geringer Konzentration vor.

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen für TVOC (in µg/m³) unter verschiedenen Messbedingungen

Probenahmebedingungen	n	MW	Median	P75	P90	P95	Max
gesamt	1897	243	104	211	414	691	9533
Nutzung	534	113	55	125	254	386	3734
Ausgleich	1158	289	125	238	464	877	9533
k. A.	205	318	128	285	511	877	5915

Für die Berechnung des TVOC wurden nur Werte > BG berücksichtigt

Aus der Tabelle 5 ist ersichtlich, dass die VOC-Konzentrationen sich für Probenahmen unter Nutzungsbedingungen und Ausgleichsbedingungen unterscheiden. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die unter Nutzungsbedingungen entnommenen Proben niedrigere VOC-Gehalte aufweisen. Die Lüftung bei Nutzungsbedingungen bewirkt etwa eine Halbierung der Schadstoffkonzentrationen. Allerdings sind in den 534 Proben unter Nutzungsbedingungen 334 Passiv-Proben enthalten, die wie erwähnt deutlich nachweischwächer sind. Für Messungen, für die keine Angaben zu den Rahmenbedingungen gemacht wurden, kann für den Vergleich der Werte angenommen werden, dass diese überwiegend unter Ausgleichsbedingungen erfolgten.

Die in Innenräumen eingesetzten Produkte und Materialien unterliegen technischen Änderungen

und Weiterentwicklungen. Daher verändert sich auch das Spektrum der in der Innenraumluft anzutreffenden VOC über die Zeit [10]. Dies führt dazu, dass Referenzwerte in regelmäßigen Abständen überprüft werden sollten. Ebenso sollten ältere Vergleichswerte wie diejenigen von Seifert [11] nur noch unter Vorbehalt zur Bewertung der Innenraumluft herangezogen werden. Sie entsprechen nicht mehr den heutigen Verhältnissen.

Mit den vorliegenden Daten aus circa 10 Jahren lässt sich diese Veränderung nachvollziehen. Beispielhaft ist in Abbildung 3 die Befundhäufigkeit für Ethylenglykolmonophenylether (= EGPhE, Phenoxyethanol) über die Jahre dargestellt. Für n-Butylacetat lässt sich ein ähnlicher Verlauf feststellen, für andere, wie zum Beispiel α -Pinen, nicht.

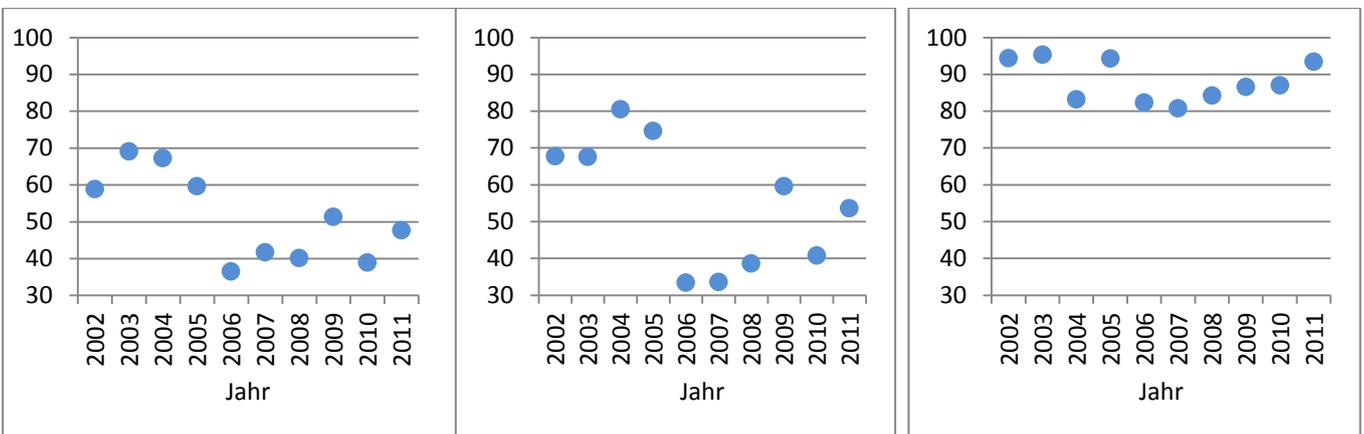


Abbildung 3: Anteil (%) der Proben eines Jahrganges, in denen Ethylenglykolmonophenylether (links), n-Butylacetat (Mitte) oder α -Pinen (rechts) nachweisbar war

War zwischen 2002 und 2005 noch in rund 60 bis 70 % der Proben EGPhE nachweisbar, lag der Anteil positiver Nachweise später nur noch bei circa 40 bis 50 %. Hintergrund ist sehr wahrscheinlich vor allem die Weiterentwicklung von Teppichklebern. In der zweiten Hälfte der 80-er Jahre wurden lösemittelfreie Dispersionsklebstoffe für Teppichkleber eingeführt, die in der Folgezeit klassische stark lösemittelhaltige Kleber am Markt zurückdrängten. Diese erste Gene-

ration von Dispersionsklebern enthielt hochsiedende Glykolverbindungen wie EGPhE oder auch Butyldiglykolacetat, die somit in der Raumluft häufiger nachgewiesen werden konnten. Seit etwa der Jahrtausendwende wurden verstärkt emissionsarme Kleber auf den Markt gebracht, die frei von hochsiedenden Glykolverbindungen sind. Mit zunehmendem Marktanteil dieser Klebstoffe gehen auch die Nachweise dieser Stoffe in der Raumluft zurück.

5 Raumlufthygienische Bewertung der Proben

Die Bewertung von Raumluftproben erfolgt über die Richtwerte für einzelne Stoffe oder Stoffgruppen sowie für die Gesamtbelastung anhand des TVOC-Konzeptes [7]. Diese Kriterien werden von der Ad-hoc-AG festgelegt. Detaillierte Erläuterungen finden sich in der Handreichung der Ad-hoc-AG [6]. Im Anhang 5 sind die aktuellen Richtwerte der Ad-hoc-AG und die Beschreibung der TVOC-Stufen zusammengestellt.

5.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen

Richtwerte für VOC sind gesundheitlich begründet. Es gibt jeweils einen Richtwert I (RW I) und einen Richtwert II (RW II). Der RW I ist die Konzentration, die langfristig unterschritten werden soll („Zielwert“), der RW II ist ein „Eingriffswert“ oder „Gefahrenwert“. Ist die Konzentration eines Stoffes höher als der RW II, so müssen Maßnahmen ergriffen werden [4].

Es fanden sich in circa 13 % der anlassbezogenen Messungen, die unter Nutzungsbedingungen erfolgten, Richtwertüberschreitungen, 66 RW I- und 2 RW II-Überschreitungen (Tabelle 6). Erhöhte Raumlufkonzentrationen von Naphthalin, Benzaldehyd und Ethylenglykolmonomethylether waren dabei für mehr als die Hälfte der Überschreitungen verantwortlich.

Bei den aliphatischen Aldehyden wurde lediglich eine RW I-Überschreitung festgestellt. Diese geringe Fallzahl ist in der Probenahme unter Nutzungsbedingungen begründet. Bezieht man die unter Ausgleichsbedingungen genommenen Proben mit ein, so findet man 26 Werte über $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lüften hat einen großen Einfluss auf die VOC-Konzentrationen. Für die Aldehyde gilt dies scheinbar in besonderem Maße. Aldehyde sind üblicherweise nicht Bestandteil von Baumateria-

Die Konzentrationsbereiche des TVOC-Konzeptes und die Richtwerte gelten für Nutzungsbedingungen, also bei regelmäßiger Lüftung. Deshalb werden im folgenden Abschnitt zunächst nur Proben, die unter Nutzungsbedingungen genommen wurden, mit den Richtwerten und TVOC-Stufen verglichen.

lien, sondern bilden sich bei Reaktionen von Inhaltsstoffen, zum Beispiel mit Sauerstoff und Feuchtigkeit. Die Emission der Aldehyde wird dadurch limitiert und die Konzentration steigt zwischen zwei Lüftungsphasen nur langsam an.

Die „nicht identifizierten VOC“ kommen zum Teil in erheblichen Konzentrationen vor. Meist handelt es sich dabei überwiegend um aliphatische Kohlenwasserstoffe mittlerer Flüchtigkeit. Legte man die Richtwerte für „Alkane C₉₋₁₄“ für eine Bewertung zu Grunde, so kämen 1 RW II- und 16 RW I-Überschreitungen hinzu.

Die Tabelle 6 berücksichtigt nicht worst-case-Proben, weil für diese die Richtwerte nicht direkt anwendbar sind. Betrachtet man jedoch sämtliche 1897 Proben unabhängig von den Randbedingungen, so ergeben sich für über 25 % der Proben RW-Überschreitungen. Dies unterstreicht, wie wichtig die Probenahmebedingungen für eine korrekte Bewertung nach dem Richtwertkonzept der Ad-hoc AG sind. Hingegen können Aktiv- und Passiv-Proben ohne weiteres gemeinsam betrachtet werden, da auch bei den weniger sensitiven ORSA-Passiv-Sammlern Konzentrationen in Höhe der Richtwerte problemlos erfasst werden.

Tabelle 6: VOC-Richtwertüberschreitungen bei Probenahme unter Nutzungsbedingungen (n = 534), aktive und passive Probenahme

Verbindung	Richtwert II (mg/m ³)	>RW II (n)	Richtwert I (mg/m ³)	>RW I* (n)
Ethylenglykolmonomethylether (EGME, CAS-Nr. 109-86-4)	0,2	0	0,02	11
Ethylenglykolmonophenylether (EGPhE, CAS-Nr. 122-99-6), default-Wert 0,05/0,005 ppm	0,29	0	0,029	6
Propylenglykolmethyletheracetat (PGMEA, CAS-Nr. 70657-70-4), default-Wert 0,05/0,005 ppm	0,28	0	0,028	1
Propylenglykolmonobutylether (PGMBE, CAS-Nr. 5131-66-8), default-Wert 0,05/0,005 ppm	0,28	0	0,028	1
Summe Alkylbenzole, C ₉ -C ₁₅	1	0	0,1	5
Benzaldehyd	0,2	0	0,02	14
Summe Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)	2	0	0,1	1
Summe C ₉ -C ₁₄ -Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	2	0	0,2	8
Summe Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen	0,03	2	0,01	15
Summe Terpene, bicyclisch (Leitsubstanz α -Pinen)	2	0	0,2	3
Styrol	0,3	0	0,030	1
Substanzen ohne RW der Ad-hoc-AG				
Benzol (BImSchV)			0,005	4
n-Hexan (RfC US EPA)			0,7	1
Summe Xylole (INDEX)			0,2	1

*: Ohne Proben > RW II; nur Werte > BG berücksichtigt

BImSchV: Bundesimmissionsschutzverordnung;
RfC US EPA: Reference Concentration der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA; INDEX:

Long-term exposure limit. INDEX project: Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU

5.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept

Das TVOC-Konzept erlaubt eine Einstufung der Gesamtbelastung in fünf Kategorien. Sie sind mit einer hygienischen Bewertung und abgestuften Maßnahmen verbunden. In der nachfolgenden

Tabelle 7 wird das TVOC-Konzept vereinfacht dargestellt; detaillierte Informationen finden sich zum Beispiel in [5, 6, 7] und in Anhang 3.

Tabelle 7: Einstufung nach dem TVOC-Konzept [5]

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Hygienisch unbedenklich	Hygienisch noch unbedenklich	Hygienisch auffällig	Hygienisch bedenklich	Hygienisch inakzeptabel
< 0,3 mg/m ³	0,3-1,0 mg/m ³	1,0-3,0 mg/m ³	3,0-10 mg/m ³	> 10 mg/m ³
Zielwert	Verstärkte Lüftung	Bis 12 Monate tolerierbar	Bis 1 Monat tolerierbar	Nutzung vermeiden

Ordnet man alle unter Nutzungsbedingungen gemessenen TVOC-Werte den Stufen 1 bis 5 zu, erhält man das in Abbildung 4 dargestellte Ergebnis. Die Gesamtbelastung war in den meisten

Fällen (530 Räume, circa 99 %) in die Kategorie 1 oder 2 einzuordnen. Höher belastete Räume fanden sich entsprechend selten.

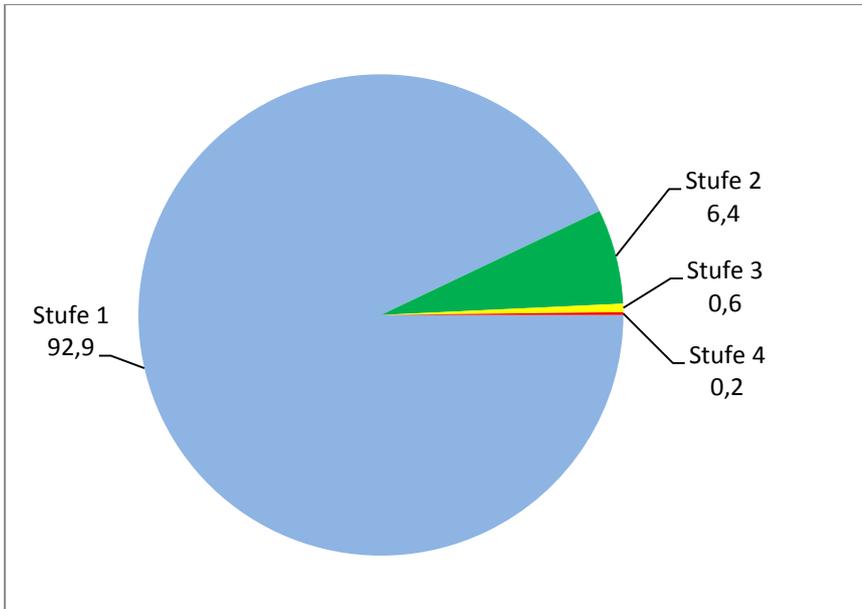


Abbildung 4: Hygienische Einstufung der Proben nach dem TVOC-Konzept (Nutzungsbedingungen, aktive und passive Probenahme); Zahlenangaben in %

Tabelle 8: Einstufung der gemessenen TVOC-Werte in die fünf Kategorien nach [5]

TVOC-Stufen mg/m ³	Nutzungsbedingungen (N = 534) n (%)	Alle Proben (N = 1897) n (%)
< 0,3	496 (93)	1592 (84)
> 0,3-1	34 (6,4)	239 (13)
> 1-3	3 (0,6)	42 (2,2)
> 3-10	1 (0,2)	24 (1,3)
> 10	0 (0,0)	0 (0,0)

Werden auch die unter Ausgleichsbedingungen erfolgten Messungen betrachtet, so verschieben sich die Anteile geringfügig (97 % in Stufe 1 oder 2, siehe Tabelle 8).

Die TVOC-Einstufung war damit vergleichbar zu früheren Studien, zum Beispiel zu den von uns untersuchten Schulen und Kindergärten [10]. Dies war nicht unbedingt zu erwarten, da die

Messungen anlassbezogen durchgeführt wurden und deshalb höhere Belastungen als Ursache der Beschwerden vermutet werden könnten. Andererseits zeigt das Ergebnis, dass die Raumluftverhältnisse in den öffentlichen Liegenschaften mit Bezug auf den TVOC-Gehalt in der Regel als unbedenklich einzustufen sind und hygienisch bedenkliche Schadstoffbelastungen selten sind.

6 Einflussfaktoren für die VOC-Belastung

6.1 Gebäudecharakteristika

Erwartungsgemäß haben die Gebäudecharakteristika einen Einfluss auf die Raumluftbelastung. So finden sich in Räumen von Holzhäusern höhere VOC-Gesamtgehalte (Tabelle 9 und Abbildung 5). Bei den Holzhäusern ist das auf die natürlichen Emissionen von Terpenen und Aldehyden

aus Hölzern zurückzuführen. Wegen der geringen Anzahl untersuchter Holzhäuser (n = 20) sind aber keine verallgemeinernden Aussagen möglich. Neuere Untersuchungen zeigen, dass moderne Holzhäuser emissionsarm gebaut werden können [12].

Tabelle 9: TVOC-Wert (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und Gebäudecharakteristika

Charakteristikum	Median	P75	P90	P95
Steinhaus (n=1213)	92	195	360	545
Holzhaus (n=20)	190	1179	3318	3451
Niedrigenergiehaus (n = 11)	90	153	518	589
Fertighaus (n= 43)	209	385	489	644
Hauptstraße Ja (n=466)	77	154	279	472
Hauptstraße Nein (n= 1330)	110	232	458	761

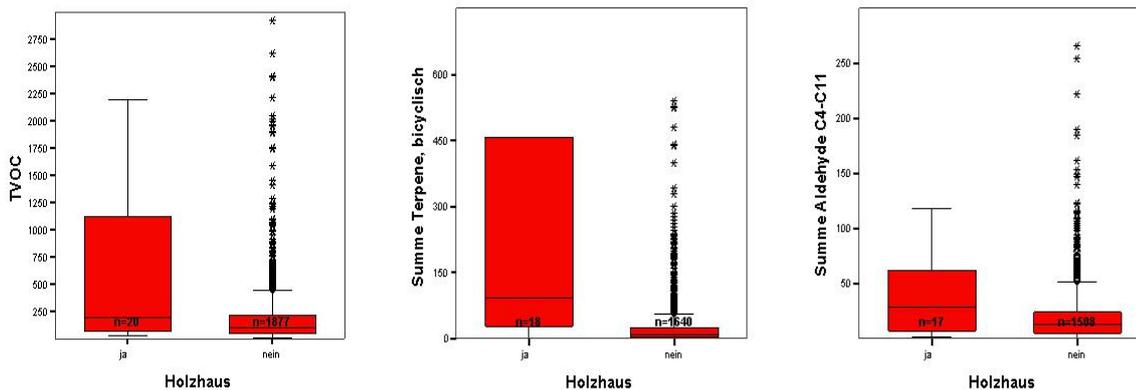


Abbildung 5: Boxplots der VOC-Belastung ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Holzhäusern und Nicht-Holzhäusern

6.2 Lüftung

Die Lüftung der Räume erfolgt überwiegend (zu 86 %) durch Fensterlüftung. In 72 Fällen gab es eine Raumluft-technische (RLT-) Anlage oder eine Zuluftanlage. Der Vergleich der unterschiedlichen Lüftungsverfahren in Bezug auf VOC-Konzentrationen ist in der Abbildung 6 dargestellt. Die Kennwerte sind bei technischer Lüftung nur minimal niedriger. Der Unterschied ist statistisch nicht signifikant (U-Test: $p = 0,426$).

Die Annahme, dass RLT-Anlagen durch die kontinuierliche Lüftung zu niedrigeren Raumluftbelastungen durch VOC gegenüber der Fensterlüftung führen, lässt sich für die vorliegenden Proben nicht erhärten. Wegen der geringen Anzahl von Räumen mit technischer Lüftungseinrichtung ist das Ergebnis möglicherweise nicht repräsentativ.

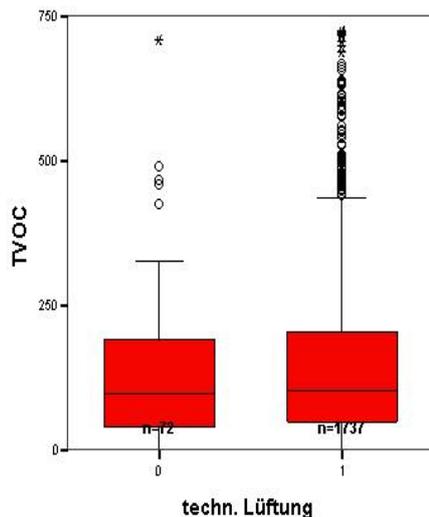


Abbildung 6: Boxplots der Verteilung der TVOC-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Abhängigkeit von der Lüftungsart (0 = technische Lüftungsanlage vorhanden, 1 = keine technische Lüftungsanlage vorhanden)

6.3 Renovierungsmaßnahmen

Wie in vorhergehenden Studien konnte auch bei den veranlassten Messungen ein Einfluss zurückliegender Renovierungen festgestellt werden. Dabei bestand kein Unterschied, ob die Raumluftmessungen unter Ausgleichs- oder Nutzungsbedingungen erfolgten, auch wenn die absoluten Konzentrationen, wie weiter oben ausgeführt, natürlich von den Probenahmebedingungen abhängen.

Je kürzer die Renovierung zurücklag, umso höher waren die TVOC-Gehalte. Dieses erwartete Abklingen der Raumluftbelastung nach erfolgter Renovierung zeigt sich für alle Substanzgruppen mit Ausnahme der meisten Alkohole. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass Alkohole weniger durch Bauprodukte eingetragen werden, sondern als Reinigungsmittel oder zur Desinfektion im täglichen Gebrauch verwendet werden. Ebenso verhält sich Limonen anders als die bicyklischen Terpene, da Limonen häufig als Duftstoff regelmäßig eingetragen wird, während

die bicyklischen Terpene überwiegend aus Holz(baustoffen) stammen. Die Konzentrationen von 2-Ethyl-1-hexanol und aliphatischen Aldehyden sinken viel langsamer als die der Alkane oder Aromaten. Grund könnte sein, dass diese Verbindungen üblicherweise nicht oder kaum als solche verwendet werden. 2-Ethyl-1-hexanol beispielsweise ist Bestandteil des Weichmachers Di(ethylhexyl)phthalat (DEHP). Eine Freisetzung von 2-Ethyl-1-hexanol erfolgt dann möglicherweise erst auf Grund späterer, der Produktanwendung nachgelagerter chemischer Reaktionen. Analog entstehen die aliphatischen Aldehyde unter anderem beim Abbau ungesättigter Fettsäuren.

Der Abbildung 7 ist der Zusammenhang zwischen Renovierungszeitpunkt und VOC-Konzentration für ausgewählte Stoffe zu entnehmen. Zur Veranschaulichung wurden die Konzentrationen für den Zeitraum < 2 Monate als Ausgangspunkt und 100% gesetzt.

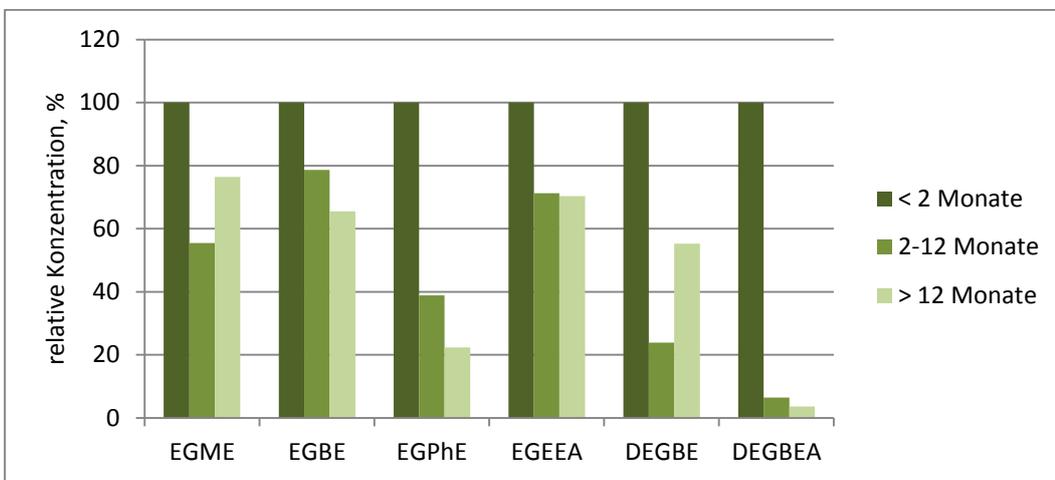
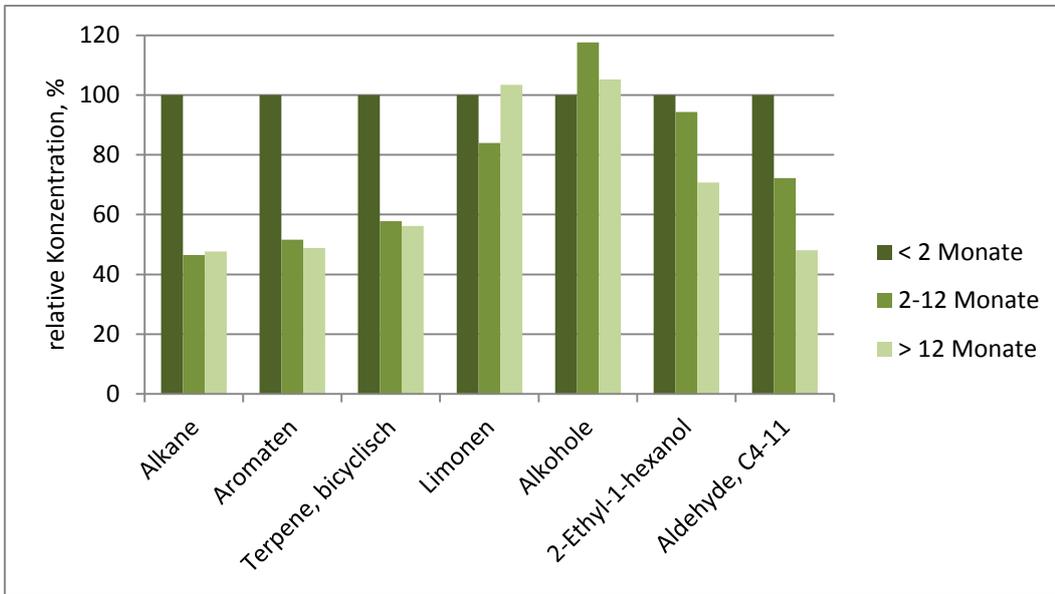


Abbildung 7: Einfluss zurückliegender Renovierungen auf VOC-Konzentrationen ausgewählter Glykolverbindungen (95. Perzentile; Kategorie „< 2 Monate“ als Basis 100 %)

6.4. Feuchtigkeit der Räume

Die Auswertung der Abfrage, ob die Nutzer die Räume als trocken oder feucht einschätzen, ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Es wurden dazu zwei Fragen gestellt, einmal nach der Einschät-

zung der Raumluftverhältnisse (trocken, feucht) und ob es Probleme mit Feuchtigkeit oder Schimmel gab oder gibt.

Tabelle 10: TVOC-Werte (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und Feuchteprobleme

Raum als trocken empfunden?	Anzahl	Median	P75	P90	P95
ja	1158	103	204	394	662
nein	150	109	204	468	788
k. A.	589	106	224	442	816
Feuchtigkeit/Schimmel beobachtet?					
ja	144	90	215	495	1201
nein	1520	103	206	399	657
k. A.	233	114	235	435	812

Die Auswertung ergibt für die Fragen nach Feuchtigkeit und nach Schimmel etwa gleiche absolute Häufigkeiten ($n = 144$ und 150). In 10% der Räumlichkeiten wurde von den Nutzerinnen und Nutzern erhöhte Feuchtigkeit oder Schimmel angegeben, was gleichzeitig mit der Tendenz zu geringfügig höheren TVOC-Gehalten verbunden sein könnte, statistisch aber nicht signifikant ist.

Da kürzlich ein Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit, Gesundheitsbeschwerden und der Freisetzung von 2-Ethyl-1-hexanol beschrieben wurde [13], wurde dieser Frage genauer nachgegangen. Hintergrund ist die Vermutung, dass durch Feuchtigkeit und alkalische Hydrolyse bei entsprechendem Untergrund aus dem Weichmacher Di(ethylhexyl)phthalat (DEHP) des Bodenbelages 2-Ethyl-1-hexanol freigesetzt werden kann.

Tabelle 11: 2-Ethyl-1-hexanol-Konzentrationen in Räumen mit und ohne Kunststoffboden

Kunststoffboden	n	n > BG (%)	Median	P75	P90	P95
ja	246	189 (77)	5	10	20	33
nein	1651	1096 (66)	4	7	13	20

Räume mit Kunststoffböden wiesen unabhängig von Feuchteproblemen signifikant höhere 2-Ethyl-1-hexanol-Konzentrationen auf (Signifikanzniveau $<0,001$, U-Test). Auch der Anteil der Räume, in denen dieser Stoff nachgewiesen werden konnte, war etwas größer (Tabelle 11). Der Zusammenhang zwischen den 2-Ethyl-1-hexanol-Gehalten in der Raumluft und den Angaben Schimmel und Feuchtigkeit (Tabellen 12 und 13)

war jedoch nicht signifikant (Signifikanzniveau $0,86$ beziehungsweise $0,30$). Das war sowohl der Fall wenn nur Räume mit Kunststoffböden, als auch wenn alle Räume ausgewertet wurden. 2-Ethyl-1-hexanol ist damit nach unseren Ergebnissen nicht als sensibler Indikator für Feuchteschäden geeignet. Das Ergebnis schließt aber nicht aus, dass im Einzelfall dennoch 2-Ethyl-1-hexanol aus DEHP freigesetzt wird.

Tabelle 12: 2-Ethyl-1-hexanol-Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) und empfundene Trockne beziehungsweise Feuchte des Raumes, alle Bodenbeläge

Raum als trocken empfunden?	n	Median	P75	P90	P95
ja	809	4	7	14	23
nein	94	4	7	13	19

Tabelle 13: 2-Ethyl-1-hexanol-Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) und Beobachtung von Feuchtigkeit/Schimmel in Räumen mit Kunststoffboden

Feuchtigkeit/Schimmel beobachtet	n	Median	P75	P90	P95
ja	97	4	9	15	19
nein	1021	4	7	14	20

6.5. Subjektive Einschätzung der Räumlichkeiten durch die Nutzenden

Mit zwei Fragen wurde von den Nutzerinnen und Nutzern deren subjektive Einschätzung erhoben, ob sie die Räume als „belastet“ oder „unbelastet“ und als „staubig“ oder „staubarm“ empfinden. Während in der Mehrzahl der Antworten die Räume als „staubarm“ bewertet wurden, empfanden viele ihre Räume als „belastet“. Letzteres entspricht den Erwartungen, da es sich um anlassbezogene Messungen in Räumen mit Beschwerden handelt. Überraschenderweise wiesen die als belastet empfundenen Räume statistisch signifikant niedrigere TVOC-Konzentrationen auf als die unbelasteten Räume (U-Test, $p < 0,001$). Ebenso die staubarmen Räume höhere TVOC-Konzentrationen als die staubig empfundenen Räume (U-Test, $p = 0,003$; Tabelle 14, Abbildung 8). Auch wenn wir dafür keine Erklärung geben können, so zeigen die Zahlen dennoch, dass die Gesamtbelastung zumindest in den hier vorliegenden geringen Konzentrationsniveaus kein Kriterium für möglicherweise auftretende Gesundheitsbeschwerden ist. Im Einklang mit dieser Beobachtung steht, dass die TVOC-Stufen als hygienische Erfahrungswerte und nicht als gesundheitlich begründete Werte definiert sind. Dies unterstreicht die Auffassung der Ad-hoc-AG, dass neben dem TVOC-Wert auch immer die Einzelstoffkonzentrationen betrachtet und anhand der Innenraumluftfrichtwerte bewertet werden müssen.

denen Räume (U-Test, $p = 0,003$; Tabelle 14, Abbildung 8). Auch wenn wir dafür keine Erklärung geben können, so zeigen die Zahlen dennoch, dass die Gesamtbelastung zumindest in den hier vorliegenden geringen Konzentrationsniveaus kein Kriterium für möglicherweise auftretende Gesundheitsbeschwerden ist. Im Einklang mit dieser Beobachtung steht, dass die TVOC-Stufen als hygienische Erfahrungswerte und nicht als gesundheitlich begründete Werte definiert sind. Dies unterstreicht die Auffassung der Ad-hoc-AG, dass neben dem TVOC-Wert auch immer die Einzelstoffkonzentrationen betrachtet und anhand der Innenraumluftfrichtwerte bewertet werden müssen.

Tabelle 14: Einschätzung der Räume (staubig, belastet) und TVOC-Gehalte (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Raum als staubarm empfunden?	n	Median	P75	P90	P95
ja	633	97	201	422	637
nein	324	66	130	296	579
k. A.	940	126	238	435	841
Raum als unbelastet empfunden?					
ja	233	119	253	585	1272
nein	835	98	197	380	526
k. A.	829	106	219	443	816

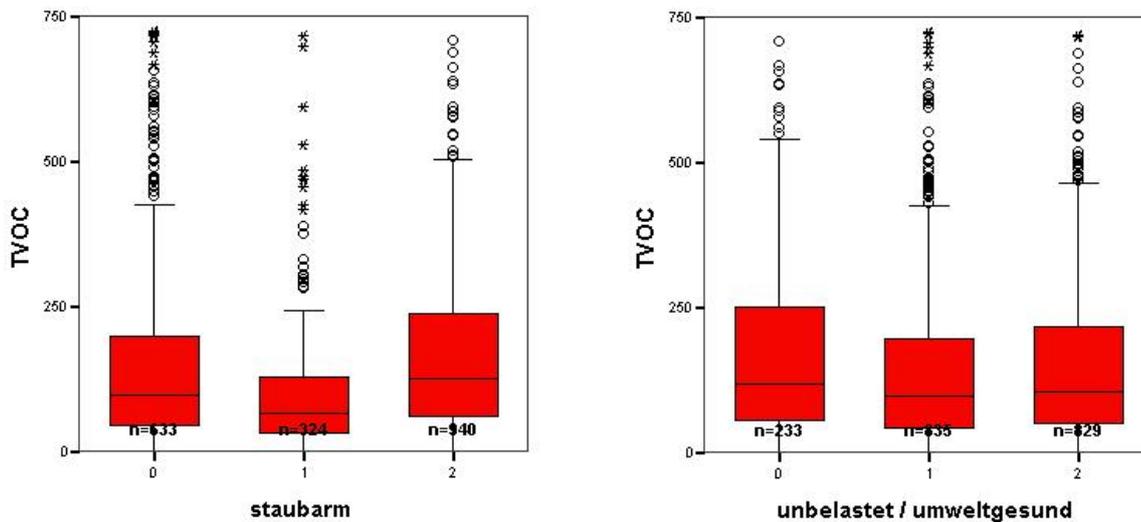


Abbildung 8: Einschätzung der Räume und TVOC-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). 0 = staubarm / unbelastet, 1 = staubig / belastet, 2 = keine Angabe

7 Auswertungen zu Gerüchen

Geruchsprobleme sind ein häufiger Anlass für Beschwerden von Nutzerinnen und Nutzern über eine schlechte Raumluftqualität. Auffällige Gerüche werden in gut der Hälfte der Fälle angegeben. Die Wahrnehmung, Erkennung und Bewertung von Gerüchen ist individuell allerdings sehr unterschiedlich. Die Angaben in den Fragebögen basieren auf subjektiven Angaben. Gerüche können erfahrungsgemäß bei niedrigen Gehalten an besonders geruchsintensiven VOC auftreten und entziehen sich oft dem chemisch-analytischen Nachweis. Als Geruchsschwelle wird allgemein die Konzentration bezeichnet, bei der 50 % der Testpersonen einen Geruch erkennen können. Die Geruchsschwelle für einen bestimmten Ge-

7.1 Geruch und VOC-Konzentration

Unter den regelmäßig nachgewiesenen Verbindungen weist Hexanal eine Geruchsschwelle auf, die im Bereich der gemessenen Belastungen liegt. Für dieses und einige weitere Substanzen und Substanzgruppen, darunter solche, die auch in geringeren Konzentrationen aufgrund ihrer Geruchsaktivität belästigend wirken können, wurden Zusammenhänge zwischen den Angaben über Gerüche und den Messergebnissen geprüft. Dazu wurden zum einen die Messergebnisse in Konzentrationsklassen aufgeteilt und für jede Klasse das Verhältnis der Probenzahlen mit und ohne Geruchsbeschwerden bestimmt. Zum anderen wurde die Korrelation zwischen der VOC-Konzentration und „Geruch ja/nein“ statistisch bestimmt (U-Test). Die Resultate sind in Abbildung 9 dargestellt. In den höheren Konzentrationsbereichen ist die Anzahl der Proben meist gering (Anhang 7), was bei der Bewertung zu beachten ist. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass auch bei den niedrigsten Konzentrationsbereichen das Verhältnis Geruch „ja“ zu „nein“ in der Regel bei etwa 2 liegt, also Räume mit Geruchsbeschwerden überwiegen. Dafür kann es mehrere Gründe geben. Zum einen handelt es sich um Räume, die auf Grund von Beschwerden über die Raumluftverhältnisse untersucht wurden. In solchen Räumen ist die Aufmerksamkeit nicht nur gegenüber gesundheitlichen Problemen, sondern auch gegenüber störenden Gerüchen sicherlich erhöht. Zudem ist die Aussage der Nutzerinnen und Nutzer über auffällig Gerüche nicht an eine bestimmte Substanz gebunden: Ein Raum, der beispielsweise durch Aldehyde geruchlich belastet ist, fällt auch bei der Auswertung für die

ruchsstoff ist von Mensch zu Mensch verschieden und kann selbst bei derselben Person situationsabhängig unterschiedlich sein. Verlässliche Werte für Geruchswahrnehmungsschwellen liegen nur für relativ wenige Stoffe vor [14]. Nach allgemeiner Auffassung ist eine Geruchswahrnehmung keine toxische Wirkung. Gleichwohl können Gerüche Befinden, Verhalten und Leistungen positiv wie auch negativ modulieren. Dabei sind persönliche Bewertungen von Geruchsempfindungen von wesentlicher Bedeutung und etwaige Geruchswirkungen hängen von individuellen Erfahrungen und interindividuellen Unterschieden ab.

Summe der Alkane in die Kategorie „ja“, obwohl diese nicht ursächlich sind.

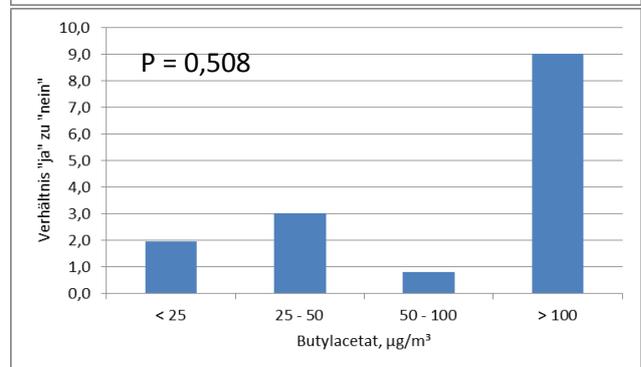
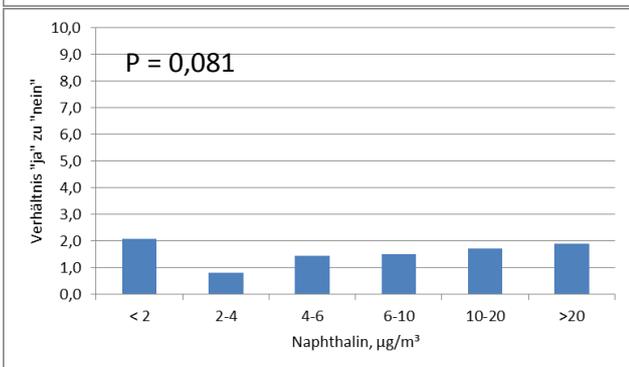
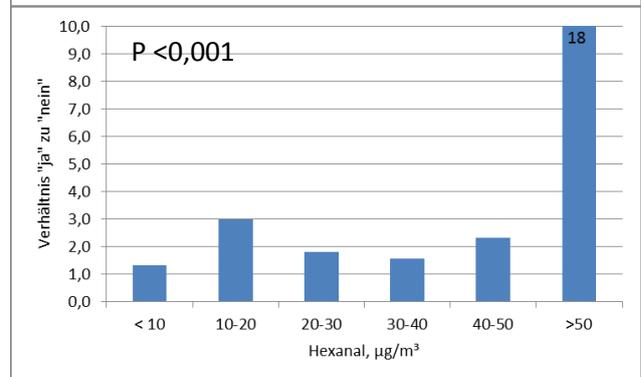
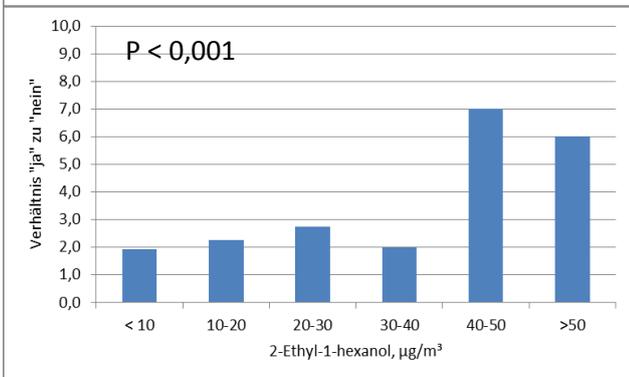
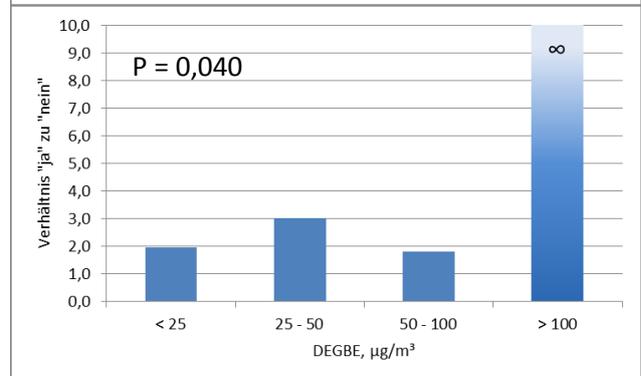
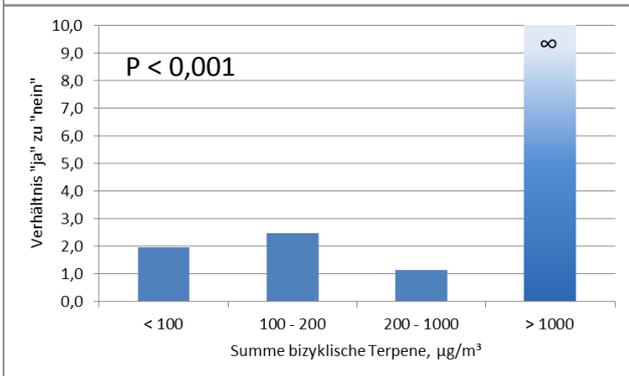
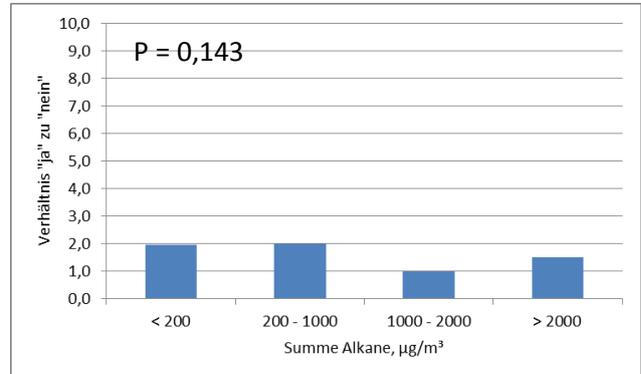
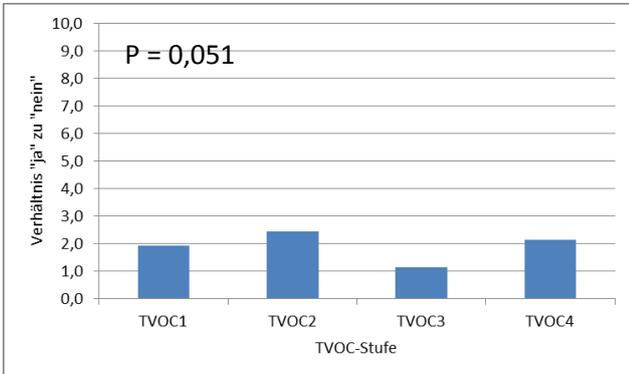
Trotz dieser Schwierigkeiten ergeben sich einige plausible Ergebnisse. So steigt ab Hexanalkonzentrationen über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der Anteil der Geruchsbeschwerden sprunghaft an. Veröffentlichte Geruchsschwellen für Hexanal liegen bei circa $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [15] und stimmen somit gut mit der Zunahme von Geruchsbeschwerden überein. Ein starker Anstieg war auch bei Konzentrationen bicyklischer Terpene über circa $1 \text{mg}/\text{m}^3$ zu beobachten. Die in der Literatur berichteten Geruchsschwellen für die Pinene liegen bei mehreren $10 \text{mg}/\text{m}^3$, für Caren um eine Größenordnung niedriger. Es bleibt daher unklar, ob tatsächlich die Terpene für die Geruchsbeschwerden verantwortlich sind. Hohe Terpene sind häufig mit hohen Aldehydkonzentrationen verbunden (signifikante Korrelation zwischen Summe bicyklischer Terpene und Hexanal, $p = 0,01$), zudem können Oxidationsprodukte von Terpenen auftreten, die geruchsintensiver sein könnten als die Terpene selbst.

Für 2-Ethyl-1-hexanol wird eine Geruchsschwelle von etwa $400\text{-}700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben [16], deren Bestimmung jedoch unsicher ist. In den untersuchten Fällen stieg für 2-Ethyl-1-hexanol ab Konzentrationen von circa $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der Anteil der Nutzerinnen und Nutzer, die Gerüche wahrnehmen, deutlich an.

Für Naphthalin, für das sehr unterschiedliche Geruchsschwellenwerte von $7,5$ bis $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$

angegeben werden [17], zeigt sich kein klarer Zusammenhang. Das Verhältnis „ja“ zu „nein“ steigt bereits in niedrigen Naphthalin-Konzentrationsbereichen. Neben Naphthalin selbst kommen meist auch Alkyl-naphthaline und andere aromatische Verbindungen mit unbekannter Geruchsschwelle vor, die den Geruch möglicherweise dominieren [17].

Butylacetat in möglicherweise geruchsrelevanten Konzentrationen trat überwiegend in der ersten Hälfte der betrachteten Dekade auf (9 von 10 Fälle), während für 1-Butanol und 2-Ethyl-1-hexanol ein umgekehrter Trend vorzuliegen scheint.



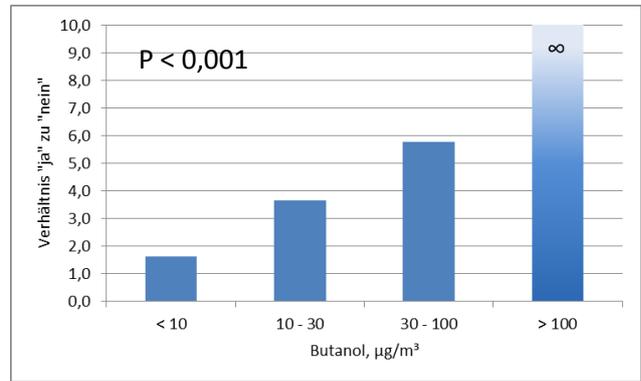
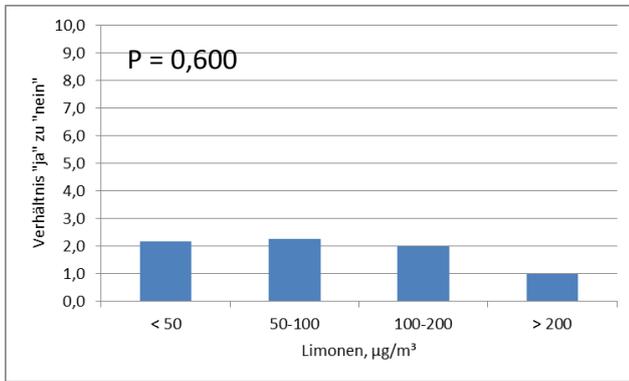


Abbildung 9: Verhältnis der Angabe von Geruch „ja“ zu „nein“ bei unterschiedlichen Konzentrationen (für Hexanal nur aktive Probenahme).

Für andere, wenig geruchsintensive Stoffe wie die (Iso)Alkane oder den TVOC ergibt sich hingegen keine Konzentrationsabhängigkeit. Dies be-

stätigen auch die statistischen Kenndaten für den TVOC, getrennt nach Angaben zu Gerüchen (Tabelle 15).

Tabelle 15: Verteilung der TVOC-Konzentration in der Raumluft und Angabe von Gerüchen durch die Nutzer

Auffällige Gerüche	n	Median	P90	P95
ja	1046	106	416	681
nein	532	94	408	761
k. A.	319	124	434	721

(Signifikanzniveau für Geruch ja/nein: 0,051).

Bei 1046 der 1897 Proben wurden Geruchsbelästigungen beklagt. Mit der obigen Betrachtung lässt sich, selbst wenn man die Plausibilitätsprüfung über veröffentlichte Geruchsschwellenwerte nicht beachtet, lediglich für rund 90 Proben ein Zusammenhang zwischen VOC-Konzentration

und Geruch herstellen. Es muss also sehr geruchsintensive Verbindungen geben, die mit der üblichen VOC-Analytik nicht erfasst werden und / oder Kombinationswirkungen mehrerer Geruchsstoffe.

7.2 Geruchsleitwerte

Weder in Deutschland noch auf europäischer oder internationaler Ebene liegen bisher etablierte Verfahren vor, wie einzelne Geruchsstoffe in der Innenraumluft gesundheitlich zu bewerten sind. Von der Ad-hoc AG ist 2014 ein Konzept zur gesundheitlich-hygienischen Bewertung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft vorgeschlagen worden, das eine Ableitung sogenannter Geruchsleitwerte für 32 Einzelstoffe beinhaltet. Wesentliches Ziel dabei war der Versuch einer Abgrenzung einer geruchlichen Lästigkeit (im Sinne einer geringen geruchlichen Belästigung) von einer unzumutbaren, erheblichen geruchlichen Belästigung [14]. Wegen fehlender Erfahrungen mit der Umsetzung dieses aus der Außenluft entlehnten Konzeptes zur Bewertung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft sind Geruchsleitwerte noch als vorläufig zu betrachten.

Die Geruchsleitwerte orientieren sich an der Geruchsschwelle (ODT_{50}), d.h. der Konzentration, bei der eine Geruchswahrnehmung von 50 % der Probanden angegeben wird. Die Geruchsleitwerte sind im Anhang 7 aufgeführt.

Geruchsleitwert I

Eine Konzentration von 6 ODT_{50} wird als vorläufiger Geruchsleitwert I (vGLW I) bezeichnet. Eine unter Nutzungs- und Lüftungsbedingungen gemäß Abschnitt 3 b gefundene Konzentration eines Geruchsstoffs in der Innenraumluft oberhalb von 6 ODT_{50} wird vorläufig als „geruchlich auffällig“ eingestuft. Die Ad-hoc-AG geht davon aus, dass eine Konzentration oberhalb von 6 ODT_{50} in der Innenraumluft geruchlich wahrnehmbar sein kann und möglicherweise als belästigend empfunden wird.

Geruchsleitwert II

Eine Konzentration von 48 ODT₅₀ wird als vorläufiger Geruchsleitwert II (vGLW II) bezeichnet. Eine unter Nutzungs- und Lüftungsbedingungen gemäß Abschnitt 3 b gefundene Konzentration eines Geruchstoffs in der Innenraumluft oberhalb von 48 ODT₅₀ wird vorläufig als „geruchlich erheblich belästigend“ eingestuft. Die Ad-hoc-AG geht davon aus, dass eine Konzentration oberhalb von 48 ODT₅₀ geruchlich deutlich wahrgenommen und in der Regel als belästigend bis erheblich belästigend empfunden wird. Für die Bewertung sollen die Messungen unter definierten Nutzungs- und Lüftungsbedingungen (NB) erfolgen.

Der Tabelle 16 sind die Anzahl der Überschreitungen der jeweiligen Geruchsleitwerte für einzelne Geruchstoffe zu entnehmen. Auf den gesamten Datensatz bezogen finden sich 779 Messwerte, die einen vGLW I und 24 Messwerte, die den vGLW II überschreiten. Dabei zeigt sich, dass vor allem Aldehyde als Einzelsubstanzen die Geruchsleitwerte überschreiten. Insbesondere Hexanal, dessen Konzentration in 25 % der Messungen über dem vGLW I lag, gefolgt von Pentanal und Butanal waren auffällig (Abbildung 10). Diese drei Aldehyde sind auch für 20 der 24 Überschreitungen von vGLW II verantwortlich.

Tabelle 16: Überschreitungen von Geruchsleitwerten (Gesamt n = 1897)

Geruchsstoff	n > BG	vGLW I (µg/m ³)	vGLW II (µg/m ³)	n > vGLW I*	n > vGLW II
Butanal	768	8	70	81	3
Pentanal	998	9	70	126	4
Hexanal	1458	8	70	471	13
Heptanal	71	5	40	1	0
Octanal	100	5	40	10	0
Nonanal	1030	20	150	27	0
Decanal	44	20	100	0	0
1-Butanol	1669	100	800	7	0
Ethylacetat	28	5000	43000	0	0
n-Butylacetat	967	60	500	14	3
Toluol	1788	2000	14000	0	0
alpha-Pinen	1654	600	5000	9	0
beta-Pinen	861	1000	9000	0	0
Limonen	1505	500	4000	1	0
Benzothiazol	9	4	30	8	1
Gesamt				755	24

*: Ohne Proben > vGLW II

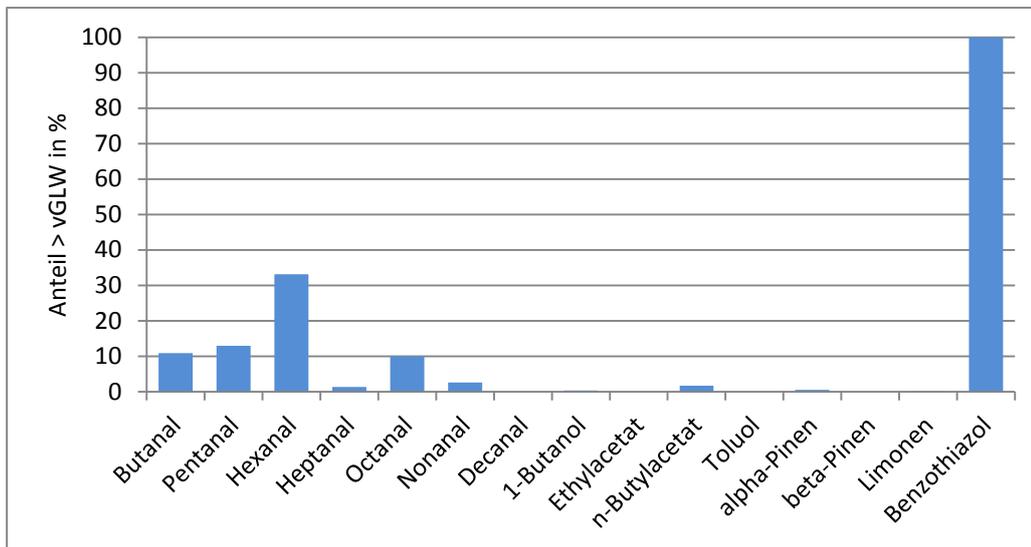


Abbildung 10: Überschreitungen der vGLW durch Geruchsstoffe bezogen auf Proben mit positiven Nachweisen

Aus der getrennten Auswertung der Messungen unter Nutzungsbedingungen wird der Einfluss der Lüftung deutlich. Im Beispiel Hexanal halbiert sich unter Nutzungsbedingungen die Zahl der vGLW I Überschreitungen etwa und der vGLW II wird nicht mehr erreicht. Im Anhang 8 sind Überschreitungen von Geruchsleitwerten bezogen auf die Messungen unter Nutzungsbedingungen zusammengestellt.

Obwohl nur selten vorkommend (9 Funde) stellt die Substanz Benzothiazol einen bedeutenden Geruchsstoff dar, da in allen Fällen, in denen Benzothiazol nachgewiesen wurde, der Geruchsleitwert überschritten wurde. Benzothiazol wird vermutlich aus verwandten chemischen Verbindungen freigesetzt oder ist als Verunreinigung in Produkten enthalten, vor allem durch Vulkanisationsbeschleuniger bei der Herstellung von Gummi und Kautschukprodukten. Kautschukböden sind in allen vorliegenden Fällen mit Vorkommen von Benzothiazol vorhanden, der Gummigeruch war in diesen Fällen auch der Anlass für die Untersuchungen. Da bei den gemessenen Gehalten der RW II nicht und der RW I kaum überschritten wird, ist eine toxikologisch begründete Gesundheitsgefährdung nicht vorhanden und als Maßnahme ist es zunächst ausreichend zu lüften. Grundsätzlich sollten aber in Daueraufenthaltsräumen wegen der Geruchsproblematik nur sehr geruchsarme Kautschukböden verwendet werden.

Es ist interessant die vGLW mit den in den vorliegenden Proben gemessenen 95. Perzentilen und den aus Abbildung 9 resultierenden Konzentrationen, ab denen vermehrt Beschwerden auftreten, zu vergleichen. Diese Plausibilitätsprüfung beschränkt sich auf einige wenige Stoffe, da bislang nur wenige vGLW abgeleitet wurden. Das Ergebnis zeigt Abbildung 11. Bis auf Hexanal besteht bei allen ausgewerteten Verbindungen ein deutlicher Abstand zwischen dem vGLW I und dem 95. Perzentil. Konzentrationen in Höhe der vGLW werden in den realen Proben selten erreicht, die Ausschöpfung des vGLW I liegt bei etwa 30 % oder darunter. Diese Stoffe sollten demnach nur selten Auslöser der Geruchsbeschwerden sein.

Im Einklang damit traten Beschwerden über Geruchsbelastungen dann vermehrt auf (Abbildung 9), wenn der vGLW I erreicht oder überschritten wurde (Abbildung 11). Dies entspricht der Definition des vGLW I (siehe Kasten oben). Im Falle von Toluol liegt vermutlich ein Artefakt vor, da eine Wahrnehmung von Toluol bei einer Konzentration von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sehr unwahrscheinlich ist. Auffällig ist, dass das 95. Perzentil für Hexanal den vGLW I bei weitem überschreitet und den vGLW II zu circa 40 % ausschöpft. Beschwerden treten jedoch erst ab Konzentrationen von rund $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (entsprechend 70 % des vGLW II) auf, im Vergleich zu den anderen Stoffen also relativ spät. Dabei ist zu bedenken, dass die vGLW für Hexanal auf der sehr niedrigen Geruchsschwelle von $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nach [18] basieren.

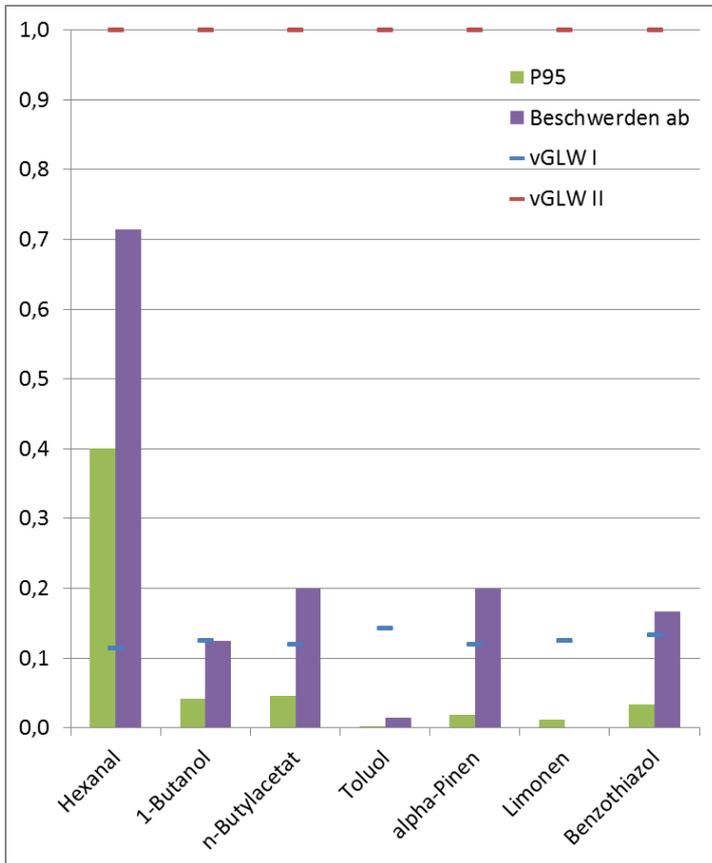


Abbildung 11: Verhältnis des 95. Perzentils aller Messwerte und der Konzentration, ab der vermehrt Geruchsbeschwerden beklagt wurden zu den vGLW. Normierung auf den vGLW II (= 1).

Die vGLW erweisen sich grundsätzlich als brauchbarer Maßstab für die Beurteilung der Zumutbarkeit einer Geruchsbelastung: Beschwerden häuften sich erst ab Konzentrationen oberhalb der vGLW I. Gleichwohl lässt sich mit den bisher vorliegenden vGLW nur ein sehr kleiner Teil der 1046 Geruchsbeschwerden erklären. Daher wären verlässliche Geruchswahrneh-

mungsschwellen und vGLW für weitere geruchsaktive Stoffe dringend nötig. Das GLW-Konzept beachtet nicht die Geruchsnote, was möglicherweise erklärt, warum auch Limonenkonzentrationen in Höhe des vGLW I nicht zur Beunruhigung der Nutzerinnen und Nutzer durch Geruchsbelastung führen. Der Geruch wird zwar wahrgenommen, aber als positiv bewertet.

7.3 Geruch und Schimmelpilzwachstum

Von Schimmelpilzwachstum betroffene, feuchte Räume weisen häufig einen charakteristischen Geruch auf. In den ausgefüllten Fragebögen ist der Zusammenhang zwischen Geruchsbelästigung und Problemen mit Schimmelpilzwachstum nur schwach ausgeprägt (Odds ratio = 1,83, Kon-

fidenzintervall (95%) = 1,21 – 2,75). Dies ist zum Teil dadurch bedingt, dass nicht ausschließlich zur Zeit der Untersuchung aktive, sondern auch vergangene Schimmelpilzschäden erfasst wurden.

7.4 Geruch und Gesundheitsbeschwerden

Bei Gerüchen im Innenraum wird von Nutzerinnen und Nutzern häufig die Frage nach möglichen negativen Auswirkungen des Geruchsstoffes auf die Gesundheit gestellt. Dieser Zusammenhang scheint jedoch nicht zu bestehen: Die sechs Beschwerdebilder und Geruchsbelästigung korre-

lieren nicht miteinander, wie Abbildung 13 im nächsten Kapitel zeigt. Dies macht deutlich, dass die Selbstauskunft der Nutzerinnen und Nutzer in diesem Punkt verlässlich ist. Sie unterscheiden in der Regel offenbar genau zwischen Geruchs- und Gesundheitsbeschwerden.

8 Auswertungen zu Gesundheitsbeschwerden

8.1 Häufigkeit von Gesundheitsbeschwerden

Die Belastung der Innenraumluft mit Schadstoffen, zum Beispiel flüchtigen und schwerflüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC), der Befall mit Schimmel und / oder Feuchtigkeit sind bekannte Faktoren, die das Wohlbefinden der Nutzerinnen und Nutzer beeinträchtigen können.

In Verbindung mit den Messungen wurden die Nutzerinnen und Nutzer gebeten, die Häufigkeit von Gesundheitsbeschwerden anzugeben. Die Abfrage erfasst die für Innenraumprobleme (Sick-Building-Syndrom = SBS) typischen Beschwerdegruppen Schleimhautreizungen, Hautreizungen, Müdigkeit und Kopfschmerzen. Üblicherweise spricht man von SBS, wenn min-

destens 20 Prozent der Nutzer eines Gebäudes Symptome haben und sich diese nach Verlassen des Gebäudes mindern [2].

Insgesamt wurden in 1102 Fällen die gesundheitsbezogenen Fragen (Anhang 1) im Rahmen einer Selbstauskunft beantwortet, jedoch nicht immer für alle aufgeführten Symptomkomplexe; in 157 Fällen wurde für alle Symptomkomplexe die Angabe „nie“ gewählt. In 795 Fällen wurden gar keine Angaben zu Gesundheitsbeschwerden gemacht. Im Folgenden wird versucht, Zusammenhänge von Gesundheitsbeschwerden mit Gebäudecharakteristika und VOC-Belastungen zu erfassen.

Tabelle 17: Häufigkeit von Gesundheitsbeschwerden

n = 1102	n manchmal + häufig	% manchmal + häufig	% manchmal	% häufig
Hautreizung	197	18	8	9
Müdigkeit	360	33	16	17
Husten, Luftnot	369	34	13	20
Halskratzen	427	39	16	22
Nasenreizung	559	51	15	36
Augenbrennen	440	40	15	25
Kopfschmerzen	631	57	24	34

*: Ausgewertet wurden alle Fälle, in denen die gesundheitsbezogenen Fragen zumindest teilweise ausgefüllt wurden. Fehlte für einzelne Beschwerdebilder eine Angabe, wurde dies als „keine entsprechenden Beschwerden“ gewertet. Fälle, in denen gesundheitsbezogene Angaben vollständig fehlten (795 Proben), wurden nicht berücksichtigt.

Am häufigsten wurden als Gesundheitsbeschwerden Kopfschmerzen, gefolgt von Schleimhautreizungen (Nase und Augen) angegeben, siehe Tabelle 17. Kopfschmerzen wurden in 371 Fällen als „häufig“, in 260 Fällen als „manchmal“ genannt. Insgesamt wurde in jedem 3. der 1897 Fälle über Kopfschmerzen geklagt. Betrachtet man nur die Fälle mit ausgefülltem Fragebogen waren es sogar 57 %. Ein Vergleich mit Angaben zur Beschwerdebhäufigkeit aus anderen Studien ist schwierig, da die Erhebungsmethoden untereinander nicht standardisiert sind. Augenreizungen, Beschwerden der Atemwege und Hautsymptome werden zwar in anderen Untersuchungen

mit ähnlichen Häufigkeiten [19, 20]) berichtet, für die Prävalenz von Kopfschmerzen an Arbeitsplätzen oder in der Bevölkerung werden aber beispielsweise Werte zwischen 7 % und über 60 % in der Literatur gefunden [21, 22].

In der weiteren statistischen Auswertung wurde nach Einflussfaktoren auf die Häufigkeit und Art von Gesundheitsbeschwerden gesucht. Insbesondere wurde der Frage nachgegangen, ob Gesundheitsbeschwerden mit bestimmten Schadstoffexpositionen in Verbindung gebracht werden können.

8.2 Gesundheitsbeschwerden und Angaben zu den Raumverhältnissen

In Abbildung 12 sind die Odds ratios (OR) und 95%-Konfidenzintervalle (CI) als Maß für die Stärke eines Zusammenhanges zwischen berichteten Gesundheitsbeschwerden und bestimmten Raumverhältnissen zusammengestellt. Da sowohl Gesundheitsbeschwerden als auch Raumverhältnisse subjektive Angaben sind, sind die Ergebnisse vorsichtig zu bewerten. In der Regel betragen die berechneten OR etwa 0,5 bis 1,5 und die CI schließen den Wert 1 ein. Ein statistischer Zusammenhang ist demnach nicht erkennbar.

Im Falle zu trockener Raumluft wären Augenreizungen als Beschwerde plausibel. Die Frage war

im genutzten Fragebogen jedoch nicht hinreichend präzise formuliert. Es wurde lediglich gefragt, oder der Raum als „trocken“ oder „feucht“ empfunden werde, nicht aber ob die Luft als „zu trocken“ empfunden werde. Es blieb damit den Ausfüllenden überlassen die Frage „trocken / feucht“ im Sinne von „zu geringe Luftfeuchte“ oder „keine Probleme mit Feuchtigkeit“ zu interpretieren. Das Beispiel zeigt, dass insbesondere bei Fragenbögen, die ohne Interviewerin oder Interviewer ausgefüllt werden sollen, die exakte Formulierung der Frage wichtig ist.

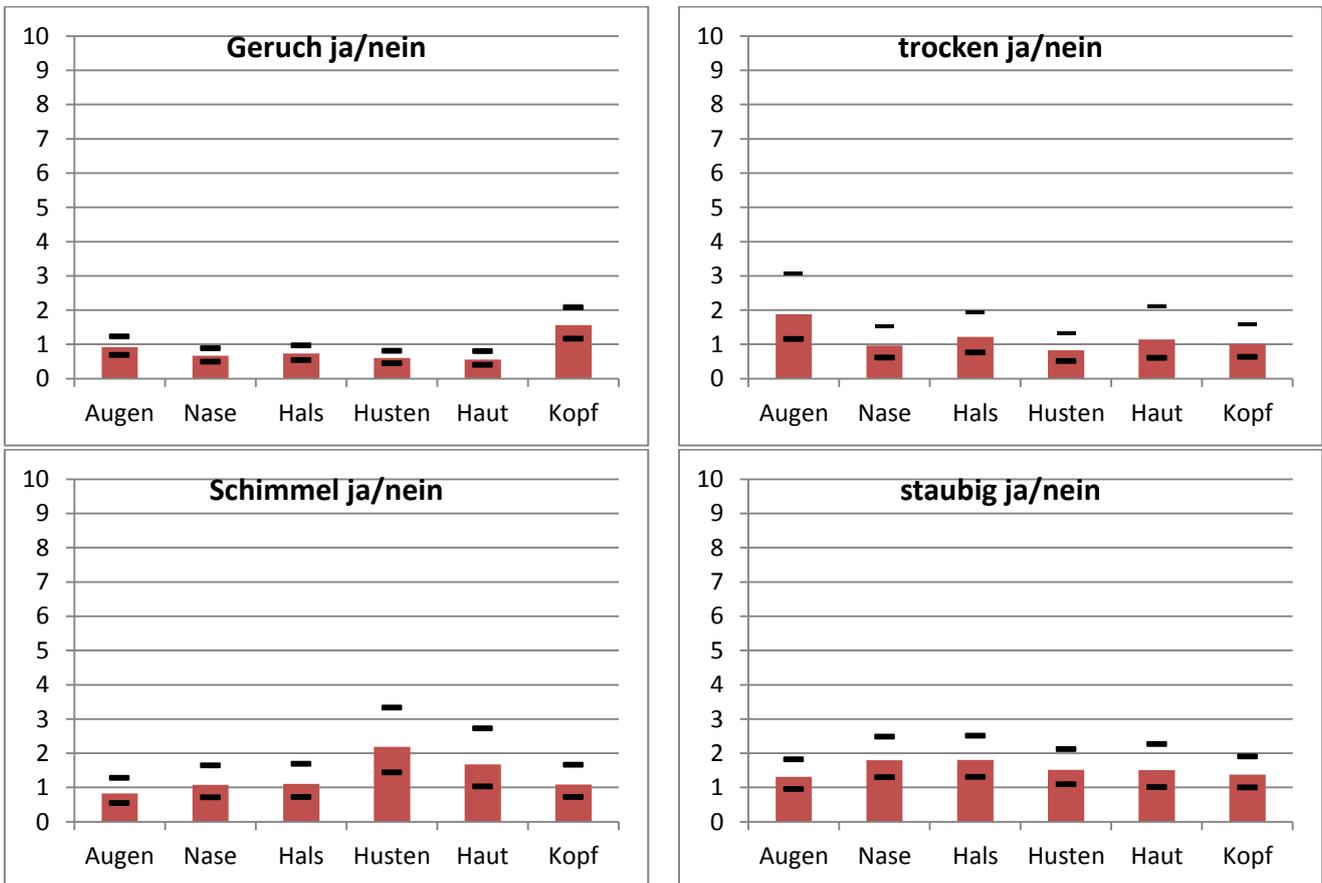


Abbildung 12: OR (rot) und 95%-CI (schwarz) für den Zusammenhang zwischen Gesundheitsbeschwerden und einigen Raumverhältnissen (alle Proben)

8.3 Gesundheitsbeschwerden und VOC-Exposition

Im Folgenden wurde versucht, die vorhandenen Expositionsdaten (gemessene Raumluftbelastungen) und die Angabe von Gesundheitsbeschwerden der Raumnutzer in Beziehung zu setzen. Für die statistische Auswertung der Daten wurden die Häufigkeiten der Beschwerden in Abhängigkeit der Exposition für verschiedene Chemikaliengruppen und Einzelsubstanzen gegenübergestellt. Im Falle von Substanzgruppen wird angenommen, dass die Wirkungen (ausgelöste Beschwerden) von Einzelsubstanzen einer Gruppe ähnlich sind. Dazu wurden zunächst anhand der VOC-Konzentrationen zwei gleich große Expositionsgruppen mit Werten unterhalb beziehungsweise oberhalb des Median gebildet. Für die Ge-

sundheitsbeschwerden wurden die Antworten „manchmal“ und „häufig“ zusammengezählt und der Antwort „keine“ gegenübergestellt. Die getrennte Betrachtung der Antworten „manchmal“ und „häufig“ ergab keine verwertbaren zusätzlichen Erkenntnisse. Unterschiede zwischen den Gruppen wurden mittels nichtparametrischer Testverfahren (U-Test) auf Signifikanz geprüft (Tabelle 18). Es wurden ferner die Odds Ratio und das 95%-Konfidenzintervall für die Angabe von Gesundheitsbeschwerden in Abhängigkeit der VOC-Konzentrationen der jeweiligen Chemikaliengruppen berechnet. Die Resultate der Auswertung sind in der folgenden Abbildung 13 dargestellt.

Tabelle 18: Nichtparametrische Varianzanalyse (Whitney-Man-U-Test) für VOC-Klassen und Gesundheitsbeschwerden

	Augenbrennen	Nasenreizung	Halskratzen	Husten, Luftnot	Hautreizung	Kopfschmerzen
(Cyclo)Alkane	0,470	0,409	0,268	0,033	0,792	0,595
Alkohole	0,198	0,069	0,002	0,113	0,445	0,080
2-Ethyl-1-hexanol	0,102	0,849	0,576	0,440	0,071	0,758
1-Butanol	0,243	0,013	0,219	0,001	0,019	0,928
2-Propanol	0,254	0,246	0,188	0,468	0,373	0,931
Aromaten	0,052	0,003	0,020	0,000	0,382	0,863
Bizykl. Terpene	0,674	0,693	0,230	0,641	0,514	0,229
Aldehyde, C4-11*	0,089	0,334	0,125	0,469	0,682	0,110
Hexanal*	0,231	0,335	0,299	0,866	0,959	0,162
Benzaldehyd*	0,578	0,369	0,437	0,160	0,192	0,027
Ketone/Ester	0,362	0,024	0,069	0,554	0,958	0,005
Glykole	0,094	0,037	0,004	0,020	0,538	0,000
TVOC	0,139	0,106	0,069	0,012	0,901	0,005

- Gruppeneinteilung für Gesundheitsbeschwerden „manchmal + häufig“ versus „nie“

- nur Proben unter Nutzungsbedingungen

- nur Werte > BG

- hervorgehoben: Whitney-Man U < 0,05

*: Nur aktive Probenahme

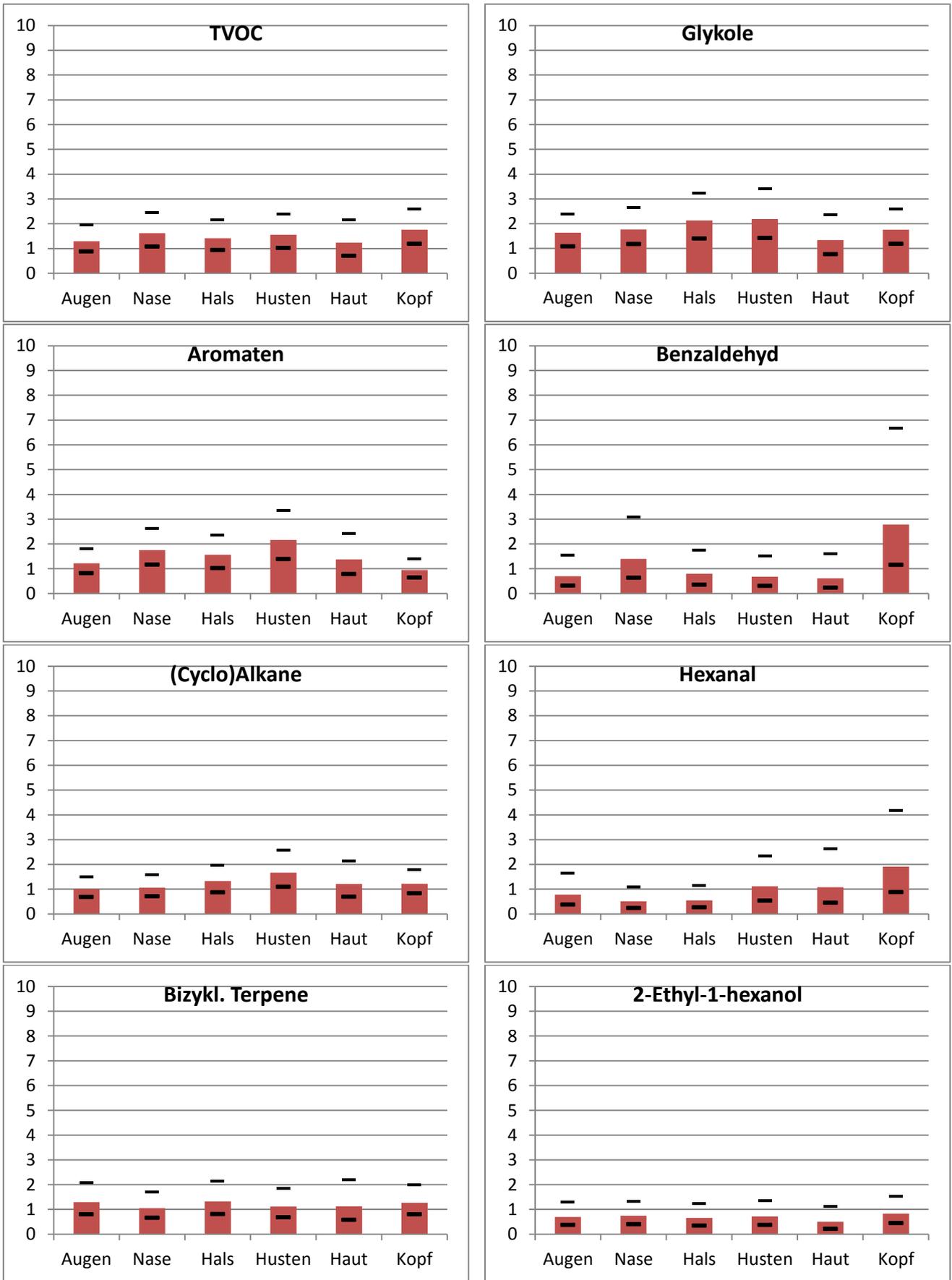


Abbildung 13: OR (rot) und 95%-CI (schwarz) für den Zusammenhang zwischen Gesundheitsbeschwerden und VOC-Konzentrationen über oder unter dem jeweiligen Median (nur Nutzungsbedingungen; Hexanal, Benzaldehyd: nur aktive Probenahme)

Die OR sind häufig relativ einheitlich und kleiner als 2, zum Beispiel für bityklische Terpene, Alkane, mit Einschränkung für Aromaten und (nicht gezeigt) für die Summe der Ketone und Ester und für Limonen. Der Wert 1, der sich ergeben sollte, wenn kein Zusammenhang besteht, wird teilweise überschritten. Zu berücksichtigen ist aber, dass es sich bei den Angaben zu Gesundheitsbeschwerden um nicht verifizierte Selbstauskünfte von Personen handelt, die sich belastet fühlen.

Ein Indiz für einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines bestimmten Symptoms und der Exposition gegenüber einem VOC oder einer VOC-Gruppe ergibt sich allenfalls, wenn die OR für dieses Symptom sich deutlich von denen für andere Symptome unterscheidet sowie die untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls größer als 1 ist. Dies ist am Beispiel Benzaldehyd erkennbar:

Die OR für Kopfschmerzen ist signifikant und sticht mit circa 2,8 hervor; das 95-Konfidenzintervall (circa 1,2 – 6,7) zeigt eine breite Streuung an. Eine detailliertere Betrachtung, bei der statt zweier Konzentrationsklassen, > beziehungsweise < Median, eine feinere Aufteilung vorgenommen wird, zeigt Abbildung 14, links. Der Verdacht eines Zusammenhanges im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen Benzaldehydkonzentration und „Kopfschmerzen“ scheint sich hier zu bestätigen. Der höchste Benzaldehydwert der hier ausgewerteten Proben betrug allerdings 71 µg/m³, so dass sich die Betrachtung auf einen sehr engen Konzentrationsbereich beschränkt. Der Richtwert I für Benzaldehyd wurde zu 20 µg/m³ beziehungsweise 0,02 mg/m³ abgeleitet, der Richtwert II zu 200 µg/m³ beziehungsweise 0,2 mg/m³. Die gemessenen Konzentrationen lassen keine unmittelbaren gesundheitlichen Beeinträchtigungen erwarten.

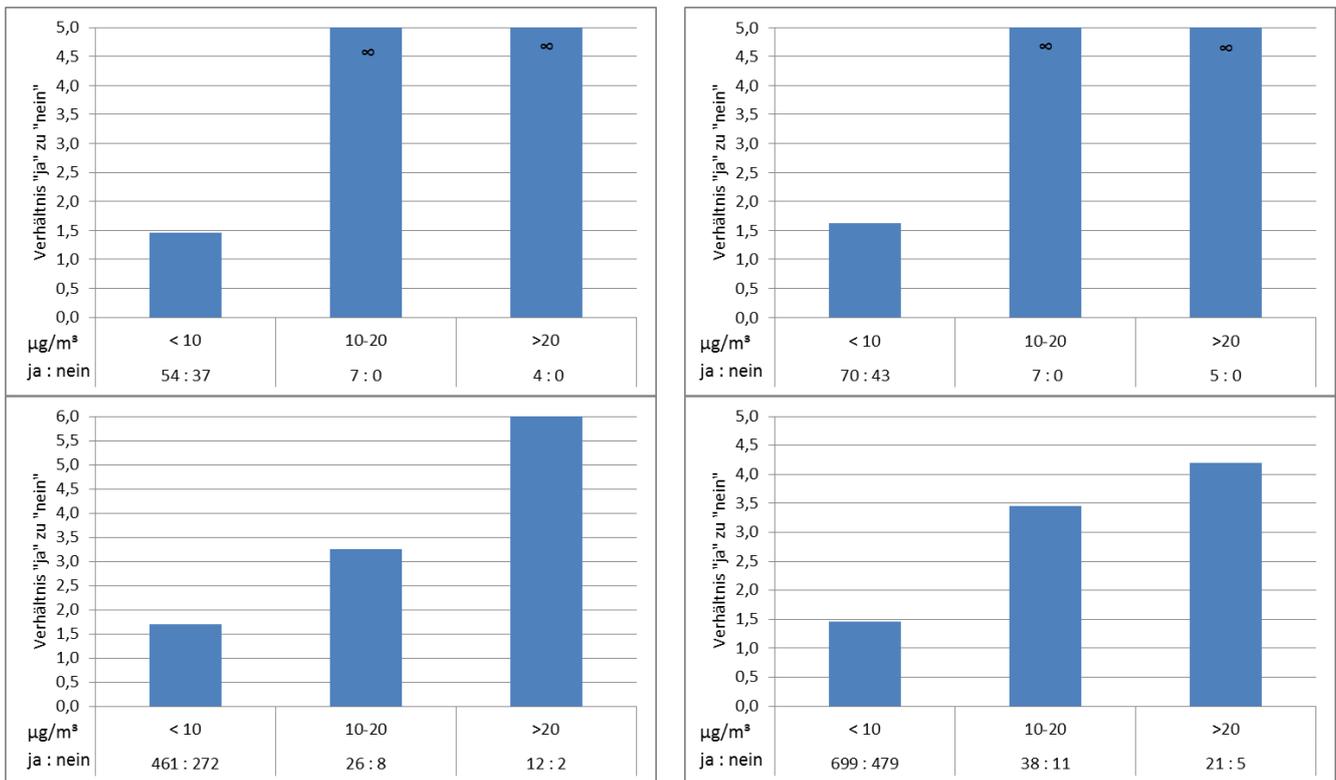


Abbildung 14: Benzaldehydkonzentration und Kopfschmerzen (links); Benzaldehydkonzentration und Geruchsbeschwerden (rechts). Nur aktive Probenahme. Oben: Nur Nutzungsbedingungen, Werte < BG nicht berücksichtigt. Unten: Nutzungs- und Ausgleichsbedingungen, Werte < BG berücksichtigt.

Der Befund für „Kopfschmerzen“ stimmt überein mit der entsprechenden Auswertung für „Geruchsbelastigung“ (Abbildung 14, rechts). Der Geruchsschwellenwert für Benzaldehyd wird mit 0,2 mg/m³ (200 µg/m³) angegeben, so dass auch

hier ein kausaler Zusammenhang nicht plausibel erklärt werden kann.

Das Ergebnis bleibt unverändert, wenn man sowohl Probenahmen unter Ausgleichsbedingungen als auch Messwerte unterhalb der Bestimmungs-

grenze einbezieht. Der höchste berücksichtigte Wert beträgt dann 193 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dieser Befund bildet einen Gegensatz zur Abhängigkeit von Geruchsbelästigungen und Gesundheitsbeschwerden von der Hexanalkonzentration (Kapitel 6). Hier war ein deutlicher und in der Höhe der Konzentration plausibler Zusammenhang mit Geruchsbeschwerden erkennbar, während sich keine Zusammenhänge zwischen Hexanalbelastungen und Gesundheitsbeschwerden ergaben.

Die Exposition gegenüber 2-Ethyl-1-hexanol in Innenräumen wurde verschiedentlich [23, 24, 25] mit Atemwegsbeschwerden in Verbindung gebracht. Dieser Zusammenhang wird bei den vorliegenden Daten nicht sichtbar.

Bei den Glykolverbindungen sind die OR für die Symptome etwas höher als für die meisten ande-

ren betrachteten Stoffe und Stoffgruppen. Bei den Glykolen handelt es sich um eine heterogene Substanzgruppe mit unterschiedlichem toxikologischem Profil der Einzelstoffe. Die analoge Betrachtung der häufigsten Einzelverbindungen Phenoxyethanol, Ethylenglykolmonobutylether und Diethylenglykolmonobutylether ergab jedoch ebenfalls keine klaren Zusammenhänge.

Die gleiche Überlegung gilt auch für den TVOC, der die Gesamtbelastung mit den verschiedensten VOC beschreibt. Es ergeben sich in dieser Auswertung, mit $\text{TVOC} >$ beziehungsweise $<$ Median ebenso wie für die Betrachtung der Proben in den verschiedenen TVOC-Stufen (Abbildung 15), keine auffälligen mit der Dosis zunehmenden Zusammenhänge. Das entspricht in diesem Falle der Erwartung, da der TVOC als hygienischer Parameter ohne konkreten Gesundheitsbezug definiert ist.

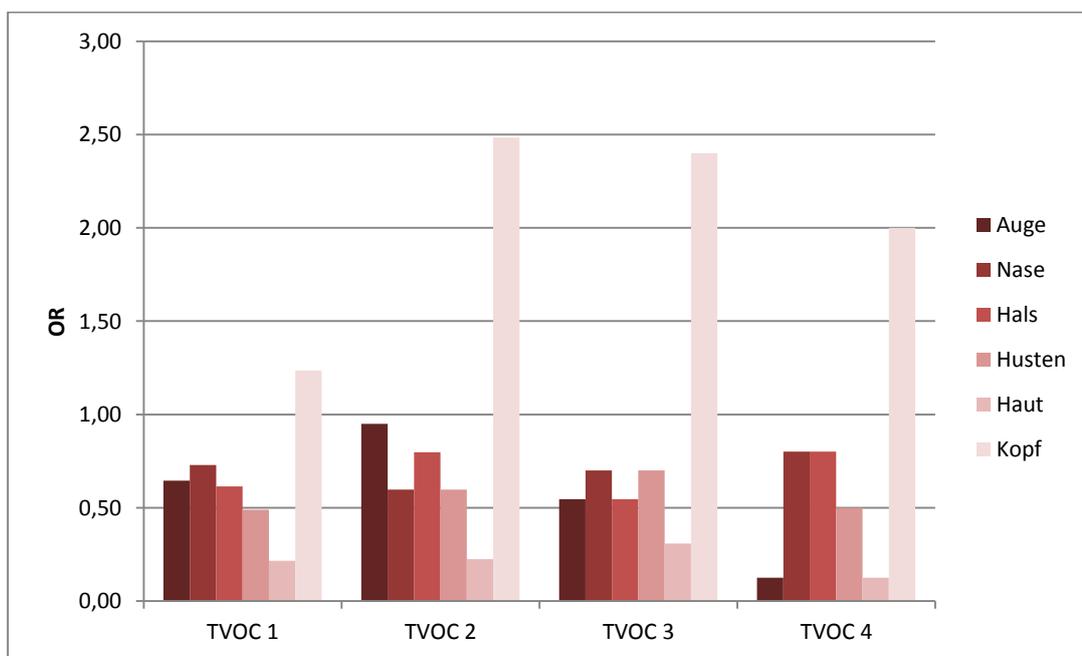


Abbildung 15: OR für das Auftreten von Gesundheitsbeschwerden in Abhängigkeit von der TVOC-Stufe der Räume

Zusammenhänge zwischen Gesundheitsbeschwerden und der Konzentration bestimmter Stoffe sind aus den Daten nur mit Vorbehalt abzuleiten. Es besteht statistisch das Problem falsch positiver Resultate bei multiplen Paarvergleichen. Außerdem ist die monokausale Assoziation einzelner Substanzen/Substanzgruppen mit Gesundheitsbeschwerden eine stark vereinfachte Betrachtung, da einige Schadstoffe unabhängig, andere wiederum abhängig voneinander sind. Zudem haben Studien [2, 26, 27] auch gezeigt,

dass persönliche Faktoren und Empfindungen der Betroffenen, ihre Tätigkeit und die Benutzerfreundlichkeit ihres Arbeitsplatzes oft entscheidender für das Auftreten des Sick-Building-Syndroms waren als die Einflüsse des Bürogebäudes. Diese psychosozialen Faktoren, die sich mit den expositionsbedingten Einflüssen durch Innenraumluftschadstoffe überlagern, haben wir in unserer Studie nicht überprüfen können.

Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da die Raumluftkonzentrationen in den meisten Räumen nicht auffällig sind, wenn man toxikologisch abgeleitete Richtwerte oder Expositionsstudien mit Freiwilligen in Prüfkammern zu Grunde legt. Auch haben andere Studien solche Zusammenhänge bei vergleichbaren Belastungen bisher eher selten gefunden.

Grundsätzlich können die beobachteten Effekte auch statistische Artefakte sein, weil trotz einer zunächst groß erscheinenden Zahl von fast 1900 Proben gerade in höheren Konzentrationsbereichen meist nur wenige Messergebnisse vorliegen.

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten VOC-Stoffgruppen in der Raumluft waren Alkohole (P95 circa $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Terpene ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Alkane ($145 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die statistischen Kennwerte der meisten VOC lagen etwas über den üblichen Hintergrundwerten. Der TVOC betrug im Median $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P95 circa $691 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In Laufe der Jahre sind bei einigen Stoffen, beispielsweise Phenoxyethanol, Veränderungen der Nachweishäufigkeit feststellbar, die auf die Weiterentwicklung der Bauprodukte zurückzuführen sind.

Bei der hygienischen Bewertung fielen lediglich 0,8 % der 534 unter Nutzungsbedingungen entnommenen Proben in die TVOC-Stufe 3 („hygienisch auffällig“) oder schlechter. Bezieht man auch die Proben unter Ausgleichsbedingungen ein, waren es 3,5 %. In den Proben unter Nutzungsbedingungen wurden 66 Richtwert-I-Überschreitungen und 2 Richtwert-II-Überschreitungen festgestellt. Dies entspricht rund 13 % der Proben. Bezieht man auch die Proben unter Ausgleichsbedingungen ein, so steigt der Anteil der Beanstandungen auf 25 %. Am häufigsten traten Richtwertüberschreitungen bei Naphthalin und Benzaldehyd auf. Aliphatische Aldehyde waren unter Nutzungsbedingungen im Vergleich zu Ausgleichsbedingungen nur selten auffällig.

Für verschiedene geruchsintensive VOC ergaben sich plausible Korrelationen zwischen der Häufigkeit von Geruchsbeschwerden und der VOC-Konzentration. So nahm die Beschwerdebhäufigkeit ab einer Hexanalkonzentration von circa $50 \mu\text{g}/\text{n}^3$ deutlich zu. Schwierigkeiten bereitet häufig das Fehlen verlässlicher Geruchsschwellenwerte. Die Plausibilität des Anstiegs der Beschwerdebhäufigkeit mit der Konzentration lässt sich dann nicht kontrollieren. Andere Stoffe wie Limonen oder Alkane führten in den gemessenen Konzentrationen nicht zu vermehrten Geruchsbeschwerden. Insgesamt lagen bei 1046 Proben Geruchsbeschwerden vor, von denen sich der weit überwiegende Teil mit den gemessenen Stoffen nicht erklären lässt.

Die bisher abgeleiteten vorläufigen Geruchsleitwerte wurden an Hand der Daten auf ihre Eignung geprüft. Eine Häufung von Geruchsbelästigungen trat ab einer Konzentration in Höhe des vGLW I auf. Dies entspricht der Definition der vGLW. Es zeigte sich, dass sich mit den vorhandenen vGLW nur ein kleiner Teil der Geruchsbeschwerden erklären lässt. Die Geruchsleitwerte erwiesen sich grundsätzlich als brauchbarer Maßstab für die Bewertung einer Geruchsbelästigung, doch stehen leider für sehr viele geruchsaktive Stoffe keine vGLW zur Verfügung. Es wird aber auch die Limitierung des Modells deutlich, welches die Hedonik, also den Charakter des Geruchs, nicht betrachtet. So wurden Limonenkonzentrationen oberhalb des GLW I offenbar nicht als belästigend empfunden.

Statistisch signifikante und medizinisch plausible Zusammenhänge zwischen VOC-Konzentration und dem Auftreten von Gesundheitsbeschwerden waren nicht erkennbar. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass trotz der insgesamt großen Probenzahl nur sehr wenige Proben mit hoher, gesundheitlich relevanter VOC-Belastung vorlagen. Es wurde deutlich, dass ein erheblicher Teil der Gesundheitsbeschwerden der Nutzerinnen und Nutzer nicht mit den gemessenen VOC erklärbar war.

Gesundheitsbeschwerden in Gebäuden werden häufig als psychisch bedingtes (Massen)Phänomen betrachtet. Dies mag in bestimmten Fällen in der Tat der Fall sein, sollte aber nicht dazu führen, die Beschwerden nicht ernst zu nehmen. Die Eigenwahrnehmung der Nutzerinnen und Nutzer hat eine hohe Plausibilität und spricht in den meisten Fällen für eine reale Ursache. Wenn Nutzerinnen und Nutzer von Gebäuden über Gesundheitsbeschwerden klagen, ist dem deshalb umgehend nachzugehen. Dazu gehört, wenn andere Ursachen nicht offensichtlich sind, in der Regel unter anderem die Klärung einer möglichen VOC-Belastung, auch wenn diese letztlich überwiegend nicht ursächlich sind. Ebenso wichtig sind eine genaue Aufnahme der Situation vor Ort und das Gespräch mit den Betroffenen.

10 Literatur

- [1] Ministerium für Arbeit, Soziales und Gesundheit des Landes Schleswig-Holstein, Raumluftuntersuchungen in Schulen und Kindergärten, Teile 1 bis 5.
<http://www.schleswig-holstein.de> Suchbegriff „Raumluftuntersuchungen“
- [2] Bischof W, Wiesmüller GA (2007) Das Sick Building Syndrome (SBS) und die Ergebnisse der ProKlima-Studie. Umweltmedizin Forschung Praxis, 12, Nr.1, S. 23-42
- [3] Arbeitsstättenrichtlinie, ASR 3.6 (2012) GMBI 2012, S. 92,
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR-A3-6.html>
- [4] UBA: Gesundheit und Umwelthygiene. Die Richtwerte I und II.
<http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm>
- [5] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2007) Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 50, S. 990-1005.
- [6] Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der IRK /AOLG: Richtwerte für die Innenraumluft.
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/irk.htm>
- [7] EU-ECA-WG13 (1996): The use of TVOC as an indicator in IAQ investigations. Report of working Group 13 of European Collaborative Action on Indoor Air Quality and its Impact on Man. JRC, Ispra, Italien
- [8] von Hahn N, Van Gelder R, Breuer D, Hahn JU, Gabriel S, Kleine H (2011) Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 71, Nr. 7/8, S. 314-322
- [9] Neumann H. D., Buxtrup M., von Hahn N., Koppisch D., Breuer D., Hahn J.-U. (2012) Vorschlag zur Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 72, Nr. 7/8, S. 291
- [10] Ostendorp G., Riemer D., Harmel K., Heinzow B. (2009) Aktuelle Hintergrundwerte zur VOC-Belastung in Schulen und Kindergärten in Schleswig-Holstein. Umweltmedizin Forschung Praxis 14, Nr. 3, S. 135-152
- [11] Seifert B (1990) Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt 33, S. 111-114
- [12] Ostendorp G., Heinzow B. (2015) Innenraumluftqualität in Kindertagesstätten in Holzständerbauweise. Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft 75, Nr. 3, S. 71-75
- [13] Wieslander G, Kumlin A, Norbäck D (2010) Dampness and 2-ethyl-1-hexanol in floor construction of rehabilitation center: Health effects in staff. Arch Environ Occup Health. 65, Nr. 1, S. 3-11
- [14] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2014) Gesundheitlich-hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten. Bundesgesundheitsblatt 57, Nr. 1, S. 148-153
- [15] Devos M, Patte F, Rouault J, Laffort P, van Gemert LJ (1990) Standardized Human Olfactory Thresholds, IRL Oxford University Press, Oxford 1990.
- [16] Gefahrstoffinformationssystem Chemikalien (GIS Chem) Datenblatt 2-Ethylhexanol
- [17] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2013) Richtwerte für Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl 2013 · 56:1448–1459
- [18] Nagata Y (2003) Measurement of odor threshold by triangle odor bag method. Odor Measurement Review. Japan Ministry of the Environment.
http://www.env.go.jp/en/air/odor/measure/02_3_2.pdf
- [19] Muzi G, Abbritti G, Accattoli MP, dell'Omo M (1998) Prevalence of irritative symptoms in a nonproblem air-conditioned office building. Int Arch Occup Environ Health 71 Nr. 6, 372-378
- [20] McL Niven R, Fletcher AM, Pickering CAC, Faragher EB, Potter IN, Booth WB, Jones TJ, Potter PDR (2000) Building sickness syndrome in healthy and unhealthy buildings: an epidemiological and environmental assessment with cluster analysis. Occup Environ Med 57, S. 627-634
doi:10.1136/oem.57.9.627
- [21] Neuhauser H, von Brevern MV, Radtke A, Ziese T (2005) Die Prävalenz von Kopf-

- schmerzen und Migräne in Deutschland 2004. Ergebnisse des Telefonischen Gesundheitssurveys 2004. *Gesundheitswesen* 67, S. 31
- [22] Eriksson NM, Stenberg BG (2006) Baseline prevalence of symptoms related to indoor environment. *Scand J Public Health*. 34, Nr. 4, S. 387-396
- [23] Kamijima M, et al. (2002) 2-Ethyl-1-hexanol in Indoor Air as a Possible Cause of Sick Building Symptoms. 1, 6 *J Occup Health* 44, S. 186-191
- [24] Stark H (2007) Inflammatory airway responses caused by *Aspergillus fumigatus* and PVC challenges. *Kuopio University Publications D. Medical Sciences* 420, S. 102
- [25] Kondo F et al. (2007) Two sensitive sick building syndrome patients possibly responding to p-dichlorobenzene and 2-ethyl hexanol: case report. *Journal of health science*, 53, Nr. 1, S. 119-123
- [26] BRASCHE S, BULLINGER M, MORFELD M, GEBHARDT HJ, BISCHOF W (2001) Why do Women Suffer from Sick Building Syndrome more often than Men? - Subjective Higher Sensitivity versus Objective Causes. *Indoor Air* 11, S. 217-222
- [27] Marmot AF, J Eley, M Stafford, S A Stansfeld, E Warwick, M G Marmot (2006) Building health: an epidemiological study of "sick building syndrome" in the Whitehall II study. *Occup Environ Med* 63, S. 283-289.

11 Anhang

Anhang 1: Fragebögen

Landesamt für soziale Dienste
Dezernat 34: Umweltbezogener Gesundheitsschutz, Brunswiker Straße 4, 24105 Kiel

Fragebogen „Gebäude“

Gebäude ID (wird vom LAsD vergeben):

/

Name der Einrichtung: _____

Straße: _____

PLZ: _____ Ort: _____

dortiger Ansprechpartner: _____ Telefon: _____

Träger der Einrichtung: _____

Welcher Art ist das Gebäude?

Baujahr ~ _____

- Altbau
- Stein- / Betonhaus
- Niedrigenergiehaus

- Neubau
- Holzhaus
- Fertighaus (bei * weiter)

(*) Firma, Typ: _____

Sonstiges: _____

Liegt das Gebäude an einer Hauptverkehrsstraße? Nein Ja

Vermuten Sie, dass die Raumluft durch in der Umgebung liegende Betriebe mit Schadstoffen belastet wird?

Nein Ja

Wenn Ja, durch welche/räumliche Nähe? _____

Fragebogen „Raum“

Raum ID (wird vom LAsD vergeben): / /

Labornummer LAsD: _____ Bezeichnung Auftraggeber: _____

Gebäude: _____

Raumbezeichnung: _____

Raumnummer: _____ Flur/Stockwerk: _____

Aus welchem Material sind die Fußböden bzw. –beläge überwiegend hergestellt?

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Fliesen, Steinfußboden | <input type="checkbox"/> Kunststoff (PVC, Laminat etc.) |
| <input type="checkbox"/> Teppichboden, Kunstfaser | <input type="checkbox"/> Linoleum |
| <input type="checkbox"/> Teppichboden, Naturfaser | <input type="checkbox"/> Holz (Dielen, Parkett) |
| Oberfläche: <input type="checkbox"/> geölt / gewachst | <input type="checkbox"/> lackiert |
| Bei Teppichboden, PVC, Linoleum: Wurde der Belag verklebt? <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ja | |

Sonstiges / Anmerkungen / Angaben zum verwendeten Belag und/oder Kleber:

Mit welchem Material sind Wände / Decke überwiegend ausgestattet?

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Papiertapete | <input type="checkbox"/> Kunststoff- / Textiltapete |
| <input type="checkbox"/> Rauhfaser, gestrichen | <input type="checkbox"/> Verputzt, gestrichen |

Sonstiges / Anmerkungen / Angaben zum verwendeten Material:

- Gibt es in dem Raum Holzverkleidungen? Nein Ja
Wenn ja, wurden diese imprägniert oder behandelt? Nein Ja nicht bekannt

Wenn ja, mit welchen Mitteln?

Wann sind zuletzt Maler- oder Renovierungsarbeiten durchgeführt worden?

- bis vor 2 Monaten vor 2 – 12 Monaten vor mehr als 12 Monaten

Welche Arbeiten wurden ausgeführt; falls bekannt, mit welchen Materialien?

Wie sind die Möbel überwiegend beschaffen?

- Massivholz beschichtete Spanplatten / Kunststoffoberflächen etc.
Holzoberflächen sind überwiegend lackiert geölt/gewachst

Sonstiges / Anmerkungen / Angaben zum verwendeten Material:

Heizung / Lüftung

- Geheizt wird mit: Zentralheizung Klimaanlage andere: _____
Gibt es in dem Raum einen offenen Kamin/Ofen o. ä. Nein Ja

- Belüftet wird über: Fensterlüftung (ausschließlich) Klimaanlage
 Zwangs- / technische Belüftung

Ist die Lüftung individuell vom Raum aus regulierbar? Nein Ja

Verschiedenes

Wird in dem betroffenen Raum oder in angrenzenden Räumen mit bestimmten Chemikalien /
Materialien (Farbe, Klebstoff, Lösungsmittel etc.) gearbeitet? Nein Ja

Wenn ja, womit?

- Wird in dem Raum geraucht? nie gelegentlich häufig

Gibt es Probleme mit Feuchtigkeit / Schimmel?

Nein

Ja

Nehmen die Nutzer in dem Raum besondere Gerüche wahr?

Nein

Ja

Wie werden diese von den Nutzern beschrieben? _____

Wie schätzen die Nutzer die Raumverhältnisse ein?

trocken

feucht

staubarm

staubig

unbelastet bzw. „umweltgesund“

belastet bzw. „umweltkrank“

Wie beschreiben die Nutzer die Belastung? _____

Was sind nach Meinung der Nutzer die Ursachen für die negativen Verhältnisse?

Wieviele Personen halten sich in dem Raum/Gebäude im Durchschnitt auf?

Erwachsene

Kinder

Sonstige Angaben/Besonderheiten: _____

Gibt es Gesundheitsbeschwerden, die von den Nutzern auf krankmachende Einflüsse des Raumes zurückgeführt werden?

nein

bei Erwachsenen

bei Kindern

Sind bei Kindern oder Erwachsenen, die sich regelmäßig in den Räumen aufhalten, in den letzten drei Monaten folgende Symptome aufgetreten?

	Nein	Manchmal	Häufig
Augenbrennen, -jucken, Konjunktivitis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nasenreizung, verstopfte Nase	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Halskratzen, Kehlkopfreizung, Heiserkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Husten, Luftnot, Asthma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hautreizung, trockene Haut, Ausschlag	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kopfschmerzen, „Migräne“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ungewohnte Müdigkeit, Leistungsschwäche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige: _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sonstige Angaben/Besonderheiten (z.B. auch abweichende Beurteilung der Nutzerangaben durch Probennehmer):

Datum

Unterschrift

Messprotokoll „Luft“

Raum ID (wird vom LAsD vergeben): / /

Labornummer LAsD: _____ Bezeichnung Auftraggeber: _____

Datum der Probennahme: _____

Gebäude: _____

Raumbezeichnung: _____

Raumnummer: _____ Flur/Stockwerk: _____

Raumgröße/-beschaffenheit:

<input type="text"/> m	Länge	<input type="text"/> m	Breite	<input type="text"/> m	Höhe
<input type="text"/> m ³	Volumen				
<input type="text"/> °C	Pumpe	<input type="text"/> %	rel. Feuchte	<input type="text"/> ppm	CO ₂
<input type="text"/> hPa	Luftdruck	1atm = 760mm Hg = 1013hPa		<input type="text"/> °C	Testo

Handelt es sich um eine

Erstmessung Wiederholungsmessung → alte Probennummern

Zu untersuchende Schadstoffe:

VOC (flüchtige Schadstoffe, Lösemittel) PCB Sonstige: _____

Die Probennahme erfolgte unter „worst case-“, Nutzungsbedingungen.

Angaben zu den Messbedingungen:

Aktive Probennahme:

Anasorb Dräger Aktivkohle Typ NIOSH
 Florisil Sonstige: _____

Probennahme (Uhrzeit) von: _____ bis: _____

Gesamtzeit: _____ min Pumpenstrom: _____ l/min

Probenvolumen (insgesamt): _____ l **oder** _____ Normliter

Pumpentyp: _____

Volumenmessgerät (sofern nicht identisch mit der Pumpe): _____

Sonstiges (z.B. Position des Sammelröhrchens, spezielle Sammeltechnik):

Auftraggeber/Empfänger der Messergebnisse:

Name: _____ Telefon: _____

Institution: _____

Straße: _____ PLZ: _____ Ort: _____

_____ Datum

_____ Unterschrift

Anhang 2:

Kurzbeschreibung der Labormethode zur VOC-Messung mittels GC-FID

Die Desorption der auf Aktivkohle gesammelten VOC erfolgte durch 30 minütiges Schütteln der Aktivkohle in 2 ml Schwefelkohlenstoff/Methanol (99:1 v:v). Die gaschromatographische Analyse

erfolgte parallel auf zwei 60 m Trennsäulen unterschiedlicher Polarität mit Flammenionisationsdetektoren (GC 3800 mit AS 8400, Fa. Varian).

Chromatographische Messbedingungen:

Injektortemperatur:	200 °C
Injektion:	1,5 µl, splitlos
Säule 1:	Polydimethylsiloxan; 60 m lang, 0,32 mm ID, 1,0 µm Filmdicke
Säule 2:	Polyethylenglykol; 60 m lang, 0,32 mm ID, 0,5 µm Filmdicke
Trägergas:	Helium, 20 psi Vordruck
GC-Temperaturprogramm:	35°C / 7 min isotherm; 3°C / min → 105°C; 19 min isotherm; 8°C / min → 230°C; 20 min isotherm
Detektortemperatur:	300 °C

Anhang 3:

Statistische Kenngrößen für die häufigsten VOC, aktive und passive Probenahme, in µg/m³, alle Werte.

Bezeichnung	CAS-Nr.	MW	Median	P95
Alkane, Cycloalkane				
n-Hexan*	110-54-3	5	1	6
n-Heptan	142-82-5	4	1	10
n-Octan	111-65-9	2	< 1	4
n-Nonan	111-84-2	5	< 1	8
n-Decan	124-18-5	14	1	25
n-Undecan	1120-21-4	14	1	24
n-Dodecan	112-40-3	7	1	13
n-Tridecan	629-50-5	3	< 1	4
n-Tetradecan	629-59-4	2	1	3
n-Pentadecan	629-62-9	1	< 1	2
n-Hexadecan	544-76-3	1	< 1	2
n-Heptadecan	629-78-7	< 1	< 1	1
n-Octadecan	593-45-3	< 1	< 1	< 1
n-Nonadecan	629-92-5	< 1	< 1	< 1
n-Eicosan	112-95-8	< 1	< 1	< 1
3-Methylhexan*	589-34-4	2	< 1	5
2,3-Dimethylpentan*	565-59-3	< 1	< 1	< 1
2,4-Dimethylpentan*	108-08-7	< 1	< 1	< 1
2,3,4-Trimethylpentan*	565-75-3	1	< 1	4
4-Methylheptan*	589-83-7	< 1	< 1	< 1
2,2,4-Trimethylpentan*	540-84-1	< 1	< 1	< 1
Methylnonan*	34464-38-5	< 1	< 1	< 1
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	13475-82-6	30	< 1	8
Heptamethylnonan*	34464-38-5	1	< 1	< 1
Cyclohexan	110-82-7	3	< 1	7
Methylcyclopentan	96-37-7	1	< 1	2
Methylcyclohexan	108-87-2	3	< 1	6
Ethylcyclohexan*	1678-91-7	< 1	< 1	< 1
Alkene, Cycloalkene				
1-Hepten*	592-76-7	< 1	< 1	< 1
5-Methylhexen-2*	3404-62-4	2	< 1	4
1-Octen*	11-66-0	< 1	< 1	< 1
1-Decen*	872-05-9	1	< 1	1
1-Undecen	821-95-4	< 1	< 1	< 1
1-Dodecen*	112-41-4	< 1	< 1	< 1
Pentamethylhepten*	141-70-8	< 1	< 1	< 1
3-Methylpentadien-1,3*	4549-74-0	< 1	< 1	< 1
Cyclohexen*	110-83-8	< 1	< 1	< 1
Cyclohepten*	628-92-2	< 1	< 1	< 1
Alkohole				
Ethanol*	64-17-5	5	2	20
1-Propanol	71-23-8	22	< 1	53
2-Propanol	67-63-0	61	12	164
1-Butanol	71-36-3	9	5	31
Isobutanol*	78-83-1	1	< 1	4
1-Octanol*	111-87-5	< 1	< 1	< 1
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	5	2	17
Benzylalkohol*	100-51-6	2	< 1	< 1
1-Octen-3-ol*	3391-86-4	< 1	< 1	< 1

Bezeichnung	CAS-Nr.	MW	Median	P95
Aromaten				
Benzol	71-43-2	2	< 1	4
Toluol	108-88-3	9	4	25
m-Xylol	108-38-3	5	1	14
p-Xylol	106-42-3	3	< 1	7
o-Xylol	95-47-6	3	1	8
Ethylbenzol	100-41-4	3	1	8
Styrol	100-42-5	2	< 1	7
1,2,3-Trimethylbenzol*	526-73-8	< 1	< 1	< 1
1,2,4-Trimethylbenzol	95-63-6	7	1	11
1,3,5-Trimethylbenzol	108-67-8	2	< 1	3
2-Ethyltoluol	611-14-3	3	< 1	3
3-Ethyltoluol	620-14-4	4	< 1	6
4-Ethyltoluol*	622-96-8	2	< 1	2
n-Propylbenzol	103-65-1	2	< 1	3
Isopropylbenzol*	98-82-8	< 1	< 1	< 1
1,2,4,5-Tetramethylbenzol*	95-93-2	< 1	< 1	< 1
1,2,3,5-Tetramethylbenzol*	527-83-7	< 1	< 1	< 1
1,2,3,4-Tetramethylbenzol*	488-23-3	< 1	< 1	< 1
Dodecylbenzol*	123-01-3	< 1	< 1	< 1
Naphthalin	91-20-3	3	< 1	7
1-Methylnaphthalin*	90-12-0	< 1	< 1	< 1
2-Methylnaphthalin*	91-57-6	< 1	< 1	< 1
Diisopropylnaphthalin*	28640-62-9	< 1	< 1	< 1
Terpene				
α-Pinen	80-56-8	24	5	84
β-Pinen	127-91-3	3	< 1	7
3-Caren	498-15-7	7	1	23
Limonen	138-86-3	10	4	40
Camphene*	79-92-5	< 1	< 1	< 1
Myrcene*	123-35-3	< 1	< 1	< 1
α-Terpinen*	99-86-5	< 1	< 1	< 1
Cineol*	470-82-6	< 1	< 1	< 1
Linalool*	78-70-6	< 1	< 1	< 1
dl-Menthol*	1490-04-6	< 1	< 1	< 1
α-Terpineol*	98-55-5	< 1	< 1	< 1
Longifolen	475-20-7	< 1	< 1	2
trans-Caryophyllene*	87-44-5	< 1	< 1	< 1
Aldehyde				
Butanal	123-72-8	2	< 1	7
Pentanal	110-62-3	3	1,0	11
Hexanal	66-25-1	8	4	25
Heptanal*	111-71-7	< 1	< 1	< 1
Octanal*	124-13-0	< 1	< 1	1
Nonanal	124-19-6	4	2	13
Decanal*	112-31-2	< 1	< 1	< 1
Benzaldehyd	100-52-7	4	2	12
Ketone				
Methyl-iso-butylketon	108-10-1	< 1	< 1	< 1
Diisopropylketon*	565-80-0	< 1	< 1	< 1
2-Heptanon*	110-43-0	< 1	< 1	< 1
Cyclohexanon	108-94-1	< 1	< 1	2
Acetophenon*	98-86-2	1	< 1	4

Bezeichnung	CAS-Nr.	MW	Median	P95
Ester, Ether				
Ethylacetat*	141-78-6	1	< 1	< 1
n-Butylacetat	123-86-4	5	< 1	12
Isobutylacetat*	110-19-0	< 1	< 1	< 1
Linalylacetat*	115-95-7	< 1	< 1	< 1
Dimethylphthalat	131-11-3	< 1	< 1	1
Diethylphthalat	84-66-2	< 1	< 1	1
Dibutylether*	142-96-1	< 1	< 1	< 1
Tetrahydrofuran*	109-99-9	< 1	< 1	< 1
Glykolverbindungen				
Ethylenglycolmonomethylether	109-86-4	3	< 1	15
Ethylenglycolmonoethylether	110-80-5	< 1	< 1	< 1
Ethylenglycolmonobutylether	111-76-2	5	< 1	20
Ethylenglykolmonophenylether (Phenoxoethanol)	122-99-6	5	< 1	15
2-Ethoxyethylacetat	111-15-9	< 1	< 1	3
Diethylenglykol*	111-46-6	< 1	< 1	< 1
Diethylenglycoldimethylether*	111-96-6	< 1	< 1	< 1
Diethylenglycolmonoethylether*	111-90-0	1	< 1	< 1
Diethylenglycolmonobutylether	112-34-5	5	< 1	18
Diethylenglykolbutyletheracetat (Butyldiglykolacetat)	124-17-4	1	< 1	2
Propylenglycolmonomethylether*	107-98-2	< 1	< 1	< 1
Propylenglycolpropylether*	1569-01-3	< 1	< 1	< 1
Propylenglykolmonophenylether (Phenoxopropanol)*	770-35-4/ 4169-04-4	< 1	< 1	< 1
Dipropylenglykol*	25365-71-8	< 1	< 1	< 1
Dipropylenglykolmonomethylether*	34590-94-8			
Methoxypropylacetat*	84540-57-8	1	< 1	< 1
Methoxybutanol*	2517-43-3	< 1	< 1	< 1
3-Methoxybutylacetat*	4435-53-4	< 1	< 1	< 1
Hexylenglycol (2-Methylpentan-2,4-diol)*	107-41-5	< 1	< 1	< 1
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiolmonoisobutyrat (Texanol)*	25265-77-4	< 1	< 1	< 1
Propylenglykolmonobutylether*	5131-66-8	1	< 1	2
Dipropylenglykolmonobutylether*	29911-28-2 35884-42-5	1	< 1	< 1
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol-diisobutyrat (TXIB)	6846-50-0	1	< 1	3
Chlorverbindungen, Sonstige				
1,1,1-Trichlorethan	71-55-6	< 1	< 1	< 1
Trichlorethen*	79-01-6	< 1	< 1	< 1
1,4-Dichlorbenzol	106-46-7	< 1	< 1	< 1
1-Chlornaphthalin	90-13-1	< 1	< 1	1
2-Chlornaphthalin	91-58-7	< 1	< 1	< 1
Octamethylcyclotetrasiloxan (D4)*	556-67-2	< 1	< 1	< 1
Decamethylcyclopentasiloxan (D5)*	541-02-6	3	< 1	8
Benzothiazol*	95-16-9	< 1	< 1	< 1

*= Berechnet als Toluoläquivalent; ¹= In der Regel isomere aliphatische Kohlenwasserstoffe und höhere Alkylaromaten

Anhang 4:

Vergleich der statistischen Kennwerte für Probenahmen unter Nutzungs- und Ausgleichsbedingungen, alle Proben. Aufgelistet sind nur Stoffe mit Kennwerten > 1.

Bezeichnung	Median Worst Case	Median Nutzungsbedingung	P95 Worst Case	P95 Nutzungsbedingung
Alkane, Cycloalkane				
n-Hexan*	1,0	1,0	6	6
n-Heptan	1,0	1,0	10	8
n-Octan	< 1	< 1	4	2
n-Nonan	< 1	< 1	8	6
n-Decan	1,0	< 1	30	16
n-Undecan	2,0	< 1	27	16
n-Dodecan	1,0	< 1	15	9
n-Tridecan	< 1	< 1	5	3
n-Tetradecan	1,0	< 1	3	2
n-Pentadecan	1,0	< 1	2	1
n-Hexadecan	1,0	< 1	2	2
n-Heptadecan	< 1	< 1	1	1
3-Methylhexan*	< 1	< 1	6	3
2,3,4-Trimethylpentan*	< 1	< 1	3	8
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	< 1	< 1	17	1
Cyclohexan	< 1	< 1	7	5
Methylcyclopentan	< 1	< 1	2	2
Methylcyclohexan	< 1	< 1	6	4
Alkene, Cycloalkene				
5-Methyl-hexen-2*	< 1	< 1	4	2
1-Decen*	< 1	< 1	1	< 1
Alkohole				
Ethanol*	1,0	3,0	19	21
1-Propanol	1,0	< 1	65	37
2-Propanol	13,0	9,9	183	106
1-Butanol	6,0	4,0	35	19
Isobutanol*	< 1	< 1	4	2
2-Ethyl-1-hexanol	3,1	< 1	19	9
Aromaten				
Benzol	< 1	< 1	4	3
Toluol	3,3	3,5	24	17
m-Xylol	1,3	1,0	14	8
p-Xylol	1,0	< 1	7	3
o-Xylol	1,0	< 1	7	4
Ethylbenzol	1,0	< 1	8	4
Styrol	0,6	< 1	8	3
1,2,4-Trimethylbenzol	1,0	< 1	11	8
1,3,5-Trimethylbenzol	< 1	< 1	3	2
2-Ethyltoluol	< 1	< 1	3	2
3-Ethyltoluol	0,8	< 1	6	5
4-Ethyltoluol*	< 1	< 1	2	< 1
n-Propylbenzol	< 1	< 1	3	2
Naphthalin	< 1	< 1	8	5
Terpene				
α-Pinen	7,0	3,5	107	57
β-Pinen	0,7	< 1	9	4

Bezeichnung	Median Worst Case	Median Nutzungsbedingung	P95 Worst Case	P95 Nutzungsbedingung
3-Caren	2,0	< 1	26	16
Limonen	4,0	3,0	44	30
Longifolen	< 1	< 1	2	1
Aldehyde				
Butanal	1,0	< 1	8	5
Pentanal	2,0	< 1	13	6
Hexanal	5,0	< 1	28	13
Octanal*	< 1	< 1	2	< 1
Nonanal	3,6	< 1	15	9
Decanal*	< 1	< 1	< 1	< 1
Benzaldehyd	2,0	< 1	12	11
Ketone				
Cyclohexanon	< 1	< 1	2	1
Acetophenon*	< 1	< 1	4	3
Ester, Ether				
n-Butylacetat	1,0	< 1	13	6
Diethylphthalat	< 1	< 1	1	1
Glykolverbindungen				
Ethylenglycolmonomethylether	< 1	< 1	17	10
Ethylenglycolmonoethylether	< 1	< 1	2	< 1
Ethylenglycolmonobutylether	2,0	< 1	29	10
Ethylenglykolmonophenylether	1,0	< 1	15	5
2-Ethoxyethylacetat	< 1	< 1	3	2
Diethylenglycolmonobutylether	< 1	< 1	20	10
Diethylenglykolbutyletheracetat (Butyldiglykolacetat)	< 1	< 1	3	< 1
Dipropylenglykolmonomethylether*	< 1	< 1	4	< 1
Propylenglykolmonobutylether*	< 1	< 1	4	< 1
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol-diisobutyrat (TXIB)	< 1	< 1	4	1
Chlorverbindungen, Sonstige				
1-Chlornaphthalin	< 1	< 1	1	< 1
Decamethylcyclopentasiloxan (D5)*	< 1	< 1	10	4
Summe nicht identifizierte VOC* 1	< 1	< 1	128	51

*: Berechnet als Toluoläquivalent; 1: In der Regel isomere aliphatische Kohlenwasserstoffe und höhere Alkylaromaten

Anhang 5:

Richtwerte der Ad-hoc-AG und Definition der TVOC-Stufen (Quelle: Umweltbundesamt)

Verbindung	Richtwert II ¹⁾ (mg/m ³)	Richtwert I ¹⁾ (mg/m ³)	Jahr der Festlegung
Butanonoxim	0,06	0,02	2014
Acetaldehyd	1	0,1	2013
2-Chlorpropan	8 (v)	0,8 (v)	2013
2-Ethylhexanol	1 (v)	0,1 (v)	2013
Ethylenglykolmonomethylether (EGME, CAS-Nr. 109-86-4)	0,2 [= 0,05 ppm]	0,02	2013
Diethylenglykolmethylether (DEGME, CAS-Nr. 111-77-3)	6 (v) [= 1 ppm]	2 (v)	2013
Diethylenglykoldimethylether (DEGDME, CAS-Nr. 111-96-6)	0,3 [= 0,06 ppm]	0,03	2013
Ethylenglykolmonoethylether (EGEE, CAS-Nr. 110-80-5)	1 [= 0,4 ppm]	0,1	2013
Ethylenglykolmonoethylether-acetat (EGEEA, CAS-Nr. 111-15-9)	2 [= 0,4 ppm]	0,2	2013
Diethylenglykolmonoethylether (DEGEE, CAS-Nr. 111-90-0)	2 (v) [= 0,4 ppm]	0,7 (v)	2013
Ethylenglykolbutylether (EGBE, CAS-Nr. 111-76-2)	1 [= 0,3 ppm]	0,1	2013
Ethylenglykolbutyletheracetat (EGBEA, CAS-Nr. 112-07-2)	2 (v) [= 0,3 ppm]	0,2 (v)	2013
Diethylenglykolbutylether (DEGBE, CAS-Nr. 112-34-5)	1 (v) [= 0,2 ppm]	0,4 (v)	2013
Ethylenglykolhexylether (EGHE, CAS-Nr. 112-25-4)	1	0,1	2013
2-Propylenglykol-1-methylether (2PG1ME, CAS-Nr. 107-98-2)	10	1	2013
Dipropylenglykol-1-methylether (D2PGME, CAS-Nr. 34590-94-8; 13429-07-7; 20324-32-7; 13588-28-8; 55956-21-3)	7 (v) [=1 ppm]	2 (v)	2013
2-Propylenglykol-1-ethylether (2PG1EE, CAS-Nr. 1569-02-4)	3 [=< 1 ppm]	0,3	2013
2-Propylenglykol-1-tertbutylether (2PG1tBE, CAS- Nr. 57018-52-7)	3 [=< 1 ppm]	0,3	2013
Glykoether mit unzureichender Datenlage (Default-Wert)	0,05 ml/m ³ [=0,05 ppm]	0,005 ml/m ³ [=0,005 ppm]	2013
Methylisobutylketon	1	0,1	2013
Ethylbenzol	2	0,2	2012
Alkylbenzole, C ₉ -C ₁₅	1	0,1	2012
Kresole	0,05	0,005	2012
Phenol	0,2	0,02	2011
2-Furaldehyd (Furfural)	0,1	0,01	2011

Verbindung	Richtwert II ¹⁾ (mg/³)	Richtwert I ¹⁾ (mg/m³)	Jahr der Festlegung
Zyklische Dimethylsiloxane D ₃ -D ₆ (Summenrichtwert)	4	0,4	2011
Benzaldehyd	0,2	0,02	2010
Benzylalkohol	4	0,4	2010
Monozyklische Monoterpene (Leitsubstanz d-Limonen)	10	1	2010
Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)	2	0,1	2009
C ₉ -C ₁₄ -Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	2	0,2	2005
Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen	0,03	0,01	2013
Terpene, bicyclisch (Leitsubstanz α-Pinen)	2	0,2	2003
Styrol	0,3	0,030	1998
Dichlormethan	2 (24 h)	0,2	1997
Toluol	3	0,3	1996

1) Üblicherweise handelt es sich um Langzeitwerte. Davon abweichende Mittelungszeiträume sind in Klammern angegeben, zum Beispiel 24 Stunden (h); (v) = vorläufiger Richtwert

„Der **Richtwert II** ist ein wirkungsbezogener, begründeter Wert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Sicherheitsfaktoren stützt. Er stellt die Konzentration eines Stoffes dar, bei deren Erreichen beziehungsweise Überschreiten unverzüglich Handlungsbedarf besteht, da diese geeignet ist, insbesondere für empfindliche Personen bei Daueraufenthalt in den Räumen eine gesundheitliche Gefährdung darzustellen.“ ... „Der Handlungsbedarf ist als unverzüglicher Prüfbedarf zu verstehen, z.B. im Hinblick auf Sanie-

rungsentscheidungen zur Verringerung der Exposition.“

„Der **Richtwert I** ist die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der im Rahmen einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Kenntnisstand auch bei lebenslanger Exposition keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten ist. Eine Überschreitung ist mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, hygienisch unerwünschten Belastung verbunden. aus Vorsorgegründen besteht auch im Konzentrationsbereich zwischen RW I und RW II Handlungsbedarf.“

TVOC-Stufen

Nach dem TVOC-Konzept (englisch: „Total Volatile Organic Compounds“) wird die Gesamtbelastung an flüchtigen Luftschadstoffen bewertet:

Stufe 1: TVOC-Werte unterhalb von 0,3 mg/m³ sind hygienisch unbedenklich, sofern keine Richtwerte überschritten werden. Sie werden als "Zielwert" (hygienischer Vorsorgebereich) bezeichnet und sind mit ausreichend zeitlichem Abstand nach Neubau oder Renovierungsmaßnahmen in Räumen erreichbar beziehungsweise nach Möglichkeit zu unterschreiten.

Stufe 2: TVOC-Werte zwischen >0,3 und 1 mg/m³ können als hygienisch noch unbedenklich eingestuft werden, sofern keine Richtwerte überschritten sind. Dieser Konzentrationsbereich

weist zum Beispiel auf noch nicht völlig ausgelüftete Lösemittelinträge hin und indiziert die Notwendigkeit einer verstärkten Lüftung.

Stufe 3: TVOC-Werte zwischen >1 und 3 mg/m³ sind als hygienisch auffällig zu beurteilen und gelten befristet (<12 Monate) als Obergrenze für Räume, die für einen längerfristigen Aufenthalt bestimmt sind. In normal genutzten Wohn-, Schul- oder Büroräumen ohne kürzlich erfolgte Renovierung oder Neumöblierung sollte eine TVOC-Konzentration unter Nutzungsbedingungen von 1 mg/m³ nicht dauerhaft überschritten werden. Derartige Werte wären als Hinweis auf einen zusätzlichen und gegebenenfalls unerwünschten VOC-Eintrag zu werten. Die gesundheitliche Relevanz auffälliger Referenzwertüber-

schreitungen sollte geprüft werden. Eine toxikologische Einzelbewertung zumindest der Stoffe mit den höchsten Konzentrationen wird empfohlen. Die Nachmessung zur Überprüfung der Innenraumluftqualität erfolgt unter Nutzungsbedingungen

Stufe 4: Räume mit TVOC-Werten zwischen > 3 und 10 mg/m^3 werden als hygienisch bedenklich beurteilt und sollten, sofern keine Alternativen zur Verfügung stehen, nur befristet (maximal 1 Monat) und bei Durchführung verstärkter regelmäßiger Lüftungsmaßnahmen genutzt werden. Es ist eine toxikologische Einzelstoff- beziehungsweise Stoffgruppenbewertung vorzunehmen.

men. Die Nachmessung zur Überprüfung der Innenraumluftqualität erfolgt unter Nutzungsbedingungen.

Stufe 5: TVOC-Werte zwischen > 10 und 25 mg/m^3 werden als hygienisch inakzeptabel eingestuft. Die Raumnutzung ist in der Regel zu vermeiden, ein Aufenthalt ist allenfalls vorübergehend täglich (pro Tag weniger als 1 Stunde) und bei Durchführung verstärkter regelmäßiger Lüftungsmaßnahmen zumutbar. Bei Werten $> 25 \text{ mg/m}^3$ ist von einer Nutzung abzusehen. Die Nachmessung zur Überprüfung der Innenraumluftqualität erfolgt unter Nutzungsbedingungen.

Anhang 6:

Häufigkeit der Angabe von Geruch bei unterschiedlichen Konzentrationen ausgewählter VOC.
(Für Hexanal nur aktive Probenahmen)

Stoff(gruppe)	Konzentration					
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	--
TVOC						
Geruch ja	874	139	18	15	--	
Geruch nein	452	57	16	7	--	
□□Alkane/Isoalkane	< 200	200 - 1000	1000 - 2000	> 2000	--	--
Geruch ja	1018	20	2	6		
Geruch nein	519	10	2	4		
□□bicyklische Terpene	< 100	100 - 200	200 - 1000	> 1000	--	--
Geruch ja	984	37	18	7		
Geruch nein	501	15	16	0		
n-Butylacetat	< 25	25 - 50	50 - 100	> 100	--	--
Geruch ja	1021	12	4	9		
Geruch nein	522	4	5	1		
Hexanal	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	> 50
Geruch ja	551	132	40	11	7	17
Geruch nein	416	46	22	7	3	1
2-Ethyl-1-hexanol	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	> 50
Geruch ja	922	81	22	8	7	6
Geruch nein	482	36	8	4	1	1
Naphthalin	< 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10	10 - 20	> 20
Geruch ja	948	28	16	21	12	21
Geruch nein	454	35	11	14	7	11
Diethylglykolmonobutylether	< 25	25 - 50	50 - 100	> 100	--	--
Geruch ja	1010	21	9	10		
Geruch nein	520	7	5	1		
Limonen	< 50	50 - 100	100 -200	> 200	--	--
Geruch ja	798	27	4	4		
Geruch nein	367	12	2	4		
1-Butanol	< 10	10 - 30	30 -100	> 100	--	--
Geruch ja	735	255	52	4		
Geruch nein	453	70	9	0		

Anhang 7:
Vorläufige Geruchsleitwerte [14]

Geruchsstoff	CAS-Nr.	ODT ₅₀ (µg/m ³)	vGLW I (mg/m ³)	vGLW II (mg/m ³)
Ethanal	75-07-0	2,8	0,02	0,1
Butanal	123-72-8	1,4	0,008	0,07
Pentanal	110-62-3	1,5	0,009	0,07
Hexanal	66-25-1	1,4	0,008	0,07
Heptanal	111-71-7	0,9	0,005	0,04
Octanal	127-13-0	0,9	0,005	0,04
Nonanal	124-19-6	3,2	0,02	0,15
Decanal	112-31-2	2,6	0,02	0,1
Pentandial	111-30-8	1	0,006	0,05
1-Butanol	71-36-3	16	0,1	0,8
1-Hexanol	111-27-3	29	0,2	1,4
1-Octanol	111-87-5	23	0,1	1
Ethylacetat	141-78-6	897	5	43
n-Butylacetat	123-86-4	10	0,06	< 1
Phenol	108-95-2	22	0,1	1
o-Kresol	95-48-7	1,3	0,008	0,06
m-Kresol	108-39-4	0,45	0,003	0,02
p-Kresol	106-44-5	0,24	0,001	0,01
TXIB	6846-50-0	14	0,08	0,7
Toluol	108-88-3	300	2	14
Ethylbenzol	100-41-4	27	0,2	1
1,4-Diethylbenzol	105-05-5	2	0,01	0,1
n-Butylbenzol	104-51-8	14	0,1	0,7
α-Pinen	80-56-8	100	0,6	5
β-Pinen	127-91-3	190	1	9
Limonen	138-86-3	90	< 1	4
Ethansäure	64-19-7	13	0,08	0,6
Propansäure	79-09-4	20	0,1	1
Butansäure	107-92-6	1	0,006	0,05
Hexansäure	142-61-1	5	0,03	0,2
Octansäure	124-07-2	5	0,03	0,2
Benzothiazol	95-16-9	0,7	0,004	0,03

Legende: ODT₅₀ – Geruchsschwelle, vGLW- vorläufiger Geruchsleitwert

Anhang 8:**Überschreitungen von Geruchsleitwerten bezogen auf Messungen unter Nutzungsbedingungen
(Gesamt n = 534)**

Geruchsstoff	n > BG	vGLW I ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	vGLW II ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n > vGLW I*	n > vGLW II
Butanal	112	8	70	17	0
Pentanal	156	9	70	11	0
Hexanal	260	8	70	54	0
Heptanal	12	5	40	0	0
Octanal	6	5	40	0	0
Nonanal	148	20	150	1	0
Decanal	9	20	100	0	0
1-Butanol	441	100	800	1	0
Ethylacetat	8	5000	43000	0	0
n-Butylacetat	183	60	500	2	1
Toluol	489	2000	14000	0	0
alpha-Pinen	385	600	5000	0	0
beta-Pinen	134	1000	9000	0	0
Limonen	359	500	4000	0	0
Benzothiazol	1	4	30	1	0

*: Ohne Proben > vGLW II