



Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein

Teil 1: Hintergrundwerte für Schulen und Kindergärten
(Schul- und Kindergartenstudie 2005 / 2007)

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

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

Ansprechpartnerin:
Gudrun Petzold
Tel. 0431/988-5421

ISSN 0935-4379

Mai 2009

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.

Diese Broschüre wurde aus Recyclingpapier hergestellt.

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

Die vorliegende Studie wurde vom Landesamt für soziale Dienste des Landes Schleswig-Holstein, Dezernat Umweltbezogener Gesundheitsschutz, durchgeführt. Ansprechpartner für weiterführende Fragen sind
Dr. Birger Heinzow, Tel. 0431-988-4330 und
Dr. Guido Ostendorp, Tel. 0431-988-4322

Inhalt

Kurzfassung.....	5
Verzeichnis der Abkürzungen und Fachbegriffe.....	6
1 Einleitung.....	7
2 Untersuchungsmethoden.....	8
2.1 Probenahme.....	8
2.2 Analytik.....	8
2.3 Auswertung.....	9
3 Allgemeine statistische Angaben.....	10
3.1 Beschreibung der beprobten Räume.....	10
3.2 Statistische Kennwerte.....	10
3.3 Einfluss der Probenahmetemperatur und der Luftfeuchtigkeit.....	15
3.4 Einfluss des Raumvolumens und der Raumbelugung.....	15
4 Vergleich mit anderen Studienergebnissen.....	16
4.1 Schleswig-holsteinische Schul- und Kindergartenstudie 1990/93.....	16
4.2 Studie zur Belastung von Klassenräumen in Süd-Bayern 2008 und Kinder-Umwelt-Survey 2008.....	17
5 Vorkommen „neuerer“ VOC als Innenraumluftkontaminanten.....	21
5.1 Ester, Ether und Derivate mehrwertiger Alkohole.....	21
5.2 Cyclische Methylsiloxane.....	23
5.3 Naphthalin.....	23
6 Einflussfaktoren für die VOC-Belastung von Innenräumen.....	24
6.1 Renovierungsmaßnahmen und VOC-Belastung.....	24
6.2 Einfluss der Raumausstattung.....	26
6.2.1 Fußbodenbelag.....	26
6.2.2 Holz an Wänden, Decke, Fußboden.....	28
7 Raumlufthygienische Bewertung der untersuchten Proben.....	29
7.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen.....	29
7.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept.....	30
8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	32
9 Literatur.....	34
10 Anhang.....	35

Kurzfassung

Die Belastung der Innenraumluft mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wurde in 285 Räumen aus 105 Schulen und Kindergärten untersucht. Für keinen der untersuchten Räume lagen Beschwerden seitens der Nutzerinnen und Nutzer vor. Die Erhebung dient der Aktualisierung der schleswig-holsteinischen Schul- und Kindergartenstudie aus den Jahren 1990 bis 1993. Aus den aktuellen Daten werden Referenzwerte für zahlreiche flüchtige organische Verbindungen und verschiedene Stoffgruppen abgeleitet. Exemplarisch werden der Einfluss von unterschiedlichen Fußbodenbelägen und einige neuere und aktuelle Innenraumluftkontaminanten ausführlicher diskutiert. Die Räume werden an Hand des TVOC-Konzeptes und von Richtwerten für die Innenraumluft bewertet.

Es zeigte sich, dass in den vergangenen 15 Jahren eine Verschiebung des Substanzspektrums weg von klassischen Lösemitteln wie aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen hin zu Estern, Ether und Glykolverbindungen stattgefunden hat. Die Gesamtbelastung der Raumluft mit VOC ist nicht gesunken. Allerdings wurden lediglich in vier Räumen von unterschiedlichen Schulen Überschreitungen von Eingriffswerten (Richtwert II) festgestellt. Diese betrafen die Verbindungen Naphthalin und aliphatische Kohlenwasserstoffe. Nur 3 % der untersuchten Räume wiesen unter worst-case Bedingungen Summenkonzentrationen (TVOC) auf, die eine Einordnung in die Stufen 3 (hygienisch auffällig) oder 4 (hygienisch bedenklich) des TVOC-Konzeptes bedeuten würden.

Verzeichnis der Abkürzungen und Fachbegriffe

AOLG:

Arbeitsgemeinschaft der obersten Landesgesundheitsbehörden

BG:

Bestimmungsgrenze - geringste mit dem gewählten Verfahren bestimmbare Konzentration

Boxplot:

Kastengrafik zur Darstellung der Verteilung und Streuung einer Reihe von Werten

Emission:

Abgabe Luft verunreinigender Stoffe in die Umgebung

FID:

Flammenionisationsdetektor

GC:

Gaschromatograph

Interquartilsabstand:

Statistische Kenngröße zur Beschreibung der Streuung innerhalb einer Wertereihe

IRK:

Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes und der obersten Landesbehörden

Kasuistik:

Beschreibung von Einzelfällen

MAK:

Maximale Arbeitsplatzkonzentration

MS:

Massenspektrometer

Median:

50-stes Perzentil, Zentralwert - statistische Kenngröße, die von der Hälfte der Werte über-, von der anderen Hälfte der Werte unterschritten wird

NIK:

Niedrigste interessierende Konzentration - Wert zur Beurteilung des Expositionsverhaltens von Baustoffen in Kammerversuchen

NIOSH:

National Institute of Occupational Safety and Health - amerikanisches Institut für Arbeitssicherheit und Gesundheit

NL:

Normliter, Volumen bezogen auf eine Lufttemperatur von 0 °C und einen Luftdruck von 1013 Hektopascal

PAK:

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Perzentil:

Prozentrang - statistische Kenngröße, die von der angegebenen Prozentzahl der Werte unter-, von den übrigen Werten überschritten wird

RW I / RW II:

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

SVOC:

Semi Volatile Organic Compounds (englisch) - schwerer flüchtige organische Verbindungen

TRGS:

Technische Regeln für Gefahrstoffe

TVOC:

Total Volatile Organic Compounds (englisch) - Gesamtmenge flüchtiger organischer Verbindungen

U-Test:

Mann-Whitney-Test - statistisches Verfahren zur Überprüfung der Übereinstimmung zweier Wertereien

VOC:

Volatile Organic Compounds (englisch) - flüchtige organische Verbindungen

VVOC:

Very Volatile Organic Compounds (englisch) - leichtflüchtige organische Verbindungen

µg/m³:

Konzentrationsangabe in Millionstelogramm pro Kubikmeter (entspricht 1000 Liter)

°C:

Temperaturangabe in Grad Celsius

l/min:

Volumenstrom in Litern pro Minute

1 Einleitung

Das Dezernat „Umweltbezogener Gesundheitsschutz“ im Landesamt für soziale Dienste des Landes Schleswig-Holstein hat unter anderem auch die Aufgabe der Feststellung der Schadstoffbelastung der Bevölkerung. Im Rahmen dieser Aufgabe wurden zum Schutz von Kindern vor flüchtigen organischen Verbindungen (VOC = volatile (flüchtige) organische Chemikalien, z.B. Lösemittel) in Schleswig-Holstein zuletzt vor 15 Jahren in einer Referenzwertstudie die Hintergrundwerte der Innenraumluftkonzentrationen von VOC in 300 Räumen von Schulen und Kindergärten ermittelt [1].

In den letzten Jahren hat sich das Substanzspektrum der flüchtigen Innenraumluftkontaminanten gewandelt, wie eigene Untersuchungen aus Schadensfällen zeigen, so dass die Referenzwerte von 1994 nicht mehr aktuell sind. In Zusammenarbeit mit den Gesundheitsbehörden der Kreise und kreisfreien Städte und den jeweiligen Schulträgern sollte deshalb durch die hier vorgestellte Studie die Datenbasis zum Vorkommen von Luftschadstoffen aktualisiert werden. Denn Innenraumlufthygiene an Schulen und Kindergärten ist nach wie vor ein intensiv diskutiertes Thema, wie auch der kürzlich neu aufgelegte Schulleitfaden zeigt [2]. Auslöser für Klagen über unzureichende Raumluftqualität sind der häufig schlechte bauliche Zustand der Schulen und der nach einer Sanierung oder bei einem Neubaus weitgehend reduzierte (ungezielte)

Luftaustausch, der nicht durch ein angepasstes Lüftungsverhalten der Nutzerinnen und Nutzer kompensiert wird [17, 19]. Es wird zu wenig gelüftet und der Luftaustausch ist demzufolge ungenügend. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf allgemeine raumlufthygienische Parameter wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur sowie Kohlendioxidkonzentration, sondern kann auch zu einer stärkeren Anreicherung von organisch-chemischen Stoffen, den VOC, führen.

Unter dem Begriff flüchtige organische Verbindungen (VOC - englisch Volatile Organic Compounds) fasst man eine sehr heterogene Gruppe von unterschiedlichsten Stoffen zusammen, die praktisch immer in der Raumluft vorkommen und eine Luftverunreinigung darstellen. Die VOC werden durch den Siedepunkt charakterisiert und von den leicht flüchtigen (VVOC - Very Volatile Organic Compounds) und schwer flüchtigen (SVOC - Semi Volatile Organic Compounds) organischen Verbindungen unterschieden. Als VOC werden konventionsgemäß organische Verbindungen des Siedebereiches von 50 bis 260 °C bezeichnet [3].

In Tabelle 1 sind die wichtigsten VOC-Stoffklassen und ihre wesentlichen Quellen für den Innenraum aufgelistet. Weitere Hinweise zur Charakterisierung und Bedeutung der einzelnen genannten Stoffgruppen finden sich im Anhang 1.

Tabelle 1: Häufig in Innenräumen gemessene VOC und deren Quellen

VOC-Stoffgruppen	Quellen, Verwendungszweck
Alkane, Alkene und Cycloalkane	Kraftstoffe, Lösemittel in Lacken, Harzen und Fleckentferner
Aromatische Verbindungen	Kraftstoffe, Tabakrauch, Lösemittel, Teppichbodenrücken, Hartschaumprodukte
Terpene	Holzprodukte, Lösemittel, Duftstoffzusatz
Naphthalin	Bitumenplatten, Teerkleber, Teerpappen, Mottenschutz
Alkohole	Reiniger, Lösemittel, Abbauprodukte unter anderem aus Weichmachern
Aldehyde ¹⁾	Desinfektionsmittel, Alkydharzfarben, Ölfarben, Abbauprodukte aus Linoleum, Korkfußböden, Holzprodukte
Ketone	Lösemittel, Stoffwechselprodukt
Ester	Lösemittel, Weichmacher
Glykolether	Lösemittel in wasserlöslichen Farben und Lacken, Reiniger
Halogenierte Verbindungen	Entfettung, Lösemittel, chemische Reinigung, Korrekturflüssigkeit, Toilettenstein (1,4-Dichlorbenzol)
Siloxane	Lösemittel

1) außer Formaldehyd

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Probenahme



Foto 1: Aktive Luftprobenahme

2.2 Analytik

Die auf Aktivkohle gesammelten VOC wurden mit Schwefelkohlenstoff/Methanol (99:1) desorbiert. Anschließend wurde die Analyse gaschromatographisch unter paralleler Trennung auf zwei Säulen unterschiedlicher Polarität (DB-1: 60 m, ID 0,32 mm, Filmdicke 1 μm ; DB-WAXextra, 60 m, ID 0,32 mm, Filmdicke 0,5 μm mit dem Temperaturprogramm: 35 $^{\circ}\text{C}$ (7 min) \rightarrow 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 105 $^{\circ}\text{C}$ (19 min) \rightarrow 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 230 $^{\circ}\text{C}$ (20 min)) und einer Detektion mittels Flammenionisationsdetektor durchgeführt (GC 3800, AS 8400, Fa. Varian, Injektor: 200 $^{\circ}\text{C}$, Detektoren: 300 $^{\circ}\text{C}$). Die Kalibrierung erfolgte für 62 VOC („Standard-VOC“) vor jedem Analysenlauf mittels externer Standards in Pentan. Die Bestimmungsgrenze des Verfahrens liegt bei 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Für weitere circa 225 Stoffe sind die Retentionszeiten erfasst. Auffällige Signale, die nicht zu den 62 Standard-VOC gehören, wurden anhand dieser Retentionszeiten sowie gegebenenfalls über Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) identifiziert. Die Bestimmungsgrenze betrug für diese Stoffe 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; die Quantifizierung erfolgte als Toluoläquiva-

Die Luftproben wurden in der Zeit von Juli 2005 bis Februar 2007 von den zuständigen Gesundheitsbehörden der Kreise und der kreisfreien Städte Schleswig-Holsteins genommen. Diese trafen auch die Auswahl der Objekte und erhoben die gewünschten Daten zu den Gebäuden und Räumen. Die entsprechenden Fragebögen sind in Anhang 2 wiedergegeben. Es beteiligten sich 13 der 15 Kreise und kreisfreien Städte des Landes.

Die Probenahme erfolgte aktiv, indem jeweils 500 - 600 Liter Luft durch ein Probenahmeröhrchen mit Aktivkohle (Adsorptionsröhrchen Typ NIOSH, Probenahmpumpe Typ DESAGA 312, Volumenstrom 2,2 l/min) gesaugt wurden. Die Räume wurden am Vorabend der Probenahme letztmalig gelüftet, während der Probenahme blieben Fenster und Türen geschlossen („worst-case-Bedingungen“).

lent, das heißt die Signalhöhe wird für diese Substanzen mit dem Faktor von Toluol an Stelle der individuellen Faktoren in Raumluftkonzentrationen umgerechnet.



Foto 2: Gaschromatograph für die Raumluftanalytik

2.3 Auswertung

Statistische Auswertungen wurden mit dem Programm SPSS 11.5 vorgenommen. Da die VOC-Konzentrationen nicht normalverteilt sind, wurden Korrelationen mit nichtparametrischen Tests ermittelt (Signifikanztest: Mann-Whitney-U-Test, Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman).

Dabei wurden Befunde unterhalb der Bestimmungsgrenze mit der halben Bestimmungsgrenze ($0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für 62 „Standard-VOC“ und $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die übrigen VOC) berücksichtigt. Im Falle einer geringen Anzahl positiver Befunde für einen bestimmten Stoff beeinflusst dies sehr stark die errechneten statistischen Kennwerte. Für viele VOC kann sicherlich davon ausgegangen werden, dass sie in sehr geringer Konzent-

ration stets vorkommen, wenn auch unterhalb der Bestimmungsgrenze des Verfahrens.

Andererseits finden sich in der Substanzliste auch selten nachgewiesene Stoffe, welche ein eher spezielles Anwendungsspektrum im Innenraum haben und daher bei Nichtanwendung entsprechender Produkte tatsächlich nicht vorhanden sind, auch nicht in Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (zum Beispiel 1,4-Dichlorbenzol, Chlornaphthalin, Methylcyclosiloxane, Glykolverbindungen). Daher wurden zusätzlich die statistischen Kennwerte unter ausschließlicher Berücksichtigung positiver Befunde berechnet.

3 Allgemeine statistische Angaben

3.1 Beschreibung der beprobten Räume

Insgesamt wurden 285 Räume in 105 Gebäuden untersucht.

Aus den Angaben der Fragebögen zu den untersuchten Räumlichkeiten lässt sich der durchschnittliche Kindergarten- / Klassenraum in Schleswig-Holstein beschreiben:

Die Gebäude sind üblicherweise (91 %) aus Stein gebaut; Fertighäuser spielen eine entsprechend geringe Rolle, Holzhäuser sind die Ausnahme (1,7 %). Die Hälfte der Gebäude wurden nach 1970 errichtet (1886 bis 2005). Fast alle Räume werden ausschließlich manuell über Fenster gelüftet (99 %). Die Lüftungsmöglichkeiten werden als ausreichend angesehen (91 %). Pro Nutzerin und Nutzer steht eine Fläche von circa 2,3 m² (Median) zur Verfügung, in 88 % der Fälle mehr als die empfohlene Mindestfläche von 1,5 m² [2].

Jeweils circa ein Drittel der Zimmer ist mit Linoleum oder Kunststoffböden (Polyvinylchlorid (PVC), Laminat) ausgestattet und nur 20 % der Räume sind mit

einem Teppichboden ausgelegt. Andere Materialien wie Stein(zeug), Holz, Kork oder Kautschuk werden seltener verwendet. Die Wände sind zumeist verputzt und gestrichen (76 %). Holzverkleidungen an Decke oder Wänden sind in 19 % der Räume anzutreffen. Die Möbel weisen überwiegend Kunststoffoberflächen auf (60 %).

Die letzten Renovierungsarbeiten lagen in den meisten Fällen mehr als 12 Monate zurück (84 %). Von den Nutzerinnen und Nutzern wurden während der Erhebung nur selten Beschwerden über Geruch (10 %) geäußert oder Probleme mit Feuchtigkeit (5,6 %) beklagt. Diese Quoten entsprechen den Erwartungen, weil die Gesundheitsämter aufgefordert waren, nur solche Räume zu beproben, die nicht bereits zuvor durch Beschwerden der Nutzerinnen und Nutzer auffällig geworden waren. In der täglichen Beratungspraxis stehen hingegen Geruchsprobleme, im Zusammenhang mit Renovierungsarbeiten und/oder dem Fußboden, sowie Feuchtigkeitsprobleme (Schimmelpilzproblematik) im Vordergrund.

Tabelle 2: Übersicht: Durchschnittlicher Kindergarten- / Klassenraum

Bauart	Stein				
Baujahr	1970 (1886 - 2005)				
Lüftung	Manuell, ausreichend				
Fußbodenbelag	Linoleum oder Kunststoff / PVC				
Wände	Verputzt, gestrichen				
Möblierung	Kunststoffoberflächen				
Renovierung	Vor mehr als einem Jahr				
Fläche / Person, m ²	Min: 0,8	P5: 1,2	P25: 1,8	P50: 2,3	AM: 2,6

Min: Kleinster angegebener Wert;
P5, P25, P50: Perzentile;
AM: Arithmetisches Mittel.

3.2 Statistische Kennwerte

In den untersuchten 285 Proben ergaben sich insgesamt 8705 positive VOC-Befunde, die sich auf 138 Stoffe (von insgesamt circa 287 untersuchten Substanzen) verteilen. Von diesen wurde ein erheblicher Teil nur selten nachgewiesen: Gut 90 % der positiven Befunde entfallen auf die 53 häufigsten VOC, auf die verbleibenden 85 VOC verteilen sich hingegen lediglich knapp 10 % der Befunde.

Die Tabellen 3 bis 5 zeigen statistische Kenngrößen für die nachgewiesenen VOC sowie für ausgewählte Summen und Substanzklassen. Für eine bessere

Beschreibung der Konzentrationsverteilung wurden neben dem 50. Perzentil (Median) und dem 95. Perzentil, welches üblicherweise als Referenzwert herangezogen wird, auch das 25., 75. und 90. Perzentil berechnet. Die Kenngrößen sind für alle Substanzen aller Proben angegeben. Es sollte jedoch beachtet werden, dass dabei in vielen Fällen durch die geringe Anzahl positiver Befunde sehr niedrige Kennwerte berechnet werden. Für alle untersuchten Stoffe sind daher die statistischen Kennwerte bei ausschließlicher Berücksichtigung von Befunden oberhalb

der Bestimmungsgrenze (BG) in Anhang 3.2 aufgelistet.
Tabelle 3: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Name	n<BG	%>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM	GM
Alkane										
n-Hexan*	233	18	<1	<1	<1	1,0	3,0	3060	12	<1
n-Heptan	118	59	<1	1,0	2,0	4,0	5,0	33	1,7	1,1
n-Octan	172	40	<1	<1	1,0	2,0	3,0	350	2,7	<1
n-Nonan	195	32	<1	<1	1,0	2,0	6,0	230	2,5	<1
n-Decan	108	62	<1	1,0	2,0	7,0	17	180	4,2	1,3
n-Undecan	85	70	<1	1,0	2,0	5,0	17	200	4,7	1,4
n-Dodecan	119	58	<1	1,0	1,5	4,0	8,0	55	2,1	1,1
n-Tridecan	166	42	<1	<1	1,0	1,0	2,0	27	1,0	<1
n-Tetradecan	114	60	<1	1,0	1,0	1,0	2,0	15	1,0	<1
n-Pentadecan	144	49	<1	<1	1,0	1,0	2,0	7	<1	<1
n-Hexadecan	96	66	<1	1,0	1,0	1,0	2,0	4	<1	<1
n-Heptadecan	145	49	<1	<1	1,0	1,0	1,0	3	<1	<1
n-Octadecan	260	9	<1	<1	<1	<1	1,0	1	<1	<1
3-Methylhexan*	265	7	<2	<2	<2	<2	2,0	52	<2	<2
2-Methylheptan*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	14	<2	<2
3-Methylheptan*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	19	<2	<2
2,3-Dimethylpentan*	278	2	<2	<2	<2	<2	<2	19	<2	<2
2,4-Dimethylpentan*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	35	<2	<2
2,3,4-Trimethylpentan*	263	8	<2	<2	<2	<2	3,0	6	<2	<2
2,2,4-Trimethylpentan*	273	4	<2	<2	<2	<2	<2	6	<2	<2
Methylnonan*	277	3	<2	<2	<2	<2	<2	17	<2	<2
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	277	3	<2	<2	<2	<2	<2	280	2,0	<2
tetrameres Isobutan*	271	5	<2	<2	<2	<2	<2	6	<2	<2
Cyclohexan	202	29	<1	<1	1,0	3,0	4,7	28	1,2	<1
Methylcyclopentan	206	28	<1	<1	1,0	1,0	2,0	23	1,0	<1
Methylcyclohexan	190	33	<1	<1	1,0	2,0	3,7	145	1,7	<1
1,4-Dimethylcyclohexan*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
Ethylcyclohexan*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Alkene										
1-Hepten*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	12	<2	<2
5-Methylhexen-2*	270	5	<2	<2	<2	<2	2,0	51	<2	<2
1-Octen	273	4	<1	<1	<1	<1	<1	440	2,1	<1
2,4,4-Trimethylpenten-2*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
1-Decen	260	9	<1	<1	<1	<1	1,0	22	<1	<1
1-Tridecen*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
Trimeres Isobuten*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
3-Methylpentadien-1,3*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	6	<2	<2
4-Phenylcyclohexen*	285	0	--	--	--	--	--	--	--	--
1,5-Cyclooctadien*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Dicyclopentadien*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Alkohole										
Ethanol*	49	83	<2	2,0	4,0	8,0	13	43	3,6	2,1
1-Propanol	247	13	<1	<1	<1	1,0	3,0	410	2,5	<1
2-Propanol*	25	91	5,0	14	53	178	289	1200	64,6	16,7
1-Butanol	21	93	2,0	3,0	6,0	9,0	12	39	4,5	2,9
2-Butanol*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Isobutanol*	224	21	<2	<2	<2	2,0	4,0	92	1,3	<2
t-Butanol*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	5	<2	<2
Isoamylalkohol*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	13	<2	<2

Fortsetzung Tabelle 3: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Name	n<BG	%>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM	GM
2-Ethyl-1-hexanol	45	84	1,0	2,0	5,0	9,4	15	175	5,1	2,5
Benzylalkohol*	274	4	<2	<2	<2	<2	<2	260	2,5	<2
Aromaten										
Benzol	146	49	<1	<1	1,0	2,0	2,0	15	1,0	<1
Toluol	15	95	2,0	3,0	5,0	8,4	18	120	4,7	2,8
m-Xylol	76	73	<1	1,0	2,0	6,4	13	130	3,8	1,4
p-Xylol	131	54	<1	1,0	2,0	5,0	9,0	79	2,5	1,1
o-Xylol	109	62	<1	1,0	1,0	4,0	5,7	70	2,3	1,0
Ethylbenzol	103	64	<1	1,0	2,0	4,0	7,7	59	2,2	1,1
Styrol	186	35	<1	<1	1,0	2,0	4,0	18	1,2	<1
1,2,3-Trimethylbenzol*	279	2	<2	<2	<2	<2	<2	20	<2	<2
1,2,4-Trimethylbenzol	107	62	<1	1,0	2,0	5,0	8,0	109	2,8	1,1
Mesitylen	220	23	<1	<1	<1	1,0	2,0	26	1,1	<1
2-Ethyltoluol	215	25	<1	<1	<1	1,0	2,7	25	1,1	<1
3-Ethyltoluol	158	45	<1	<1	1,0	3,0	5,0	51	1,8	<1
4-Ethyltoluol*	274	4	<2	<2	<2	<2	<2	18	<2	<2
n-Propylbenzol	224	21	<1	<1	<1	1,0	2,0	29	1,0	<1
Isopropylbenzol*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Naphthalin	216	24	<1	<1	<1	1,0	3,7	22	1,1	<1
2-Methylnaphthalin*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	4	<2	<2
Decahydronaphthalin*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
Terpene										
α-Pinen	25	91	2,0	6,0	16	45	71	200	16	6,1
β-Pinen	117	59	<1	1,0	1,0	5,0	8,0	24	1,9	1,1
3-Caren	67	76	1,0	2,0	6,0	13	23	130	5,7	2,4
2-Caren*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Limonen	51	82	1,0	3,0	9,5	26	51	880	16	3,6
Camphen*	279	2	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Myrcen*	281	1	<2	<2	<2	<2	<2	13	<2	<2
α-Terpinen*	276	3	<2	<2	<2	<2	<2	5	<2	<2
γ-Terpinen*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	7	<2	<2
Cineol*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	11	<2	<2
Linalool*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
dl-Menthol*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	6	<2	<2
Pulegon*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	1	<2	<2
Longifolen	226	21	<1	<1	<1	1,0	1,7	10	<1	<1
Aldehyde, Ketone										
Butanal	241	15	<1	<1	<1	1,0	3,0	15	<1	<1
Pentanal	171	40	<1	<1	2,0	3,0	5,0	34	1,6	<1
Hexanal	128	55	<1	1,0	3,0	6,0	11	77	2,9	1,3
Heptanal*	268	6	<2	<2	<2	<2	2,0	7	<2	<2
Octanal*	265	7	<2	<2	<2	<2	2,0	10	<2	<2
Nonanal	121	58	<1	1,0	3,0	8,0	12	27	2,9	1,5
Decanal*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	4	<2	<2
Benzaldehyd	117	59	<1	1,5	4,0	7,0	9,0	46	3,0	1,5
Aceton*	109	62	<2	<2	3,0	9,0	22	300	5,9	2,1
Diisopropylketon*	281	1	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Methylisobutylketon*	271	5	<2	<2	<2	<2	0,8	11	<2	<2
Cyclohexanon	214	25	<1	<1	0,8	1,0	1,7	12	<1	<1
2-Heptanon*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Acetophenon	211	26	<1	<1	1,0	1,0	1,0	18	<1	<1

Fortsetzung Tabelle 3: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Name	n<BG	%>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM	GM
Ester, Ether, Glykolderivate										
Ethylacetat*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	44	<2	<2
n-Butylacetat	85	70	<1	1,0	3,0	10	21	144	5,2	1,6
Isobutylacetat*	279	2	<2	<2	<2	<2	<2	26	<2	<2
Linalylacetat*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Dimethylphthalat	214	25	<1	<1	<1	1,0	1,7	13	<1	<1
Diethylphthalat	227	20	<1	<1	<1	1,0	1,0	7	<1	<1
Diisobutylphthalat*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
Dibutylether*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Ethylenglykolmonomethylether	198	31	<1	<1	2,0	4,0	7,0	59	2,1	<1
Ethylenglykolmonoethylether	276	3	<1	<1	<1	<1	<1	88	1,0	<1
Ethylenglykolmonobutylether	55	81	1,0	3,0	9,0	25	53	190	11	3,4
Phenoxyethanol	82	71	<1	1,0	4,0	8,0	16	150	4,4	1,7
2-Ethoxyethylacetat	270	5	<1	<1	<1	<1	1,0	5	<1	<1
Diethylenglykolmonomethylether*	280	2	<2	<2	<2	<2	<2	6	<2	<2
Diethylenglykolmonoethylether*	246	14	<2	<2	<2	4,9	16	232	4,3	<2
Diethylenglykoldiethylether*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	50	<2	<2
Diethylenglykolmonobutylether	99	65	<1	1,0	5,0	12,0	27	200	5,5	1,8
Butyldiglykolacetat	218	24	<1	<1	<1	1,0	1,0	13	<1	<1
Propylenglykolmonomethylether*	253	11	<2	<2	<2	2,4	12	120	2,7	<2
Propylenglykolmonoethylether*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2
Propylenglykolpropylether*	282	1	<2	<2	<2	<2	<2	63	<2	<2
Phenoxypropanol*	281	1	<2	<2	<2	<2	<2	13	<2	<2
Dipropylenglykol*	279	2	<2	<2	<2	<2	<2	21	<2	<2
Dipropylenglykolmonomethylether*	277	3	<2	<2	<2	<2	<2	120	2,4	<2
Methoxypropylacetat*	274	4	<2	<2	<2	<2	<2	4	<2	<2
Propylenglykoldiacetat*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	17	<2	<2
3-Methoxybutylacetat*	284	0	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiolmonoisobutyrat*	268	6	<2	<2	<2	<2	3,0	2000	15	<2
Propylenglykolmonobutylether*	247	13	<2	<2	<2	3,0	5,0	260	3,0	<2
Dipropylenglykolmono-n-butylether*	265	7	<2	<2	<2	<2	4,0	48	<2	<2
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiisobutyrat	159	44	<1	<1	1,0	2,0	3,0	15	1,1	<1
Sonstige										
1,1,1-Trichlorethan	280	2	<1	<1	<1	<1	<1	6	<1	<1
Trichlorethylen*	283	1	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
1,4-Dichlorbenzol	281	1	<1	<1	<1	<1	<1	5	<1	<1
1-Chlornaphthalin	246	14	<1	<1	<1	1,0	1,0	10	<1	<1
Cyclotetrasiloxan*	281	1	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2	<2
Cyclopentasiloxan*	234	18	<2	<2	<2	3,0	6,7	30	<2	<2
Benzothiazol*	277	3	<2	<2	<2	<2	<2	13	<2	<2

N < BG: Anzahl der Werte unterhalb Bestimmungsgrenze;

% > BG: Anteil der Werte oberhalb Bestimmungsgrenze;

P25, P50, P75, P90, P95: Perzentile;

Max: Maximaler gemessener Wert;

AM: Arithmetisches Mittel;

GM: Geometrisches Mittel;

Werte < BG sind mit der halben BG berücksichtigt;

*: Berechnet als Toluolequivalent.

Bei 33 der 285 Proben wurden zudem zahlreiche nicht identifizierte Kohlenwasserstoffe festgestellt. Erfahrungsgemäß und gemäß einer Überprüfung mittels GC-MS handelt es sich dabei ganz überwiegend um verzweigte und cyclische Alkane (flüssige Kohlenwasserstoffe).

Die Quantifizierung erfolgte als Toluoläquivalent für Signale ab 2 µg/m³. Die nachfolgend aufgelisteten Daten zeigen, dass derartige Lösemittelfraktionen in erheblichen Konzentrationen vorkommen können.

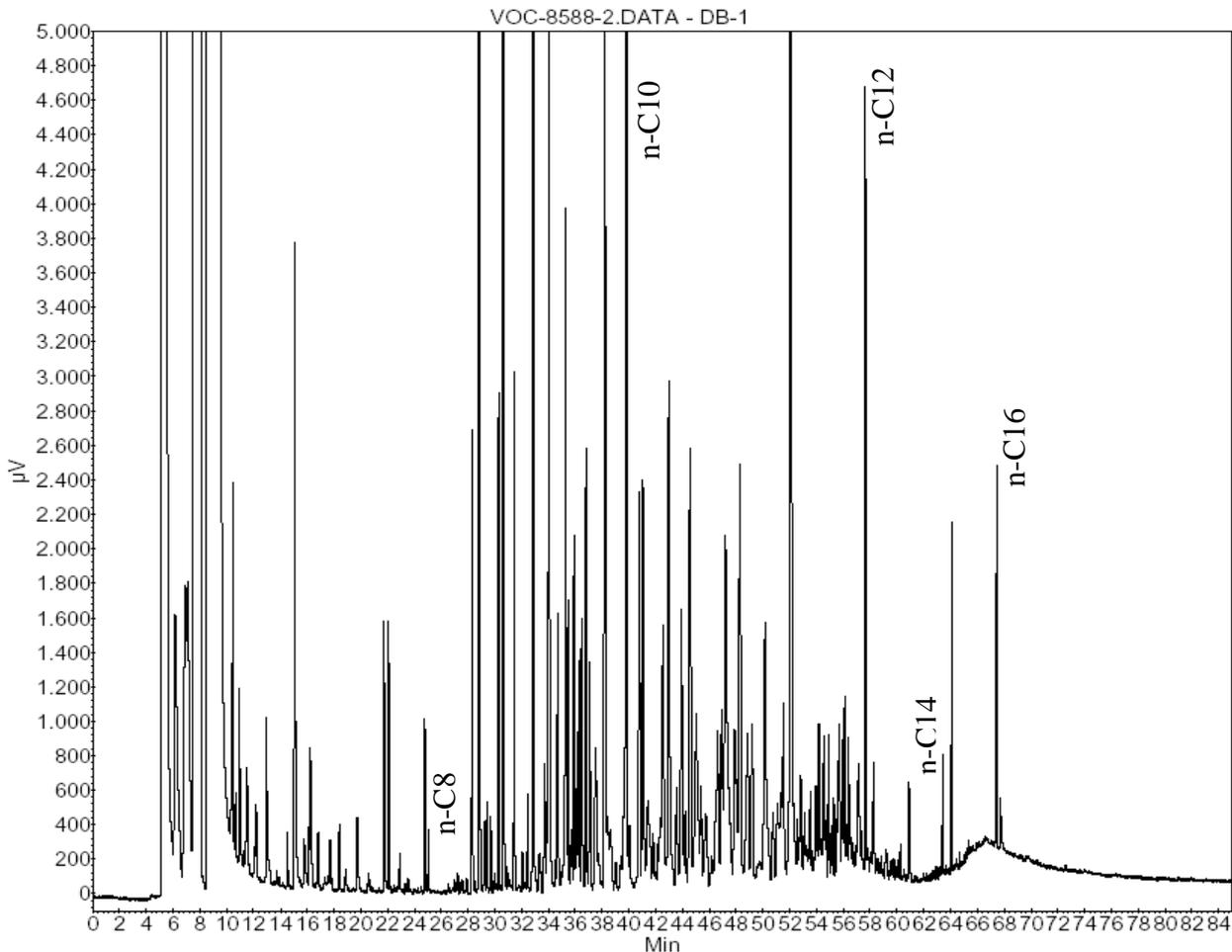


Bild 1: Typisches Chromtogramm einer Luftprobe mit „nicht identifizierten aliphatischen Kohlenwasserstoffen“ zwischen n-Octan (n-C8) und n-Tetradecan (n-C14)

Tabelle 4: Statistische Kennwerte zu „nicht identifizierte Kohlenwasserstoffe“ (KW), in µg/m³

	N	% von 285	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM	GM
nicht identifizierte KW*	33	12	33	70	285	1620	3010	4200	431	94
nicht identifizierte KW**	285	100	<2	<2	<2	22	97	4200	50,0	<2

*: Nur Proben > BG;

** : Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt

Zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurden die Kennwerte chemisch verwandter Substanzen zu Klassen zusammengefasst (Tabelle 5). Ferner wurden der TVOC-Wert (englisch: „Total Volatile Organic Compounds“), der alle Stoffe im Retentionsbereich von n-Hexan bis n-Hexadecan auf einer unpolaren Trennsäule summiert [4, 5], sowie

die Summe sämtlicher nachgewiesener VOC (Σ -VOC) im gesamten untersuchten Retentionsbereich bestimmt.

Histogramme zur Verteilung der Konzentrationen der Substanzklassen finden sich in Anhang 3.2.1 bis 3.2.8.

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen für verschiedene Substanzklassen, in µg/m³

Gruppe	n<BG	%>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM	GM
Alkane (ohne nicht identifizierte KW)	0	100	23	26	35	70	113	3469	53	32
Alkane (einschl. nicht identifizierte KW)	0	100	24	28	37	116	199	7669	104	37
Aromaten (ohne Naphthaline)	0	100	12	15	24	51	76	518	29	19
Alkohole	0	100	21	39	79	214	377	1213	88	45
Terpene	0	100	16	27	53	102	133	917	50	31
Aldehyde	0	100	6	10	15	28	46	160	14	11
Ester, Ether, Glykolderivate	0	100	32	41	66	120	210	2113	78	50
TVOC (einschl. nicht identifizierte KW)	0	100	124	168	288	479	849	8198	307	203
Σ-VOC (einschl. nicht identifizierte KW)	0	100	160	237	394	771	1023	8227	395	268

Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt

3.3 Einfluss der Probenahmetemperatur und der Luftfeuchtigkeit

Die untersuchten Proben wurden von den beteiligten Gesundheitsämtern innerhalb eines längeren Zeitraumes entnommen. Dadurch variieren die Lufttemperaturen während der Probenahmen:

Lufttemperatur	
Mittelwert	20,9
Minimum	12
25. Perzentil	19
50. Perzentil	21
75. Perzentil	23
95. Perzentil	25
Maximum	27

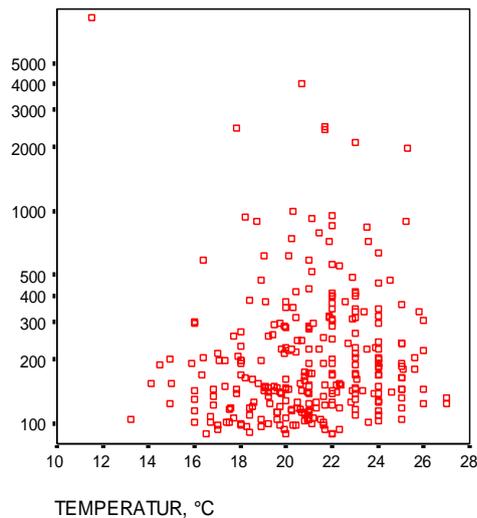


Bild 2: Verteilung der Lufttemperaturen bei der Probenahme (°C) und Korrelation mit TVOC

Die Abhängigkeit der VOC-Konzentration von der Lufttemperatur wurde anhand des TVOC-Wertes überprüft.

Es besteht eine zwar signifikante, jedoch nur schwache Korrelation zwischen diesen Parametern (siehe Anhang 3.3). Es wurde daher entschieden, die nach-

folgenden Auswertungen nicht nach der Temperatur zu differenzieren.

Die relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 33 % und 80 % (Median 53 %); eine Abhängigkeit der VOC-Konzentrationen von der Luftfeuchtigkeit war nicht nachweisbar.

3.4 Einfluss des Raumvolumens und der Raumebelegung

Die VOC-Belastung der Räume hängt nicht mit ihrer Größe zusammen. Sie steigt auch nicht mit der

Raumebelegung.

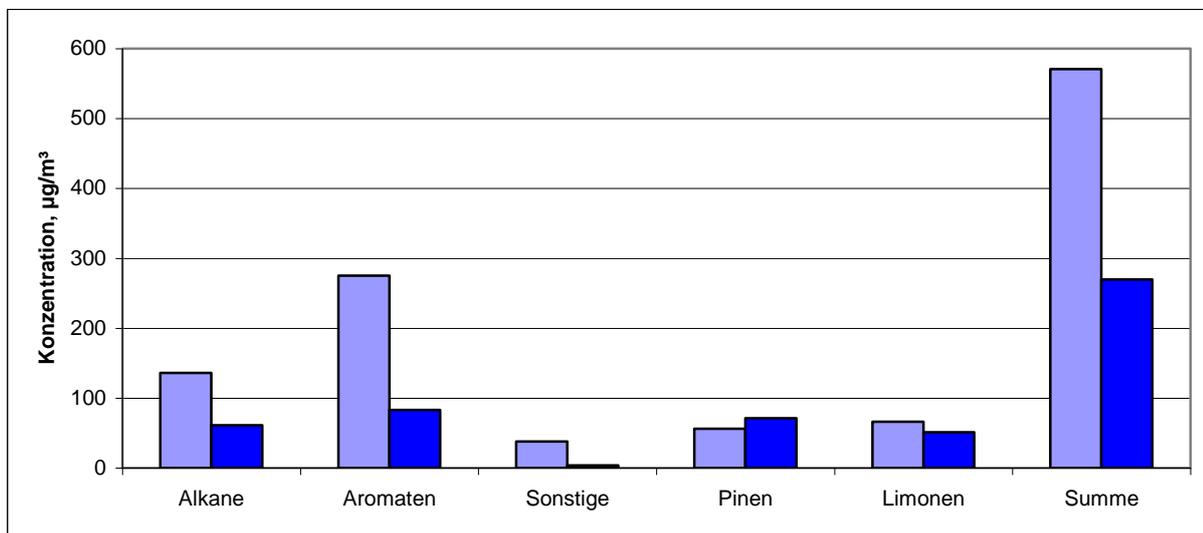
4 Vergleich mit anderen Studienergebnissen

4.1 Schleswig-holsteinische Schul- und Kindergartenstudie 1990/93

Bereits in den Jahren 1990 bis 1993 wurde in Schleswig-Holstein eine Studie zur Ermittlung der Konzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen in der Raumluft von Kindergärten und Schulen durchgeführt [1]. Ein direkter Vergleich kann nur für eine eingeschränkte Auswahl von VOC erfolgen, die in beiden Studien bestimmt wurden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um „klassische“ VOC wie Alkane und Aromaten.

ten VOC die Konzentrationen in den letzten 15 Jahren deutlich gesunken. Dies wird insbesondere bei den Referenzwerten deutlich, während die Mediane häufig unter oder nahe bei der Bestimmungsgrenze liegen, was den Vergleich erschwert. Die einzige Ausnahme in dieser Liste bildet α -Pinen, dessen Konzentration in der Raumluft gegen den Trend der übrigen hier genannten Stoffe angestiegen ist.

Wie Bild 3 und die nachfolgende Tabelle 6 zeigen, sind für nahezu alle in beiden Studien untersuch-



hellblau: UfU 1990/93 [1];
dunkelblau: LAsD 2005/07;
Summe: Summe der in beiden Studien untersuchten VOC.

Bild 3: Vergleich der Referenzwerte für ausgewählte Substanzklassen

Tabelle 6: Vergleich der Mediane (P 50) und Referenzwerte (P 95) der Schul- und Kindergartenstudien der Jahre 1990/93 [1] (n = 395) und 2005/07 (n = 285), in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Substanz	UfU 1990/93 P 50	LAsD 2005/07 P 50	UfU 1990/93 P 95	LAsD 2005/07 P 95
n-Heptan	0,9	<1	7,0	5,0
n-Octan	0,7	1,0	6,0	3,0
n-Nonan	1,0	<1	25	6,0
n-Decan	2,2	1,0	44	17
n-Undecan	2,3	1,0	31	17
n-Dodecan	1,2	1,0	11	8,0
Isooctan	0,1	<2	2,0	<2
Cyclohexan	1,0	<1	10	4,7
Benzol	1,5	<1	5,0	2,0
Toluol	8,8	3,0	95	18
m, p-Xylol	4,5	2,0	68	23
o-Xylol	1,9	1,0	22	5,7
Ethylbenzol	1,7	1,0	21	7,7
Styrol	0,6	<1	12	4,0
1,2,3-Trimethylbenzol	0,5	<2	14	<2
1,2,4-Trimethylbenzol	2,0	1,0	9,0	8,0
1,3,5-Trimethylbenzol	0,5	<1	10	2,0
3, 4-Ethyltoluol	0,2	1,5	10	6,0
n-Propylbenzol	0,7	<1	7,0	2,0
Naphthalin	0,6	<1	2,0	3,7
α -Pinen	4,5	6,0	56	71
Limonen	5,0	3,0	66	51
Ethylacetat	1,3	<2	22	<2
Chlornaphthalin	0,1	<1	1,0	1,0
1,1,1Trichlorethan	1,4	<1	13	<1
Trichlorethylen	0,1	<2	2,0	<2

Höhere Werte für Naphthalin sind methodisch bedingt (Verwendung von Methanol/CS₂ zur Desorption);
Kursiv: Sehr geringe Zahl positiver Befunde bei der Studie 2005/07;
Fallzahlen 1990/93 unbekannt.

Insgesamt kann jedoch nicht von einer gesunkenen Gesamtbelastung durch VOC ausgegangen werden. Vielmehr wurde in den aktuellen Proben des Jahres 2005 eine Vielzahl von Stoffen nachgewiesen (siehe Tabelle 3), die vor 15 Jahren nicht gefunden wurden. Weil sich die aktuelle Liste der untersuchten VOC durch Erfahrungen aus Schadensfällen etc. aus früheren Listen entwickelt hat, ist davon aus zu gehen, dass der größte Teil dieser VOC, zum Beispiel Alkohole, Glykolderivate, zu Beginn der neunziger Jahre im Innenraum gar nicht oder nur in seltenen Ausnahmefällen anzutreffen waren.

Diese neuen Stoffe gleichen, wie die Zahlen der Tabellen 3 bis 5 zeigen, die sinkenden Konzentrationen klassischer Lösemittelkomponenten mindestens aus. So liegt der Referenzwert der Summe aller gemessenen VOC (ΣVOC) im Jahr 2005/07 bei circa 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber circa 571 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in den Jahren 1990/93 [1]. Dabei dürften neben der oft geringeren Flüchtigkeit der „neuen“ Stoffe auch die in den letzten Jahren durch Dämmmaßnahmen verminderten Luftwechselraten und das Lüftungsverhalten eine Rolle spielen.

4.2 Studie zur Belastung von Klassenräumen in Süd-Bayern 2008 und Kinder-Umwelt-Survey 2008

Aktuell sind zwei Studien zum Vorkommen von VOC in Räumen, in denen sich Kinder vorwiegend aufhalten, erschienen, die zum Vergleich herangezogen werden können. Von Fromme et al [12] wurde 2008 über „Belastung von Klassenräumen“ aus 165 Schulen in Süd-Bayern berichtet. In dieser Untersuchung wurde das Verfahren der Tenax-Thermodesorption verwendet. Vom Umweltbundesamt (UBA) wurden 2008 die Ergebnisse des Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) [13, 14] veröffentlicht, in dem VOC in der Innenraumluft in Räumen, in denen sich Kinder am längsten zu Hause aufhalten (in 95 % der Fälle waren

dies Kinderzimmer), mittels Passivsammlern gemessen worden waren.

Die Ergebnisse dieser Studien sind in Tabelle 7 gegenübergestellt. Auch wenn die Verfahren zur Probenahme (Passivsammler, Tenax und Aktivkohle) und die Analytik (FID, Massenspektrometrie und Hochdruckflüssigchromatographie) unterschiedlich waren, erweisen sich die Innenraumbelastungen in den drei Studien als sehr ähnlich und für die meisten Verbindungen als nahezu übereinstimmend.

Tabelle 7: Vergleich der Raumluftgehalte in Schulen und Kindergärten aus Schleswig-Holstein (LAsD) mit den Ergebnissen der Schulstudie Bayern (Bay) [12] und des Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) [13, 14]

Substanz	P50 Bay	P95 Bay	P50 KUS	P95 KUS	P50 LAsD	P95 LAsD
Alkane						
n-Heptan	0,1	9,9	1,4	22,8	1,0	5,0
n-Octan	-	-	1,1	10,3	<1	3,0
n-Nonan	1,3	6,0	<1,0	12,1	<1	6,0
n-Decan	0,6	3,7	1,4	14,9	1,0	17
n-Undecan	0,1	0,1	1,4	14,8	1,0	17
n-Dodecan	0,1	0,1	1,1	7,9	1,0	8,0
n-Tridecan	0,1	0,1	<1,0	4,2	<1	2,0
n-Tetradecan	2,1	4,8	1,7	5,4	1,0	2,0
n-Pentadecan	2,3	6,0	1,2	3,7	<1	2,0
n-Hexadecan	1,9	4,3	<1,0	2,3	1,0	2,0
n-Heptadecan	-	-	<1,0	2,0	<1	1,0
n-Octadecan	-	-	<1,0	2,0	<1	1,0
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	2,4	7,9	-	-	<2	<2
Cyclohexan	-	-	2,5	39,1	<1	4,7
Methylcyclohexan	0,1	4,4	1,1	26,5	<1	3,7
Alkohole						
1-Butanol	-	-	5,4	17,6	3,0	12
Isobutanol	-	-	<3,5	4,9	<2	4,0
2-Ethyl-1-hexanol	4,2	11,0	2,6	11,4	2,0	15
Aromaten						
Benzol	0,3	4,0	1,8	7,7	<1	2,0
Toluol	24,0	117,0	13,5	57,6	3,0	18
m-Xylol	2,5	9,1	3,2	16,0	1,0	13
p-Xylol	2,5	9,1	3,2	16,0	1,0	9,0
o-Xylol	-	-	1,2	5,5	1,0	5,7
Ethylbenzol	1,0	3,2	1,4	6,8	1,0	7,7
Styrol	-	-	<1,0	4,8	<1	4,0
1,2,3-Trimethylbenzol	-	-	<1,0	2,9	<2	<2
1,2,4-Trimethylbenzol	1,4	5,2	1,5	10,3	1,0	8,0
Mesitylen	-	-	<1,0	2,9	<1	2,0
2-Ethyltoluol	-	-	<1,0	2,3	<1	2,7
3-Ethyltoluol	-	-	<1,0	5,5	<1	5,0
4-Ethyltoluol	-	-	<1,0	2,6	<2	<2
n-Propylbenzol	-	-	<1,0	2,6	<1	2,0

Fortsetzung Tabelle 7: Vergleich der Raumluftgehalte in Schulen und Kindergärten aus Schleswig-Holstein (LAsD) mit den Ergebnissen der Schulstudie Bayern (Bay) [12] und des Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) [13, 14]

Substanz	P50 Bay	P95 Bay	P50 KUS	P95 KUS	P50 LAsD	P95 LAsD
Isopropylbenzol	-	-	<1,0	1,3	<2	<2
Naphthalin	-	-	<1,0	1,2	<1	3,7
Terpene						
α-Pinen	2,0	10,0	9,8	67,6	6,0	71
β-Pinen	0,7	4,5	1,2	8,3	1,0	8,0
3-Caren	0,5	3,8	2,6	22,7	2,0	23
Limonen	7,4	31,5	11,5	103	3,0	51
dl-Menthol	3,1	13,4	-	-	<2	<2
Longifolen	-	-	<1,0	1,8	<1	1,7
Aldehyde, Ketone						
Butanal	0,5	2,0	2,4	8,1	<1	3,0
Pentanal	-	-	3,7	10,6	<1	5,0
Hexanal	6,1	14,0	9,8	30,0	1,0	11
Heptanal	-	-	1,3	3,0	<2	2,0
Octanal	2,9	12,0	1,6	3,6	<2	2,0
Nonanal	8,3	22,0	7,2	14,7	1,0	12
Decanal	4,2	15,0	2,5	5,5	<2	<2
Benzaldehyd	0,3	3,9	2,9	6,6	1,5	9,0
Aceton	29,9	160,5	-	-	<2	22
Methylisobutylketon	-	-	<1,0	2,6	<2	0,8
Ester, Ether, Glykolderivate						
Ethylacetat	0,1	7,9	9,3	70,8	<2	<2
n-Butylacetat	-	-	4,1	30,7	1,0	21
Ethylenglykolmonomethylether	-	-	<1,0	1,2	<1	7,0
Ethylenglykolmonoethylether	-	-	<1,0	1,5	<1	<1
Ethylenglykolmonobutylether	6,5	70,5	1,4	10,3	3,0	53
Phenoxyethanol	5,4	39,1	<1,0	3,7	1,0	16
Diethylenglykolmonomethylether	0,1	0,1	-	-	<2	<2
Diethylenglykolmonoethylether	0,1	31,4	-	-	<2	16
Diethylenglykolmonobutylether	5,4	36,0	<1,0	6,0	1,0	27
Propylenglykolmonomethylether	-	-	-	-	<2	12
Phenoxypropanol	-	-	<1,0	<1,0	<2	<2
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiolmonoisobutytrat	-	-	<1,0	2,8	<2	3,0
Dipropylenglykolmono-n-butylether	-	-	<1,0	1,6	<2	4,0
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiisobutytrat	-	-	1,2	5,5	<1	3,0
Sonstige						
1,1,1-Trichlorethan	-	-	<1,0	<1,0	<1	<1
Trichlorethylen	-	-	<1,0	<1,0	<2	<2
1,4-Dichlorbenzol	-	-	<1,0	<1,0	<1	<1
Cyclopentasiloxan	20,0	184,0	-	-	<2	6,7

Statistische Kenngrößen Median und 95. Perzentil in µg/m³;
 Anzahl der Räume: Bay (n = 165), LAsD (n = 273), UBA (n = 555);
 P50, P95: Perzentile;
 Werte < BG sind berücksichtigt.

Unterschiede bestehen im Hinblick auf das Vorkommen von Benzol und Toluol. Diese beiden Aromaten kommen in der vorliegenden Studie seltener und in geringeren Konzentrationen vor. Dafür finden wir für Naphthalin etwas höhere Werte, was vermutlich auf die Verwendung als Feuchtesperre im Fußbodenaufbau zurückzuführen ist, eine Baukonstruktion, die ein häufiger Grund für Untersuchungen von Schadensfällen in Schleswig-Holstein ist.

In der KUS-Studie wurde der nach dem TVOC-Konzept als hygienisch unbedenklich bewertete Konzentrationsbereich von bis zu 0,3 mg TVOC/m³ nur in 55 % der Fälle eingehalten. In der vorliegenden Studie betrug der Anteil hygienisch unauffälliger Räume immerhin 78 % (s. Abschnitt 7.2).

5 Vorkommen „neuerer“ VOC als Innenraumluft-Kontaminanten

Durch technische Entwicklung und sich ändernde Anforderungen des Marktes sind die im Innenraum eingesetzten Produkte und damit auch deren Emissi-

onen einem steten Wandel unterworfen. Das Vorkommen einiger „neuerer“ VOC oder Stoffgruppen wird im Folgenden näher beleuchtet.

5.1 Ester, Ether und Derivate mehrwertiger Alkohole

Die Entwicklung wasserbasierter Farben und Kleber erforderte den Einsatz von Stoffen, welche die Dispersionen stabilisieren und eine Trennung der wässrigen Phase von den unpolaren eigentlichen Funktionsbestandteilen verhindern. Diese Aufgabe wird sehr häufig von Estern und Ethern, insbesondere von mehrwertigen Alkoholen, nachfolgend vereinfacht Glykolderivate genannt, übernommen. Die Synthesemöglichkeiten dieser Stoffe erlaubt eine sehr weite Variation der technischen Eigenschaften. Andererseits bedingt gerade dies eine sehr große Zahl unterschiedlicher Verbindungen, die im Innenraum je nach eingesetztem Produkt mehr oder minder häufig nachgewiesen werden.

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist, wurden 31 verschiedene Ester, Ether und Glykolderivate in mindestens einer Probe gefunden. 12 dieser VOC kamen in jeder zehnten Probe und noch häufiger (bis 80%) vor. Für diese Verbindungen ist die relative Häufigkeit positiver Befunde (%-Anteil oberhalb der Bestimmungsgrenze) in Bild 4 gezeigt. Die dominierenden VOC dieser Stoffklasse sind gemessen an der Häufigkeit ihres Auftretens n-Butylacetat, Ethylenglykolmonobutylether, Diethylenglykolmonobutylether sowie Phenoxyethanol (dunklere Balken). Die Phthalate (Phthalsäuredimethyl- und -diethylester) nehmen hingegen trotz breiter Anwendung, zum Beispiel in Wandfarben, keine herausragende Stellung ein.

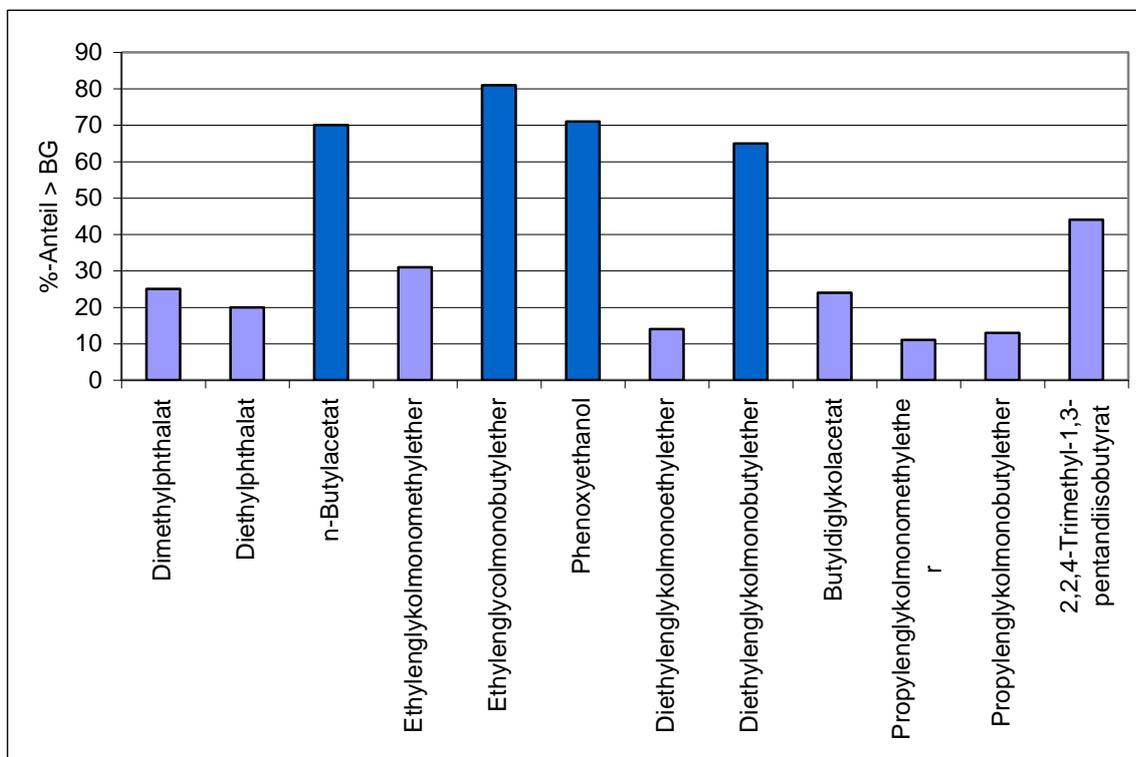


Bild 4: Häufigkeit positiver Befunde für die wichtigsten Ester, Ether und Glykolderivate

Die Referenzwerte (95. Perzentile) der wichtigsten Ester, Ether und Glykolderivate sind in Bild 5 gegenübergestellt. Wenngleich für diese Verbindungen derzeit noch keine toxikologisch begründeten Richtwerte vorliegen, erreichen die Referenzwerte der meisten dieser VOC-Gruppe in der Regel keine Konzentration, die geeignet erscheint, „insbesondere für empfindliche Personen bei Daueraufenthalt in den Räumen eine gesundheitliche Gefährdung darzustellen“ [6, 7]. Eine Ausnahme bilden Ethylenglykolmonomethylether (2-Methoxyethanol, EGMME) und Propylenglykolmonomethylether (PGMME, genauer das Isomer 2-Methoxy-1-propanol), die auf Grund ihrer toxikologischen Eigenschaften (reproduktionstoxisch Kategorie 2 gem. Richtlinie 67/548/EWG) kritischer zu bewerten sind [6]. Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass es in Ein-

zelfällen durchaus zu erheblichen Konzentrationen einiger Glykolderivate in der Raumluft kommen kann. Die in dieser Studie festgestellten Konzentrationen unterstreichen für diese Stoffe die Notwendigkeit einer toxikologischen Bewertung und Richtwertsetzung für die Innenraumluft.

Interessant ist an dieser Stelle ein Vergleich, wie sich die unterschiedliche Berücksichtigung von Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze (< BG) auf die berechneten Referenzwerte auswirkt. Dazu ist in Bild 5 für jeden Stoff dem Wert unter Einbeziehung von Befunden < BG mit der halben BG (blau) der Wert bei alleiniger Betrachtung der positiven Befunde (> BG, gelb) gegenübergestellt.

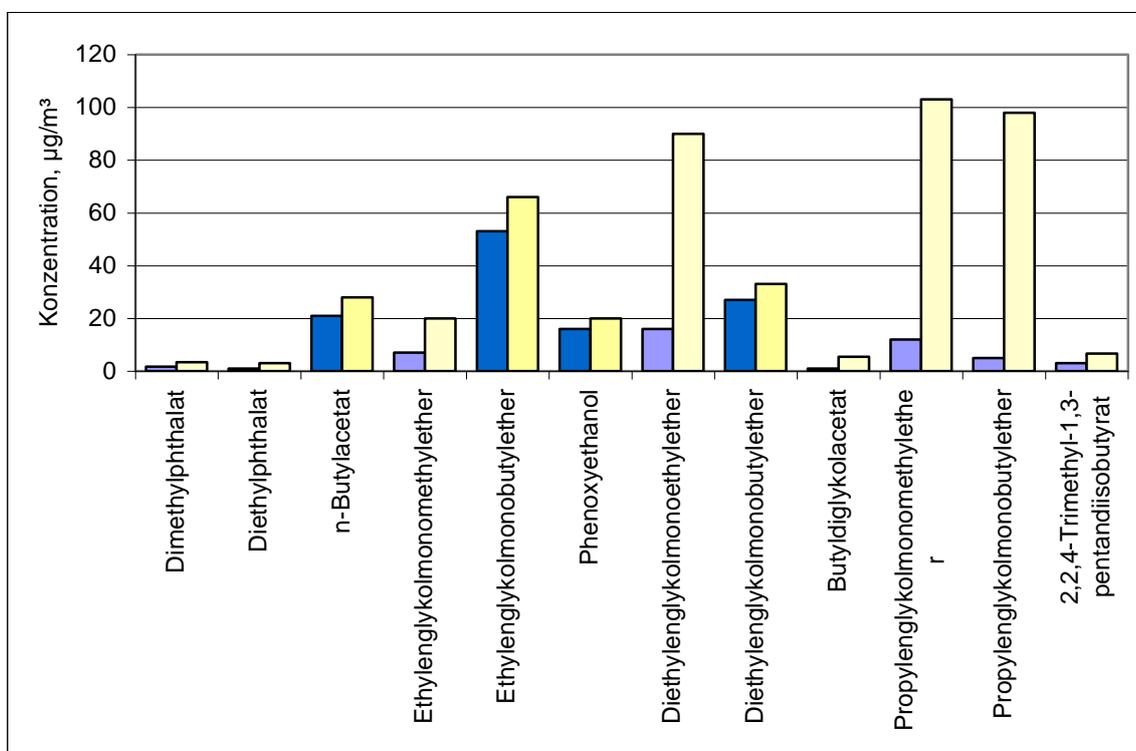


Bild 5: Referenzwerte mit (blau) und ohne (gelb) Berücksichtigung von Befunden kleiner der Bestimmungsgrenze (< BG)

Bei sehr selten vorkommenden VOC ergibt sich durch die Vielzahl von sehr kleinen Werten (1/2 BG) ein erheblich niedrigerer Referenzwert, als wenn nur positive Befunde betrachtet werden. Die Entscheidung, welcher Wert der „richtige“ ist, ist problematisch. Zumindest sind beide Werte unterschiedlich zu interpretieren:

Referenzwerte, die unter Berücksichtigung von Befunden < BG errechnet wurden, beschreiben sicherlich besser die in „normalen“ Räumen zu erwartenden

Konzentrationen und die durchschnittliche Belastung der Bevölkerung.

Andererseits kann vielfach davon ausgegangen werden, dass solche Stoffe nicht in jedem Raum in sehr geringer Konzentration vorkommen, sondern tatsächlich nur dann anzutreffen sind, wenn ein entsprechendes Produkt eingesetzt worden ist. Die in einem solchen Fall zu erwartenden Konzentrationen werden besser beschrieben, wenn Befunde < BG nicht berücksichtigt werden.

5.2 Cyclische Methylsiloxane

Den cyclischen Methylsiloxanen wird erst seit etwa 15 Jahren Beachtung als mögliche Innenraumluftkontaminanten geschenkt. Verwendung finden diese Stoffe in Lacken und anderen Beschichtungsmitteln, in „Deo-Rollern“ sowie eventuell in Mitteln zur Fassadenhydrophobierung [8].

Es hat sich gezeigt, dass insbesondere zwei Mitglieder dieser Verbindungsklasse, Octamethylcyclotetrasiloxan (D4) und Decamethylcyclopentasiloxan (D5), häufiger nachgewiesen werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen kamen diese Stoffe jedoch nur selten vor. In 51 Proben wurde D5 und in lediglich vier Proben D4 gefunden.

Tabelle 8: Kennwerte für Decamethylcyclopentasiloxan (D5) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

N = 51	Mittelwert	P 50	P 90	P 95	Maximum
LAsD (2005/07)	5,8	3,0	7,0	12	30
P. Pliening (1998) [8]	8,8	1,7	20,2	---	128

Für Siloxane in der Innenraumluft existieren bislang nur wenige Vergleichswerte. Das in Tabelle 8 ange-

gebene Beispiel zeigt jedoch, dass in den untersuchten Objekten eher niedrige Konzentrationen vorlagen.

5.3 Naphthalin

Naphthalin ist kein „neuer“ oder aktuell in der Bauchemie verwendeter Stoff, sondern in der Regel eine Alltatsache. Es ist aber in den letzten Jahren vermehrt

auffällig geworden, vor allem wegen seines unangenehmen, anhaftenden Geruchs bei relativ niedriger Geruchsschwelle [9]. Erfahrungen aus Schadensfällen in öffentlichen Gebäuden lassen vermuten, dass erhöhte Naphthalin-Konzentrationen sehr häufig mit dem Einsatz von Parkettklebern, die polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) enthielten, und / oder mit teerhaltigen Dampfsperren im Fußbodenaufbau von Altbauten zusammenhängen.

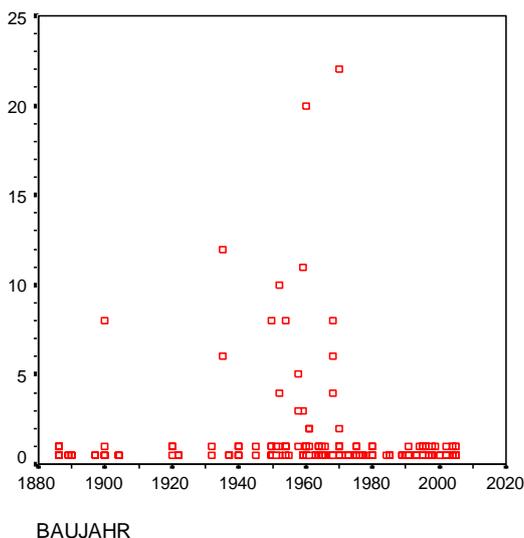


Bild 6: Baujahr und Naphthalin-Belastung

Bild 6 zeigt, dass auch bei den hier untersuchten Beschwerden freien Räumen erhöhte Naphthalin-Konzentrationen, ganz überwiegend in Gebäuden der Baujahre von circa 1930 bis 1970, zu finden sind.

Die Naphthalin-Konzentration in Räumen mit Holzfußböden war höher als bei anderen Bodenbelägen (Tabelle 9). Abhängigkeiten hinsichtlich der Beschaffenheit der Wände oder des Renovierungszeitraumes ergaben sich hingegen nicht. Allerdings ist auch hier wieder die geringe Anzahl von Befunden oberhalb der Bestimmungsgrenze zu beachten.

Tabelle 9: Kennwerte für Naphthalin in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Abhängigkeit vom Bodenbelag und Signifikanz des Unterschiedes zwischen Holzfußböden und anderen Belägen

	N > BG	P 50	P 90	P 95	Signifikanz p
Holz (n = 21)	11	1	18	22	---
Linoleum (n = 101)	27	0,5	1	3	0,014
Teppich (n = 57)	12	0,5	1	4	0,005
Kunststoff (n = 94)	18	0,5	1	2	0,001

Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt

6 Einflussfaktoren für die VOC-Belastung von Innenräumen

6.1 Renovierungsmaßnahmen und VOC-Belastung

Allgemein ist unmittelbar nach Renovierungsmaßnahmen mit erhöhten VOC-Konzentrationen zu rechnen, denen mit entsprechenden Lüftungsmaßnahmen zu begegnen ist. Nach etwa zwei Monaten sollten sich die VOC-Konzentrationen bereits deutlich verringert haben und nach circa 12 Monaten sollte ein „Gleichgewicht“ auf niedrigem Konzentrationsniveau erreicht sein [16]. Die beprobten Räume wurden daher abhängig vom Renovierungszeitraum in zwei Kategorien geteilt (Renovierung vor zwei bis 12 Monaten - 45 Fälle - oder vor mehr als 12 Monaten - 235 Fälle; fünf Fälle ohne Angabe). Tabelle 10 und Bild 6 zeigen die Ergebnisse einer Auswertung der Konzentrationen verschiedener Substanzklassen und des TVOC in Abhängigkeit vom Renovierungszeitraum.

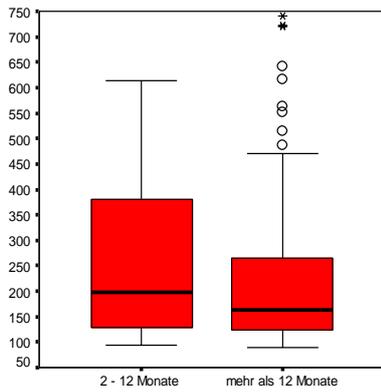
Die Boxplots (Erläuterung siehe Anhang 6.1) in Bild 7 zeigen für die Substanzklassen TVOC, Alkane, Aromaten, Glykole und bicyclische Terpene in Räumen,

die vor zwei bis 12 Monaten renoviert worden sind, eine wegen höherer 75. Perzentile größere Streuung (Interquartilsabstand) als bei Räumen mit länger zurückliegender Renovierung. Dies legt nahe, dass zumindest für diese Substanzklassen im zeitlichen Zusammenhang mit Renovierungen tendenziell höhere Konzentrationen gefunden werden. Statistisch signifikant ist der Zusammenhang jedoch nur für Aromaten und bicyclische Terpene (U-Test, Signifikanzniveau $p \leq 0,05$). Auch die 90. und 95. Perzentile bestätigen die Abhängigkeit der VOC-Konzentrationen vom Renovierungszeitraum nur teilweise (Tabelle 10) - extreme Belastungen können demnach auch in bereits seit langer Zeit nicht renovierten Räumen vorkommen. In solchen Fällen ist zu berücksichtigen, dass die flüchtigen Verbindungen auch durch Reinigungsmittel und / oder Arbeitsmaterialien regelmäßig eingetragen werden können [10].

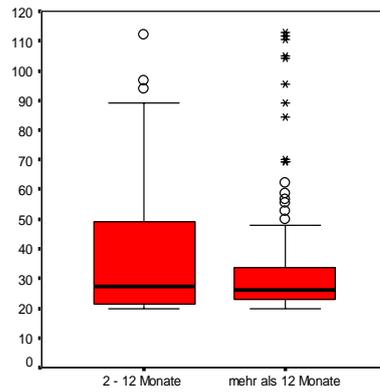
Tabelle 10: Perzentile (50., 90. und 95.) für verschiedene Substanzklassen in Abhängigkeit vom Renovierungszeitraum (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Renovierung vor	P 50	P 90	P 95	Signifikanz
TVOC	2 - 12 Monaten	198	876	948	0,180
	mehr als 12 Monaten	164	424	752	
ALKANE	2 - 12 Monaten	30	95	119	0,448
	mehr als 12 Monaten	27	60	117	
AROMATEN	2 - 12 Monaten	21	131	352	0,032
	mehr als 12 Monaten	15	39	60	
TERPENE	2 - 12 Monaten	33	109	529	0,259
	mehr als 12 Monaten	26	102	132	
BICYCLISCHE TERPENE	2 - 12 Monaten	18	65	96	0,031
	mehr als 12 Monaten	11	71	102	
GLYKOLE	2 - 12 Monaten	42	194	303	0,883
	mehr als 12 Monaten	41	112	195	
ALKOHOLE	2 - 12 Monaten	52	181	228	0,712
	mehr als 12 Monaten	39	227	433	
ALDEHYDE	2 - 12 Monaten	8	17	31	0,143
	mehr als 12 Monaten	10	30	47	

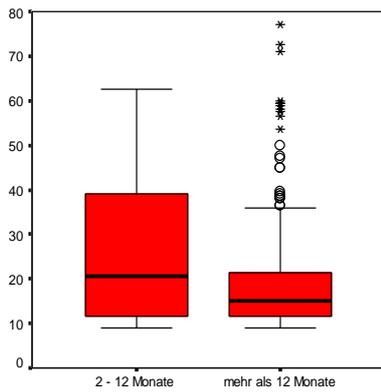
Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt



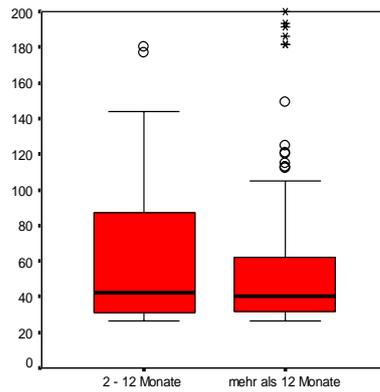
RENOVIERUNG



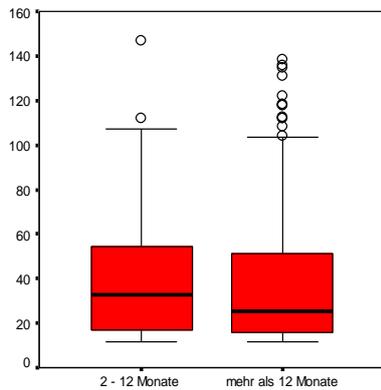
RENOVIERUNG



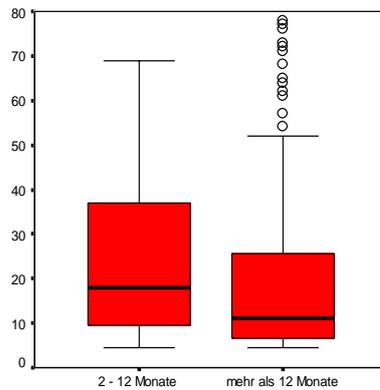
RENOVIERUNG



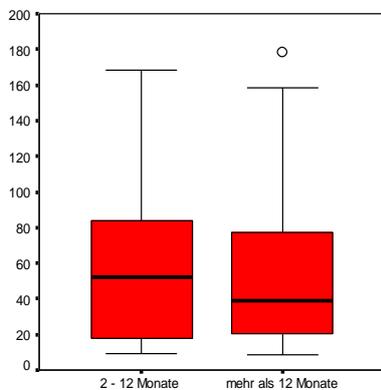
RENOVIERUNG



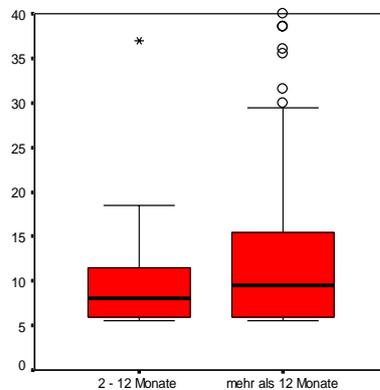
RENOVIERUNG



RENOVIERUNG



RENOVIERUNG



RENOVIERUNG

Bild 7: Boxplots zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen VOC-Konzentrationen und Renovierungszeitraum

Das Fehlen eines Zusammenhangs zwischen Renovierung und der Konzentration von Alkoholen in der Raumluft ist soweit plausibel, als hier mit Ethanol und Propanolen auch solche erfasst sind, die erheblichen Teils aus Reinigungsmitteln stammen dürften. Gleiches gilt für das Limonen, so dass somit auch der Unterschied zwischen den Terpenen insgesamt (einschließlich Limonen) und den bicyclischen Terpenen (vor allem Pinene, Caren, ohne Limonen) verständlich erscheint.

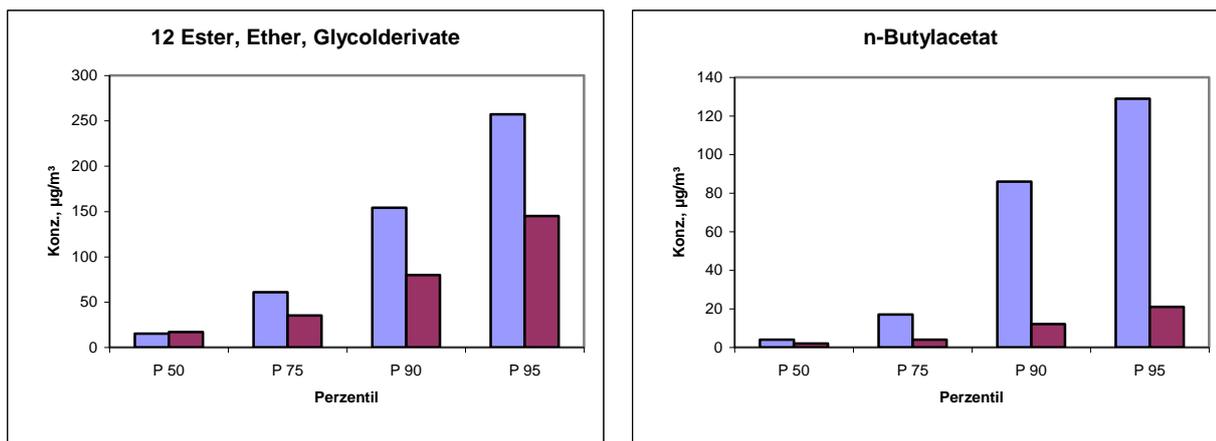
Bei Aldehyden scheint eine umgekehrte Tendenz ableitbar - die Konzentrationen liegen in unrenovierten Räumen etwas höher. Allerdings ist der Unterschied statistisch nicht signifikant. Ein Zusammenhang zwischen Ausstattungsmerkmalen (Beschaffenheit von Wänden, Fußboden, Möbeln) und Aldehydkonzentrationen lässt sich nicht feststellen.

Die Kennwerte für die Konzentration der Summe der zwölf häufigsten Ester, Ether und Glykolderivate sind

in Bild 8 in Abhängigkeit vom Renovierungszeitraum gezeigt. Befunde unterhalb der Bestimmungsgrenze wurden nicht berücksichtigt. Es scheint ein Trend erkennbar, dass die Konzentrationen in kürzlich renovierten Räumen höher sind, als in Räumen, in denen seit mehr als einem Jahr keine Maßnahmen mehr durchgeführt worden sind. Dies ist jedoch statistisch nicht signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit: $p \geq 0,9$).

Eine signifikante Abhängigkeit vom Renovierungszeitraum zeigt n-Butylacetat (Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,006$). Ähnliche Tendenzen zeigen ferner 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandioldiisobutytrat (TXIB) und Ethylenglykolmonomethylether. Wegen der insgesamt geringen Fallzahl ist der Zusammenhang hier unsicher.

Ebenfalls wegen zu geringer Fallzahl lassen sich keine Ausstattungskriterien wie Fußbodenbeläge, Wandbeschaffenheit oder Möbeloberflächen identifizieren, die zu den höheren Konzentrationen führen könnten.



blau: Renovierung vor zwei bis 12 Monaten, violett: Renovierung vor mehr als 12 Monaten

Bild 8: Statistische Kennwerte (ohne Berücksichtigung von Werten < BG) für die Konzentration ausgewählter VOC in Abhängigkeit von Renovierungszeitraum

6.2 Einfluss der Raumausstattung

6.2.1 Fußbodenbelag

In der täglichen Beratungspraxis scheinen in öffentlichen Gebäuden am häufigsten Probleme mit dem Fußbodenbelag zu bestehen. Grund hierfür mag sein, dass der Fußboden einen vergleichsweise komplexen Aufbau aus dem eigentlichen Belag, dem Kleber so-

wie gegebenenfalls einer Grundierung sowie einer Ausgleichsmasse aufweist. Je nach Art des Belages kommen verschiedene Mittel zur Reinigung oder Oberflächenversiegelung hinzu.

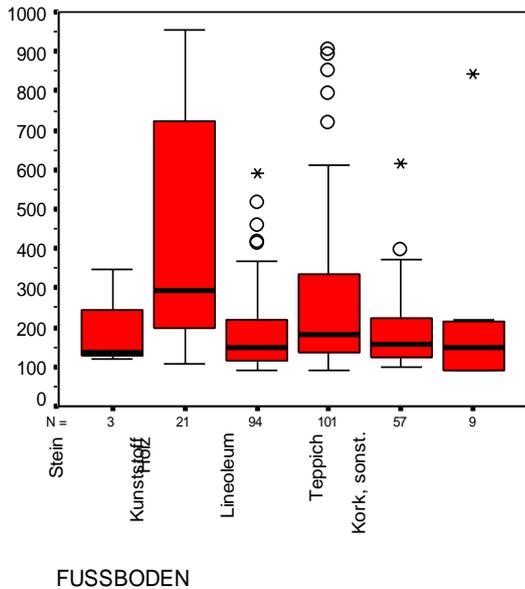


Bild 9: TVOC und Fußbodenbelag

Bild 9 zeigt die Kennwerte für den TVOC-Wert differenziert nach der Art des Fußbodenbelages. Dabei zeigt sich, dass Holzfußböden im Vergleich zu anderen Bodenbelägen signifikant erhöhte VOC-Konzentrationen aufweisen (Tabelle 11). Mit einem Median von $294 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (auf der Basis von 21 Proben) unterschreitet nur etwa jedes zweite Zimmer mit Holzfußboden die Obergrenze der TVOC-Stufe 1 (hygienisch unbedenklich) von $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fast jedes zehnte Zimmer fällt in die TVOC-Stufe 3 (hygienisch auffällig). Zwar wurde ein überproportionaler Anteil der Räume mit Holzfußboden innerhalb der letzten 12 Monate renoviert (48% gegenüber 16% im gesamten Datensatz), doch sind die VOC-Kennwerte der vor mehr als 12 Monaten renovierten Räume mit Holzfußboden höher als die der vor zwei bis 12 Monaten renovierten Räume. Ein Zusammenhang mit dem Renovierungszeitpunkt erscheint daher eher unwahrscheinlich.

Tabelle 11: Irrtumswahrscheinlichkeit (U-Test) für den Unterschied in der TVOC-Konzentration zwischen verschiedenen Bodenbelägen

TVOC bei	Holz	Linoleum	Teppichboden	Kunststoff
Holz höher als	--	0,014	0,001	0,000
Linoleum höher als	--	--	0,130	0,004

Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt

Für Holz sind die TVOC-Wert im Vergleich zu anderen Belägen immer höher, für Linoleum ergeben sich nur im Vergleich zu Kunststoffböden signifikant höhere TVOC-Konzentrationen.

Im Anhang 6.2.1a finden sich die Boxplots für verschiedene Substanzklassen und die Irrtumswahrscheinlichkeiten. Auch hier bestätigen sich zumeist die vergleichsweise hohen Konzentrationen bei Räumen mit Holzfußboden. Bei den Bodenarten „Stein“ und „Kork, Sonstiges“ ist die sehr geringe Fallzahl zu beachten; sie sind der Vollständigkeit halber jedoch ebenfalls aufgeführt.

Für die wichtigsten Bodenbeläge Holz, Linoleum, Kunststoff und Teppichboden sind der entsprechenden Tabelle 6.2.1b des Anhangs die Irrtumswahrscheinlichkeiten angegeben. Soweit die den Boxplots zu entnehmenden Unterschiede signifikant sind, sind es stets die Räume mit Holz- oder Linoleumböden, die gegenüber den übrigen Bodenbelägen die höheren

Konzentrationen aufweisen. Betroffen sind vor allem Terpene, Aromaten und Aldehyde. Ursache für die gefundenen leicht höheren VOC-Konzentrationen bei diesen Bodenbelägen muss nicht zwangsläufig das Material selbst sein. So erfordern Holz und Linoleum anders als Teppichboden oder PVC regelmäßige Pflege mit Mitteln, die ihrerseits auf natürlichen oder synthetischen Ölen und Wachsen basieren und somit flüchtige Stoffe in die Raumluft abgeben. Dies ist jedoch erfahrungsgemäß unproblematisch, wenn nach den Reinigungs- und Pflegemaßnahmen auf ausreichende Lüftung geachtet und die Grundreinigung nicht während des Schulbetriebes durchgeführt wird.

Keinesfalls sollte mit dem Ziel einer geringeren VOC-Belastung auf die nötigen Pflegemaßnahmen verzichtet werden. So zeigen Linoleumböden, bei denen - zumeist aus Kostengründen - die Versiegelung nicht oder nur selten durchgeführt wird, nach unseren Erfahrungen häufig erhöhte Emissionen von Hexanal; zudem verringert sich die Haltbarkeit der Böden.

6.2.2 Holz an Wänden, Decke, Fußboden

Wie gezeigt, wurden in Räumen mit Holzfußböden häufig höhere VOC-Konzentrationen gemessen als in Räumen ohne Holzfußboden. Es liegt nahe, die Auswertung auf Holzverkleidungen allgemein, also an Wänden, Decken oder Fußböden, auszudehnen.

Auch hier findet sich ein signifikanter Unterschied für den TVOC-Wert in Räumen mit und ohne Holzverkleidungen und erwartungsgemäß ebenso für die Summe der Terpene. Eine differenziertere Betrachtung macht deutlich, dass dies nicht uneingeschränkt für alle Terpene gilt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Perzentile (50. und 95.) für Räume mit (n = 76) und ohne (n = 209) Holzverkleidungen

	Mit Holzverkleidung		Ohne Holzverkleidung		Signifikanz p
	P 50	P 95	P 50	P 95	
TVOC	199	1110	152	577	0,007
Bicycl. Terpene	21	125	11	88	0,001
Limonen	5	75	3	37	0,129
Aromaten	17	328	15	60	0,039

Alle Proben, Werte < BG mit der halben BG berücksichtigt

Zwar werden für Limonen in Räumen mit Holzverkleidung höhere Werte für Median und Referenzwert abgeleitet, im Gegensatz zu den bicyclischen Terpenen (vor allem Pinene, Carene) ist der Zusammenhang jedoch statistisch nicht signifikant. Für Limonen kommen also, wie schon diskutiert, andere Quellen in Betracht (siehe 6.1).

Außerdem zeigen die Konzentrationen aromatischer Kohlenwasserstoffe eine allerdings schwächer ausgeprägte Abhängigkeit vom Vorhanden sein oder Fehlen von Holzverkleidungen.

7 Raumlufthygienische Bewertung der untersuchten Proben

Die Bewertung von Raumlufthproben kann - soweit vorliegend - über Richtwerte für einzelne Stoffe erfolgen oder anhand der Gesamtbelastung im Siedebereich von n-Hexan bis n-Hexadecan (TVOC-Konzept, [5]). Beide Verfahren sind von der Ad-hoc-

Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und den Obersten Landesgesundheitsbehörden in [7] detailliert beschrieben worden.

7.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen

Für eine Reihe von VOC oder Stoffklassen sind in den vergangenen Jahren Richtwerte (RW I und RW II) festgelegt worden [7]. In den hier untersuchten Räumen werden diese nur in wenigen Fällen überschritten (Tabelle 13). Betroffen von Überschreitungen des Maßnahmewertes RW II waren insgesamt vier Räume

(1 %); zweimal durch Naphthalin und zweimal durch aliphatische Kohlenwasserstoffe. Der Zielwert RW I wurde in 24 Fällen (8 %) überschritten. Es handelte sich dabei um die Parameter Naphthalin und Alkane (Siedebereich n-Nonan bis n-Tetradecan, n-C9 bis n-C14), sowie um die bicyclischen Terpene.

Tabelle 13: Innenraum-Richtwerte für VOC im Verhältnis zum 95. Perzentil und Maximalwert

	RW I (µg/m ³)	RW II (µg/m ³)	Konz. P 95	Konz. MAX	Anzahl > RW I	Anzahl > RW II
Toluol	300	3000	18	120	0	0
Styrol	30	300	4	18	0	0
Bicyclische Terpene (Leit- substanz α-Pinen)	200	2000	162	299	2	0
Naphthalin	2	20	3,7 (11,5)*	22	15	2
Aromatenarme Kohlen- wasserstoffgemische (n-C9 bis n-C14)	200	2000	169	4208	9	2

*: 95. Perzentil bei ausschließlicher Berücksichtigung positiver Befunde für Naphthalin

Im Fall von Überschreitungen des Maßnahmenwertes (RW II) besteht im allgemeinen Handlungsbedarf, auf den in den Ergebnismitteilungen an die Gesundheitsbehörden der Kreise und kreisfreien Städte hingewiesen wurde. Von den Gesundheitsbehörden wurden diese Informationen an die Träger weiter geleitet und durch Nachmessungen kontrolliert, ob die veranlassenen Maßnahmen zu einem Absinken der erhöhten Werte geführt haben.

In der Tabelle 14 sind die Fälle mit Überschreitungen eines Maßnahmenwertes (RW II) zusammengefasst. Die durch Kohlenwasserstoffe (KW) verursachten RW II Überschreitungen waren auf zurückliegende Verwendung lösemittelhaltiger Produkte zurückzuführen, die bei den Nachkontrollen bereits wieder abgelüftet waren. In einem Fall einer RW II Überschreitung für Naphthalin wurde inzwischen ein Austausch der Feuchtigkeitssperre des Fußbodens vorgenommen.

Tabelle 14: Fälle mit Überschreitungen des Richtwertes II

Schule	Kreis/ Stadt	Richtwertüberschreitung	Maßnahmen
Theodor-Storm-Schule, R 2	Kiel	Naphthalin: 20 µg/m ³ = RW II, Handlungsbedarf	Mehrfache Kontrolle > RW I aber < RW II
RS Am Schiffstal	Plön	Naphthalin: 22 µg/m ³ > RW II, Handlungsbedarf	Sanierung
KiTa Regenbogen	Dithmarschen	KW: > RW II, Handlungsbedarf	Kontrollen unauffällig
Grundschule Delwe	Dithmarschen	KW: > RW II, Handlungsbedarf	Kontrollen unauffällig

Bei Überschreitungen des Zielwertes (> RW I aber < RW II) wird entsprechend der Handreichung der ad-hoc AG empfohlen, zunächst vermehrt und konsequent zu lüften. Da die Probenahmen für die Studie immer unter „worst case“ Bedingungen (siehe Ab-

schnitt 2.1) erfolgten, waren die Nachmessungen zur Prüfung, ob ein Richtwert überschritten wird, unter Nutzungsbedingungen durchzuführen [6, 7]. Dabei zeigte sich, dass durch Lüften gesundheitlich akzeptable Raumluftverhältnisse erreicht werden konnten.

7.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept

Das TVOC-Konzept erlaubt eine Einstufung des gemessenen TVOC-Wertes in fünf Kategorien, die je-

weils mit einer gesundheitlichen Bewertung und abgestuften Maßnahmen verbunden sind [6, 7]:

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 bzw. 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 z. B. auf noch nicht völlig ausgelüftete Lösemiteleinträge 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 ggf. unerwünschten VOC-Eintrag zu werten. Die gesundheitliche Relevanz auffälliger Referenzwertüberschreitungen 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/m³ 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- bzw. Stoffgruppenbewertung vorzunehmen. Die Nachmessung zur Überprüfung der Innenraumluftqualität erfolgt unter Nutzungsbedingungen.

Stufe 5: TVOC-Werte >10 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 mg/m³ ist von einer Nutzung abzusehen. Die Nachmessung zur Überprüfung der Innenraumluftqualität erfolgt unter Nutzungsbedingungen.

Die Einordnung der gemessenen TVOC-Werte in das oben genannte Konzept führt zu dem in Bild 9 dargestellten Ergebnis. Dabei ist zusätzlich auch in diesen Fällen zu beachten, dass die Konzentrationsbereiche des TVOC-Konzeptes für Probenahmen unter Nutzungsbedingungen gelten, hier jedoch unter worst-case-Bedingungen beprobt wurde, die üblicherweise höhere Konzentrationen erwarten lassen.

Es sind - vorbehaltlich einer Prüfung auf Richtwertüberschreitungen - lediglich acht Proben oder 3 % als „hygienisch auffällig“ (TVOC-Stufe 3) oder „hygienisch bedenklich“ (TVOC-Stufe 4) zu bezeichnen. Die Fälle, die in Stufe 4 einzuordnen waren, sind identisch mit bereits unter 7.1 wegen einer RW II Überschreitung genannten Schulen.

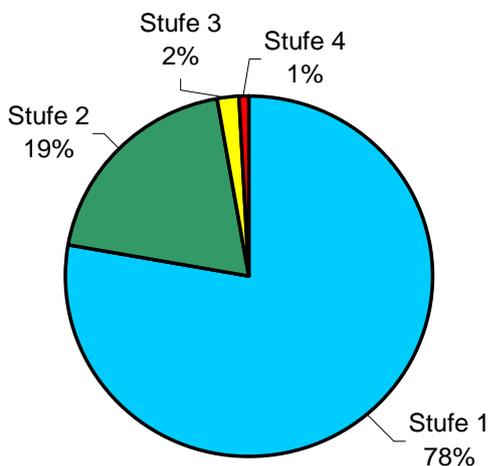


Bild 10: Bewertung der Proben nach dem TVOC-Konzept

Insgesamt stehen die Befunde hinsichtlich Richtwertüberschreitungen und TVOC-Einstufung im Einklang mit der Bedingung, dass nur Räume beprobt werden sollten, die aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer nicht auffällig waren. Dennoch ist bemerkenswert, dass in Einzelfällen auch Räume mit einer VOC-Belastung von mehreren tausend $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ohne Beanstandung seitens der Nutzerinnen und Nutzer bleiben können.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei der Ableitung der genannten Richtwerte und TVOC-Stufen von einem ganztägigen Aufenthalt in den Räumen ausgegangen wird. Der Aufenthalt in Schul- und Kindergartenräumen beträgt jedoch täglich nur circa fünf bis

acht Stunden, während die übrige Zeit überwiegend in der privaten Umgebung verbracht wird. In einer 2000/01 durchgeführten Studie des LAsD zur persönlichen VOC-Belastung von Schülerinnen und Schülern [11] konnte nachgewiesen werden, dass fast immer die VOC-Belastung in häuslicher Umgebung höher als diejenige in den Klassenräumen ist. Im Gegensatz etwa zu Arbeitsplatzbelastungen stellt die außerhalb der Schule verbrachte Zeit daher keine Entlastung dar. Somit sollte eine stärkere Ausschöpfung der täglichen VOC-Belastung durch die Schul- und Kindergartenräume durch eine Umrechnung der Richtwerte unter Berücksichtigung der verminderten Aufenthaltszeit im Allgemeinen unterbleiben.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel der Studie war eine aktuelle Bestandsaufnahme zum Vorkommen von flüchtigen organischen Luftschadstoffen (VOC) in Schulen und Kindergärten. Raumluftmessungen auf VOC liegen dazu von 285 Räumen in 105 Gebäuden aus den Jahren 2005 bis 2007 vor. Da sich Kinder einen großen Teil des Tages in diesen aufhalten, kommt möglichen Schadstoffen in der Raumluft für das Wohlbefinden und die Gesundheit dieser gegenüber Schadstoffen besonders empfindlichen Bevölkerungsgruppe eine große Bedeutung zu.

Aktuelle Referenzwerte dienen der ersten orientierenden Beurteilung von Messergebnissen, da auffällige Belastungen schnell als Überschreitungen der Referenzwerte erkannt werden können, denen dann in einer Einzelfallbeurteilung genauer nachgegangen werden muss. Desweiteren gibt die Studie wichtige Hinweise zur Auswahl von Bauprodukten, Farben, Lacken und Pflegemitteln. In den letzten Jahren sind zunehmend lösemittelarme „umweltfreundliche“ Bauprodukte, Lacke und Farben verwendet worden, was sich in dem geänderten Substanzspektrum der in dieser Studie gefundenen VOC widerspiegelt.

In der vor 15 Jahren durchgeführten Schulstudie wurden als Lösemittel aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe in deutlich höheren Mengen als heute gefunden. Dieser erfreuliche Trend hat aber nicht dazu geführt, dass die Gesamtbelastung mit flüchtigen Verbindungen gleichermaßen zurückgegangen ist, da andere schwerere flüchtige Verbindungen als Ersatz für die alten Lösemittel deren Stelle eingenommen haben. Dabei handelt es sich vor allem um sauerstoffhaltige Verbindungen wie Ester, Ether und Derivate mehrwertiger Alkohole (Glykole), darunter viele "Hochsieder", die nur sehr langsam verdunsten und deshalb über längere Zeit zu Raumluftbelastungen führen können.

Nach der herkömmlichen Lösemitteldefinition von 1994 [15] gelten nur Substanzen mit einem Siedepunkt unterhalb von 200°C als Lösemittel. Der Begriff „lösemittelfrei“ auf Produkten besagt insofern nur, dass keine „Lösemittel mit Siedepunkt unterhalb von 200°C“ darin enthalten sind. Glykole beispielsweise, als „Lösemittel“ mit höherem Siedepunkt, dürfen aber in „lösemittelfreien“ Produkten enthalten sein und können dann, wie diese und andere Untersuchung zeigen, in durchaus höheren - oft auch geruchlich wahrnehmbaren - Gehalten in der Raumluft vorkommen.

Diese Problematik wird noch dadurch verschärft, dass inzwischen eine kaum überschaubare Vielzahl unterschiedlicher Glykolverbindungen auf dem Markt ist, über deren toxikologischen Eigenschaften nur sehr wenig bekannt ist und für die bisher keine Richtwerte zur Beurteilung der Innenraumluft vorhanden sind.

Aus diesem Sachverhalt ergeben sich zwei Konsequenzen:

Bei der Auswahl von Produkten sollte zum einen statt auf „lösemittelfrei“ auf emissionsarme Produkte zurückgegriffen werden, das heißt auf Produkte, die nur sehr geringe Mengen VOC freisetzen und deren Emissionsverhalten beispielsweise in Prüfkammerversuchen untersucht und zertifiziert wurde.

Zum anderen ist es notwendig Richtwerte zur gesundheitlichen Bewertung dieser häufiger vorkommenden Substanzen zu erstellen.

Dies wird besonders deutlich am Beispiel einiger Glykolverbindungen. Daher stellt sich die Frage, für welche VOC die Ableitung von Richtwerten prioritär erfolgen sollte. Einem Vorschlag von Kalberlah folgend kann dies durch einen Bezug zu existierenden in sich konsistenten Richtwerten aus anderen Bereichen (zum Beispiel MAK-Werte, NIK-Werte) entschieden werden [18]. Anhand der Referenzwerte aus den drei Studien zum Vorkommen von VOC in Räumen, in denen Kinder sich bevorzugt aufhalten (diese Studie und [12 - 14]) wurde dies mittels Quotientenbildung zur Niedrigsten Interessierenden Konzentration (NIK; [6]) vorgenommen.

Als prioritär zu bewerten werden diejenigen Substanzen oder Substanzgruppen zur Prüfung durch das in Deutschland zuständige Gremium vorgeschlagen, deren der Quotient $[NIK / \text{Referenzwert}]$ in wenigstens einer der drei Studien ≤ 25 ist: Limonen, Phenol, einige Glykole, Glykolether und Glykolester, Aldehyde einschließlich Furfural und Benzaldehyd sowie 1,4-Dioxan. Das in Deutschland dafür zuständige Gremium, die Innenraumluftthygienekommission (IRK) des Umweltbundesamtes (UBA) und der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden (AOLG), bereitet zur Zeit eine entsprechende Empfehlung vor. Die in dieser Schul- und Kindergartenstudie erhobenen Daten leisten dazu einen wichtigen Beitrag, indem anhand der Erkenntnisse über Vorkommen und Konzentration in Innenräumen prioritär zu bewertende Substanzen identifiziert werden.

Praxisbezogene Erfahrungen und Probleme finden so direkt Eingang in die übergeordnete Gremienarbeit und dienen der Information der Öffentlichkeit, wie einige der Kasuistiken, die auch im aktualisierten Schulleitfaden des Umweltbundesamtes aufgenommen wurden, zeigen. Wichtiger noch als eine sachgerechte Bewertung beim Auftreten von Innenraumluftproblemen ist die Vorsorge, so dass es gar nicht erst zu Schadstoffbelastungen kommt.

Neben dem richtigen Lüften in Schulen kommt der Auswahl emissionsarmer Produkte eine besondere Bedeutung zu. In der vorliegenden Studie waren erhöhte Schadstoffbelastungen in der Raumluft am häufigsten auf die „Altlast“ Naphthalin aus teerhaltigen Materialien im Fußbodenaufbau und auf Kohlenwasserstoffe aus Farben bei kürzlich zurückliegender Renovierung oder aus Fußbodenpflegemitteln zurückzuführen.

Als Konsequenz ergibt sich daraus die Empfehlung, die teerhaltigen Materialien bei anstehenden Renovierungen auszutauschen. Bezüglich der Auswahl emissionsarmer Farben und insbesondere Fußboden-Pflegeprodukten wird vom Dezernat Umweltbezogener Gesundheitsschutz des LASD zur Zeit eine Folgestudie durchgeführt, in der in Schulen und Kindergärten in Schleswig-Holstein verwendete Produkte erfasst werden und deren Emissionsverhalten in Prüfkammerversuchen im Labor untersucht wird. Zusätzlich werden die Bauverwaltungen in Einzelfällen bei anstehenden Sanierungen und Renovierungen hinsichtlich der Produktauswahl zum Beispiel bei Farben und Teppichklebern unterstützt.

Weitere Erkenntnisse zu dieser Problematik werden sich aus der Auswertung von Schadensfällen in Schulen, Kindergärten und weiteren öffentlichen Gebäuden ergeben. Während der vorliegende Teil 1, die Schul- und Kindergarten-Studie, Messungen in zufällig aus-

gewählten Schulen zum Inhalt hat, werden später in Teil 2 die Ergebnisse der anlassbezogenen Messungen in öffentlichen Gebäuden vorgestellt, in denen Beschwerden oder andere Gründe Anlass für Untersuchungen waren.

Erst vor kurzem war vom Europäischen Parlament gegenüber der Europäischen Kommission eine Politik der Prävention angemahnt worden, um umweltbedingte Erkrankungen zu reduzieren. Dabei wurde ausdrücklich die Gewährleistung der Luftqualität in Innenräumen hervorgehoben. Die vorgestellte Untersuchung dient diesem Anspruch und das LASD wird sowohl durch anlassbezogene Messungen als auch die Untersuchung und Identifikation von emissionsarmen Reinigungs- und Pflegeprodukten einen Beitrag zur weiteren Prävention leisten.

Wie die Kasuistiken von Schadensfällen zeigen, existieren in Schleswig-Holstein gute Rahmenbedingungen, um auch komplexe Fälle in Zusammenarbeit mit den örtlichen Gesundheitsbehörden zu lösen und Schul- und Kindergartenkinder vor gesundheitlich negativen Einflüssen durch chemische Innenraumluftbelastungen zu schützen.

Ein bislang nicht ausreichend gelöstes Problem bleibt der Luftwechsel in Schulen, welcher in dieser Studie nicht untersucht wurde, aber erfahrungsgemäß oft unzureichend ist. Von der IRK sind dazu detaillierte Empfehlungen erarbeitet worden, die sowohl die Notwendigkeit der baulichen Voraussetzungen (Lüftungsmöglichkeit) als auch die Verantwortung der Nutzerinnen und Nutzer selbst (Lüftungsverhalten) deutlich machen. Aber nur wenn bei guten Lüftungsbedingungen zusätzlich emissionsarme Baustoffe, Einrichtungsgegenstände und Pflegeprodukte verwendet werden, wird es gelingen, eine durchgehend hygienisch unbedenkliche Raumluftqualität sicherzustellen.

9 Literatur

- [1] Untersuchungsstelle für Umwelttoxikologie des Landes Schleswig-Holstein (UfU) (1994): Vorkommen von flüchtigen Luftverunreinigungen in Schulen und Kindergärten. Jahresbericht der Untersuchungsstelle für Umwelttoxikologie des Landes Schleswig-Holstein 1992/93, 29-31, Kiel.
- [2] Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (2000): Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Berlin, Deutschland. Überarbeitete Neuauflage 2008 geplant.
- [3] WHO (World Health Organisation) (1989): Indoor air quality: organic pollutants. Euro Reports and Studies No. 111. World Health Organisation, Regional Office for Europe, Kopenhagen, Dänemark.
- [4] Mölhave L., Nielsen, G. D. (1992): Interpretation and limitations of the concept "total volatile organic compounds" (TVOC) as an indicator of human responses to exposures of volatile organic compounds (VOCs) in indoor air. *Indoor Air* 2, 65-77.
- [5] 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.
- [6] AgBB (Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten): Bewertungsschema für VOC aus Bauprodukten; Stand 2008
- [7] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2007): Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 50, 990-1005.
- [8] Plieninger, P. (1998): „Vorkommen von flüchtigen Siliciumverbindungen in der Innenraumluft“ in: Diel / Feist / Krieg / Linden (Hrsg.) „Ökologisches Bauen und Sanieren“, C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- [9] Sagunski, H., Heger W. (2004): Richtwerte für die Innenraumluft: Naphthalin. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 47, 705-712.
- [10] Salthammer T. (1999): "Volatile Organic Ingredients of Household and Consumer Products", Ball, M., Salthammer, T. (Hrsg.): „Organic Indoor Air pollutants“, Wiley VCH, Weinheim, 219-232.
- [11] Benthe Ch., B. Heinzow, S. Mohr, G. Ostendorp: Belastung von Schülerinnen und Schülern mit flüchtigen organischen Verbindungen. Landesamt f. Natur und Umwelt SH, Jahresbericht 2001
- [12] Fromme, H., Heitmann, D., Dietrich, S., Schierl, R., Körner, W., Kiranoglu, M., Zapf, A., Twardella, D. (2008): „Raumlufqualität in Schulen - Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen“, *Gesundheitswesen* 2008; 70: 88-97.
- [13] Schulz C., Ullrich D., Pick-Fuß H. et al. (2008): Kinder-Umwelt-Survey 2003/06 - KUS - Innenraumluft - Flüchtige organische Verbindungen (VOC und Aldehyde) in der Innenraumluft von Haushalten mit Kindern in Deutschland. *WaBoLu in Vorbereitung*.
- [14] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2008): Vergleichswerte für flüchtige organische Verbindungen (VOC und Aldehyde) in der Innenraumluft von Haushalten in Deutschland. *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz* 51, 109-112.
- [15] TRGS 610: Technische Regeln für Gefahrstoffe: Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz, Luftgrenzwerte“, Ausgabe: März 1998, BArbBl. 3/98 S. 48; ber. 5/98 S 112.
- [16] Seifert, B. (1999): „Richtwerte für die Innenraumluft: Die Bewertung der Innenraumlufqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz* 42, 270-278
- [17] UBA, Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz* 51, 1358-1369
- [18] AGÖF (Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute): Qualitätsziele für die Raumluf – Innenraumstandards. Dokumentation des Fachkolloquiums der AGÖF am 13. Januar 2005 in Bremen; http://www.agoef.de/agoef/aktuell/photoarchiv/pdfs/doku_bremen
- [19] Heudorf, U. (2006): Hygiene in Schulen - (k)eine Utopie?, *Hessisches Ärzteblatt* 10/2006:747-748

10 Anhang

Hinweis: Die Nummerierung des Anhangs entspricht den Kapitelnummern im Text !

Anhang 1: Charakterisierung, Eigenschaften und Bedeutung der wichtigsten VOC-Stoffklassen, nach „Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden 2008“ [2]

Alkane und Alkene:

Alkane sind kettenförmige gesättigte Verbindungen, die sich durch die Zahl der Kohlenstoff- und Wasserstoffatome im Molekül unterscheiden. Nach Renovierungen, aber auch nach Reinigung von Klassenräumen ist besonders häufig die Fraktion von n-Nonan bis n-Tetradecan (9 bis 14 Kohlenstoffatome im Molekül; n-C9 beziehungsweise n-C14) in der Innenraumluft anzutreffen. Tankanlagen für leichtes Heizöl können unter ungünstigen Umständen als Quellen für Alkane der Fraktion zwischen n-Tetradecan (n-C14) und n-Octadecan (n-C18) auftreten. Diese bis über 300 °C siedende Alkan-Fraktion wird teilweise ebenfalls als Lösemittel eingesetzt und wird hier, da sie streng genommen nicht der Gruppe der VOC zuzuordnen ist, nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Dies gilt auch für die sehr leichtflüchtigen Alkane, wie Methan (C1) und Butan (n-C4), die Bestandteile von Erdgas sind und mit der üblichen Innenraumluftanalytik in der Regel nicht gemessen werden.

Alkene (Olefine) sind ungesättigte Kohlenwasserstoffverbindungen. Längerkettige Olefin-Verbindungen stellen Reaktions- und Abbauprodukte dar. Gesättigte cyclische Kohlenwasserstoffe, wie Cyclohexan und Methylcyclohexan, werden als Lösemittel in Lacken, Harzen und Fleckentferner im Innenraumbereich eingesetzt.

Aromatische Verbindungen:

Aromatische Verbindungen (Aromaten) sind Kohlenwasserstoffverbindungen mit einem ringförmigen Aufbau, wobei im Vergleich zu einfachen cyclischen Verbindungen besondere Bindungseigenschaften zwischen den Kohlenstoffatomen im Ring bestehen. Für das toxisch wegen seiner krebserzeugenden Wirkung besonders bedeutsame Benzol, die Grundsubstanz der Aromatengruppe mit sechs Kohlenstoffatomen, kommt für den Schulbereich als Quelle praktisch nur verkehrsbelastete Außenluft (bis zu 1 % Benzol sind als Bestandteil im Kraftstoff erlaubt) in Frage.

Toluol wurde früher häufig als Lösemittel eingesetzt. Heute werden höhere aromatische Verbindungen mit acht Kohlenstoffatomen und mehr anstelle von Toluol eingesetzt. Diese Alkylaromaten sind oft auch geruchlich auffällig. Die geruchliche Auffälligkeit trifft auch für

das Styrol zu, das allerdings in Schulen selten angetroffen wird. Auch mehrkernige aromatische Kohlenwasserstoffe (zum Beispiel Naphthalin, Indene) sind im Allgemeinen in der Innenraumluft von Schulen von geringer Bedeutung, ausgenommen es wurden Bitumen- und Steinkohlenteerprodukte z.B. in Fußbodenaufbauten (Feuchtesperre, Parkettkleber) eingesetzt; dann werden derartige Verbindungen in die Innenraumluft abgegeben.

Terpene:

Eine wichtige Substanzgruppe der VOC stellen die Terpene dar. Die Monoterpene Limonen, α - und β -Pinen und δ -3-Caren sind häufig und zunehmend in Innenräumen anzutreffen. Natürliche Ausgasungen aus Holzprodukten, der Zusatz als Duftstoff und der Einsatz als "natürliche" Lösemittel für diverse Produkte (Farben, Lacke, Holzpflegemittel und andere) sind wesentliche Eintragswege in die Raumluft. Terpene findet man in vergleichsweise erhöhten Konzentrationen gerade auch in nach ökologischen Gesichtspunkten gebauten beziehungsweise ausgestatteten Gebäuden und Räumen, vor allem, wenn Wände und Decken mit Massivnadelholz großflächig verkleidet sind. Diverse Terpenalkohole und Terpenketone (zum Beispiel Geraniol, Campher) werden mit Duftstoffen in die Raumluft eingebracht.

Alkohole:

Neben dem umgangssprachlich als „Alkohol“ bezeichneten Ethanol (Ethylalkohol) sind weitere Verbindungen, die der chemischen Klasse der Alkohole angehören, in der Raumluft anzutreffen. Niedrige Alkohole wie zum Beispiel Ethanol oder Propanol, Isopropanol und Isobutanol kommen in sehr vielen Haushaltsprodukten (z.B. Reiniger, Lösemittel, Desinfektionsmittel, Kosmetika) vor. Aus Weichmachern in Kunststoffen kann unter anderem durch hydrolytische Spaltung 2-Ethylhexanol in die Innenraumluft gelangen, ein Alkohol, der gelegentlich zu Geruchsproblemen in Innenräumen beiträgt.

Glykole:

Glykolether sind viel verwendete technische Lösungsmittel insbesondere für Lacke, Farbstoffe und Druckerfarben, Stempelfarben, Wandfarben, sogenannte „Wasserlacke“ und Kugelschreiberpasten. Sie werden regelmäßig in der Innenraumluft nachgewie-

sen, da sie als Ersatzstoffe für die oben genannten klassischen Lösemittel der Aliphaten und Aromaten dienen. Auch in Lacken, die mit dem Blauen Engel ausgezeichnet sind, dürfen bis zu 10 % Glykolverbindungen enthalten sein. In den so genannten lösemittelfreien Teppichklebern werden Glykolverbindungen mit Siedepunkten oberhalb 200 °C verwendet. Glykole und Glykolether (wie zum Beispiel 2-Buthoxyethanol, Phenoxyethanol, Diethylglykolmonoethylether) sind polare Verbindungen mit Siedepunkten über 120°C. Aufgrund ihres relativ hohen Siedepunktes können sie über lange Zeiträume (Monate) hinweg aus Oberflächen ausgasen.

Aldehyde:

Der einfachste Vertreter dieser Substanzgruppe, das Formaldehyd, gehört - im Gegensatz zu den höheren Aldehyden - wegen seines geringen Siedepunktes nicht zur Gruppe der VOC sondern zur Gruppe der VVOC.

Von den geradkettigen Aldehyden fällt vor allem n-Hexanal oft in der Innenraumluft auf. Wesentliche Quellen sind Alkydharzfarben und -lacke. Im Lauf der Trocknung, der Vernetzung, aber auch des oxidativen Abbaus der ölhaltigen Bindemittel werden die Aldehyde abgespalten und freigesetzt. Da Linoleum ebenfalls ölhaltige Bindemittel aufweist, können aus schlecht gepflegten Linoleumböden Aldehyde an die Umgebungsluft abgegeben werden. Benzaldehyd findet sich als Duftstoff (bittermandelartig) in parfümierten Artikeln.

Furfural ist ein Aldehyd mit ringförmigem (cyclischem) Molekülaufbau, der bei Verwendung von Presskorkprodukten (zum Beispiel als Fußbodenplatten) in die Raumluft gelangen kann. Zu den ungesättigten Aldehyden zählt Propanal (Acrolein) mit einem besonders stechenden Geruch. Die Verbindung tritt unter anderem bei der thermischen Zersetzung von Fetten auf (Küchendunst).

Ketone:

Butanon (Methylethylketon - MEK) und Methylisobutylketon (MIBK) sind vielfältig eingesetzte Lösemittel, zum Beispiel in Allesklebern, und können beim Aushärten der Kleber in die Innenraumluft gelangen. Cyclohexanon und Acetophenon werden vereinzelt aus Oberflächenbeschichtungen in die Raumluft abgegeben.

Ester:

Ester sind häufig eingesetzte Lösemittel: Ethylacetat, Butyl- und Isobutylacetat können insbesondere nach Umbau- und Renovierungsarbeiten in der Innenraumluft auftreten. Texanol wird als Additiv für Lacke, Parkettversiegelungen und Dispersionsfarben (Latexfarben) und Tintenstrahldruckerfarben verwendet, um die Filmbildung zu verbessern. In zunehmendem Maße kommen Gemische von Estern und Alkoholen auf den Markt. Farben auf Wasserbasis können solche Gemische enthalten und die entsprechenden Verbindungen an die Innenraumluft abgeben. Als Ersatzstoff für Weichmacher wird heute der Ester TXIB (Texanolisobutyrat) eingesetzt.

Halogenierte organische Verbindungen:

Für praktisch alle halogenierten organischen Verbindungen konnten in den letzten zehn Jahren rückläufige Innenraumluftkonzentrationen festgestellt werden. Dennoch können vereinzelt erhöhte Konzentrationen unter anderem für folgende Verbindungen gemessen werden: 1,1,1-Trichlorethan aus Korrekturflüssigkeit, 1, 4-Dichlorbenzol aus Toilettensteinen und Mottenschutzmitteln, geruchlich auffällige Mono- bis Trichlornaphthaline aus mit Fungiziden behandeltem Holzwerkstoffen und Chloranisole als Zersetzungsprodukte von Holzschutzmitteln. Von hygienischer Bedeutung sind die halogenhaltigen organischen Trihalomethane und Chloramine, die in Hallenbädern als Reaktionsprodukte der Badewasserchlorung entstehen.

Siloxane:

Zunehmend Verwendung als Lösemittel finden in Lacken auch flüchtige Siliziumverbindungen - sogenannte Siloxane wie die Methylpolysiloxane (zum Beispiel Decamethylcyclopentasiloxan), die oft in der Innenraumluft nachgewiesen werden.

Anhang 2: Fragebögen

Landesamt für Gesundheit und Arbeitssicherheit
Dezernat 50: Umweltbezogener Gesundheitsschutz, Brunswiker Straße 4, 24105 Kiel

Gebäudeangaben

Gebäude ID (wird vom LGA vergeben): /

Name der Einrichtung: _____

Straße: _____

PLZ: _____ Ort: _____

dortiger Ansprechpartner: _____ Telefon: _____

Träger der Einrichtung: _____

Zuständige Gesundheitsbehörde: _____

Kreis: _____

Ansprechpartner: _____ Telefon: _____

=====

Raumangaben

Raum ID (wird vom LGA vergeben): / /

Raumbezeichnung: _____

Raumnummer: _____ Flur/Stockwerk: _____

In welchem Gebäudeteil befindet sich der Raum? _____

Baujahr ~ _____

- | | |
|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Altbau | <input type="checkbox"/> Neubau |
| <input type="checkbox"/> Stein- / Betonhaus | <input type="checkbox"/> Holzhaus |
| <input type="checkbox"/> Containerbau/Fertighaus (bei * weiter) | |

(*) Firma, Typ (falls bekannt): _____

Raumgröße:

m Länge m Breite m Höhe

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

- Fliesen, Steinfußboden Holz (Dielen, Parkett)
 Kunststoff (PVC, Laminat etc.) Linoleum
 Teppichboden
Oberfläche: geölt / gewachst lackiert

Mit welchem Material sind Wände / Decke überwiegend ausgestattet?

- Papiertapete Kunststoff- / Textiltapete
 Rohfaser, gestrichen 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?

- vor 2 bis 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:

Lüftung

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

Ist die Lüftung individuell vom Raum aus regulierbar? Nein Ja

Wie schätzen Sie den Luftwechsel ein: vermutlich ausreichend
 vermutlich nicht ausreichend

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? _____

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

Erwachsene Kinder

Sonstige Angaben/Besonderheiten: _____

Datum

Unterschrift

Messprotokoll

Raum ID (wird vom LGA vergeben):

□□□□□ / □□□□ / □□

□

Labornummer LGA: _____ Bezeichnung Auftraggeber: _____

Datum der Probennahme: _____

Einrichtung/Gebäude: _____

Raumbezeichnung: _____

Raumnummer: _____ Flur/Stockwerk: _____

□ °C Pumpe □ hPA Luftdruck □ % rel. Feuchte

Handelt es sich um eine

Erstmessung Wiederholungsmessung → □ alte LGA Probennummern
□

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

Angaben zu den Messbedingungen, wenn abweichend zu den Vorgaben: _____

Probennahme:

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):

Probennehmer/in :

Anhang 3.2: Statistische Kenngrößen ohne Berücksichtigung von Werten < BG, in µg/m³

Name	n>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM
Alkane								
n-Hexan*	52	1,0	1,5	3,0	5,0	51	3060	52
n-Heptan	167	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	33	167
n-Octan	113	1,0	1,0	2,0	3,0	6,6	350	113
n-Nonan	90	1,0	1,0	2,3	9,9	22	230	90
n-Decan	177	1,0	1,0	4,0	12	26	180	177
n-Undecan	166	1,0	1,0	3,0	6,0	12	55	166
n-Dodecan	200	1,0	2,0	3,0	11	23	200	200
n-Tridecan	119	1,0	1,0	1,0	2,0	4,0	27	119
n-Tetradecan	171	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	15	171
n-Pentadecan	141	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	7	141
n-Hexadecan	189	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	4	189
n-Heptadecan	140	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	3	140
n-Octadecan	25	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1	25
3-Methylhexan*	20	2,0	3,5	9,0	41	52	52	20
2-Methylheptan*	1	--	--	--	--	--	14	--
3-Methylheptan*	1	--	--	--	--	--	19	--
2,3-Dimethylpentan*	7	2,1	10	16	19	19	19	7,0
2,4-Dimethylpentan*	5	5,0	14	28	35	35	35	5,0
2,3,4-Trimethylpentan*	22	2,0	3,0	3,0	4,7	5,9	6	22
2,2,4-Trimethylpentan*	12	2,0	2,0	3,0	5,4	6,0	6	12
Methylnonan*	8	6,5	11	16	17,0	17	17	8,0
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	8	2,3	3,0	4,0	280	280	280	8,0
tetrameres Isobutan*	14	2,0	3,0	4,0	5,5	6,0	6	14
Cyclohexan	83	1,0	2,0	4,0	6,0	7,8	28	83
Methylcyclopentan	79	1,0	1,0	2,0	4,0	9,0	23	79
Methylcyclohexan	95	1,0	1,0	2,0	6,4	13	145	95
1,4-Dimethylcyclohexan*	1	--	--	--	--	--	2	--
Ethylcyclohexan*	1	--	--	--	--	--	3	--
Alkene								
1-Hepten*	5	2,5	5,0	9,5	12	12	12	5,8
5-Methylhexen-2*	15	2,0	4,0	25	47	51	51	12
1-Octen	12	1,0	1,0	1,0	310	440	440	38
2,4,4-Trimethylpenten-2*	1	--	--	--	--	--	3	--
1-Decen	25	1,0	1,0	2,5	16	21	22	3,8
1-Tridecen*	1	--	--	--	--	--	2	--
Trimeres Isobuten*	3	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2	1,7
3-Methylpentadien-1,3*	2	3,0	4,5	6,0	6,0	6,0	6	4,5
4-Phenylcyclohexen*	0	--	--	--	--	--	--	--
1,5-Cyclooctadien*	1	--	--	--	--	--	1	--
Dicyclopentadien*	1	--	--	--	--	--	3	--
Alkohole								
Ethanol*	236	1,0	2,0	5,0	8,3	15	43	4,2
1-Propanol	38	1,0	2,0	4,0	18	66	410	16
2-Propanol*	260	7,0	18	64	200	319	1200	71
1-Butanol	264	2,0	3,0	6,0	9,0	14	39	4,8
2-Butanol*	3	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3	3,0
Isobutanol*	61	1,0	2,0	3,5	5,8	7,0	92	4,3
t-Butanol*	1	--	--	--	--	--	5	--
Isoamylalkohol*	2	3,0	8,0	13	13	13	13	8,0

Fortsetzung Anhang 3.2: Statistische Kenngrößen ohne Berücksichtigung von Werten < BG,
in µg/m³

Name	n>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM
2-Ethyl-1-hexanol	240	2,0	3,0	5,0	11	19	175	5,9
Benzylalkohol*	11	6,0	14	40	220	260	260	41
Aromaten								
Benzol	139	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	15	1,5
Toluol	270	2,0	3,0	5,0	9,0	18	120	5,0
m-Xylol	209	1,0	1,0	3,0	9,0	19	130	5,0
p-Xylol	154	1,0	2,0	3,0	8,5	13	79	4,3
o-Xylol	176	1,0	1,0	2,0	5,0	16	70	3,3
Ethylbenzol	182	1,0	1,0	3,0	6,0	9,9	59	3,1
Styrol	99	1,0	1,0	2,0	6,0	9,0	18	2,5
1,2,3-Trimethylbenzol*	6	2,0	3,5	16	20	20	20	7,7
1,2,4-Trimethylbenzol	178	1,0	1,0	2,3	7,0	14	109	4,2
Mesitylen	65	1,0	1,0	2,0	7,4	18	26	3,0
2-Ethyltoluol	70	1,0	1,0	2,0	4,9	20	25	2,9
3-Ethyltoluol	127	1,0	1,0	2,0	5,0	12	51	3,5
4-Ethyltoluol*	11	2,0	3,0	13	17	18	18	5,8
n-Propylbenzol	61	1,0	1,0	2,0	4,0	17	29	2,9
Isopropylbenzol*	5	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3	2,2
Naphthalin	69	1,0	1,0	2,0	8,0	12	22	2,8
2-Methylnaphthalin*	3	2,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4	3,0
Decahydronaphthalin*	3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2	2,0
Terpene								
α-Pinen	260	3,0	8,0	17	47	72	200	260
β-Pinen	168	1,0	1,0	3,0	7,0	11	24	168
3-Caren	218	2,0	3,0	8,0	16	25	130	218
2-Caren*	1	--	--	--	--	--	3	--
Limonen	234	2,0	5,0	12	38	58	880	234
Camphen*	6	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	3	6,0
Myrcen*	4	2,8	8,0	13	13	13	13	4,0
α-Terpinen*	9	2,0	3,0	4,0	5,0	5,0	5	9,0
γ-Terpinen*	2	4,0	6,0	7,0	7,0	7,0	7	2,0
Cineol*	3	8,0	9,0	11	11	11	11	3,0
Linalool*	1	--	--	--	--	--	3	--
dl-Menthol*	5	2,0	2,0	4,0	6,0	6,0	6	5,0
Pulegon*	1	--	--	--	--	--	1	--
Longifolen	59	1,0	1,0	1,0	2,0	4,0	10	59
Aldehyde, Ketone								
Butanal	44	1,0	2,0	3,0	6,0	8,3	15	44
Pentanal	114	1,0	2,0	3,0	6,5	10	34	114
Hexanal	157	1,0	2,0	5,0	11	18	77	157
Heptanal*	17	2,0	2,0	2,5	6,2	7,0	7	17
Octanal*	20	2,0	2,0	3,0	7,6	9,9	10	20
Nonanal	164	2,0	3,0	5,8	11	15	27	164
Decanal*	2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4	2,0
Benzaldehyd	168	2,0	3,0	5,0	8,0	17	46	168
Aceton*	176	1,0	3,0	5,0	15	45	300	176
Diisopropylketon*	4	2,0	2,0	2,8	3,0	3,0	3	4,0
Methylisobutylketon*	14	1,8	2,5	6,0	9,5	11	11	14
Cyclohexanon	71	1,0	1,0	1,0	2,8	3,4	12	71

Fortsetzung Anhang 3.2: Statistische Kenngrößen ohne Berücksichtigung von Werten < BG,
in µg/m³

Name	n>BG	P25	P50	P75	P90	P95	MAX	AM
2-Heptanon*	3	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3	3,0
Acetophenon	74	1,0	1,0	1,0	3,0	3,3	18	74
Ester, Ether, Glykolderivate								
Ethylacetat*	5	2,5	5,0	28	44	44	44	5,0
n-Butylacetat	200	1,0	2,0	5,0	16	28	144	200
Isobutylacetat*	6	7,3	12	17	26	26	26	6,0
Linalylacetat*	5	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3	5,0
Dimethylphthalat	71	1,0	1,0	1,0	2,8	3,4	13	71
Diethylphthalat	58	1,0	1,0	1,0	2,0	3,0	7	58
Diisobutylphthalat*	1	--	--	--	--	--	2	--
Dibutylether*	2	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	3	2,0
Ethylenglykolmonomethylether	87	2,0	3,0	5,0	9,0	20	59	87
Ethylenglykolmonoethylether	9	2,0	5,0	13	88	88	88	9,0
Ethylenglykolmonobutylether	230	2,0	4,0	11	30	66	190	230
Phenoxyethanol	203	1,0	2,0	5,0	9,6	20	150	203
2-Ethoxyethylacetat	15	1,0	1,0	2,0	3,2	5,0	5	15
Diethylenglykolmonomethylether*	5	2,0	3,0	5,5	6,0	6,0	6	5,0
Diethylenglykolmonoethylether*	39	4,6	10	27	80	90	232	39
Diethylenglykoldiethylether*	1	--	--	--	--	--	50	--
Diethylenglykolmonobutylether	186	1,0	3,0	7,3	19	33	200	186
Butyldiglykolacetat	67	1,0	1,0	1,0	2,0	5,4	13	67
Propylenglykolmonomethylether*	32	5,0	9,5	16	34	102	120	32
Propylenglykolmonoethylether*	1	--	--	--	--	--	3	--
Propylenglykolpropylether*	3	2,0	4,0	63	63	63	63	3,0
Phenoxypropanol*	4	3,5	6,0	12	13	13	13	4,0
Dipropylenglykol*	6	2,0	11	20	21	21	21	6,0
Dipropylenglykolmonomethylether*	8	7,3	25	106	120	120	120	8,0
Methoxypropylacetat*	11	2,0	2,0	3,0	4,0	4,0	4	11
Propylenglykoldiacetat*	1	--	--	--	--	--	17	--
3-Methoxybutylacetat*	1	--	--	--	--	--	2	--
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiolmonoisobutyrat*	17	3,0	8,0	15	1920	2000	2000	17
Propylenglykolmonobutylether*	38	2,3	3,5	7,3	43	98	260	38
Dipropylenglykolmono-n-butylether*	20	4,0	6,0	7,8	26	47	48	20
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiisobutyrat	126	1,0	1,0	2,0	4,0	6,7	15	126
Sonstige								
1,1,1-Trichlorethan	5	1,5	2,0	4,5	6,0	6,0	6	5,0
Trichlorethylen*	2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2	2,0
1,4-Dichlorbenzol	4	1,3	2,5	4,5	5,0	5,0	5	4,0
1-Chlornaphthalin	39	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	10	39
Cyclotetrasiloxan*	4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2	4,0
Cyclopentasiloxan*	51	2,0	3,0	7,0	12	20	30	51
Benzothiazol*	8	2,0	3,0	8,3	13	13	13	8,0

n>BG: Anzahl der Werte über Bestimmungsgrenze;

P25, P50, P75, P90, P95: Perzentile;

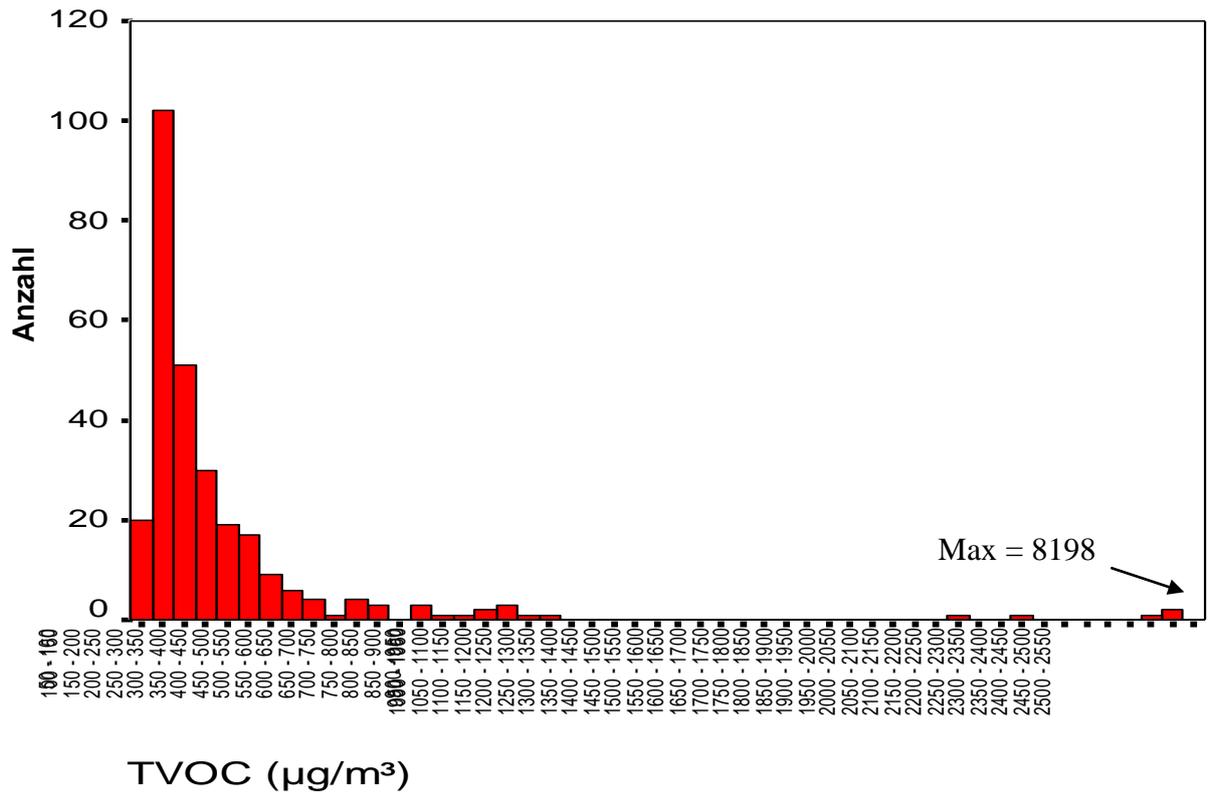
Max: Maximaler gemessener Wert;

AM: Arithmetisches Mittel;

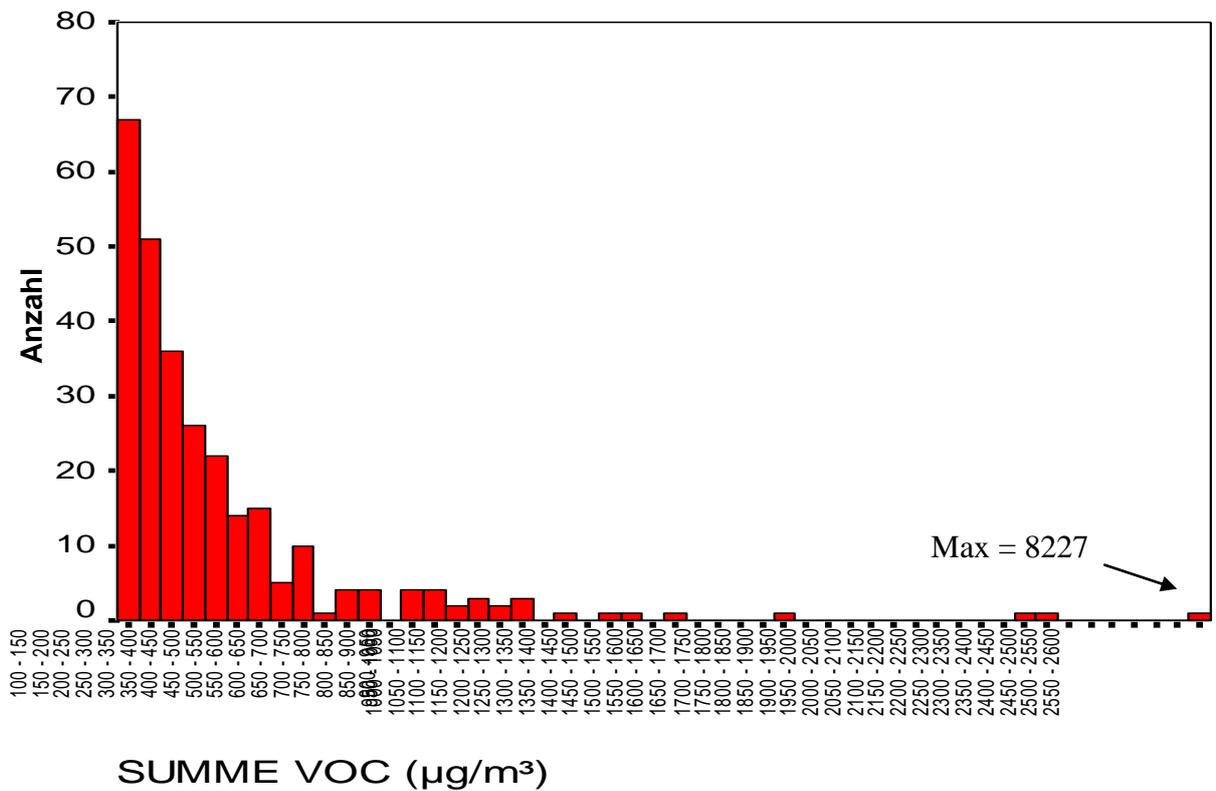
Werte < BG sind nicht berücksichtigt;

*: Berechnet als Toluolequivalent.

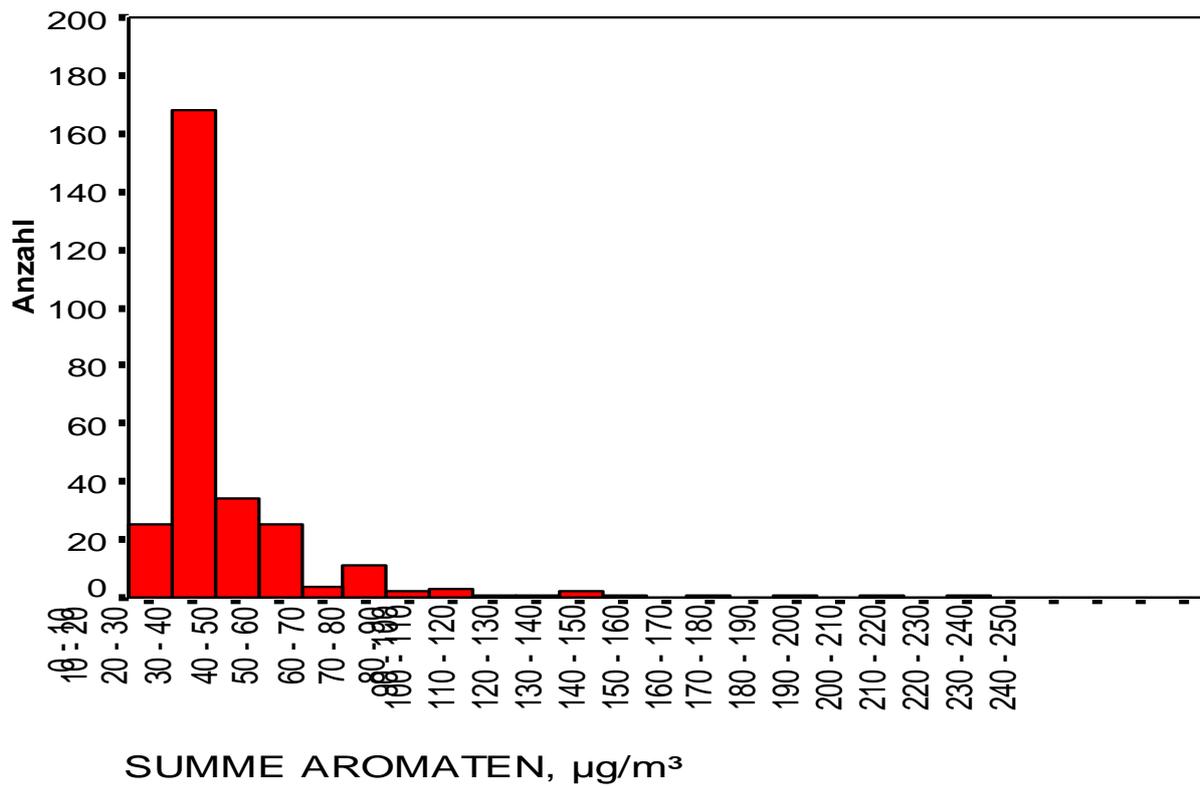
Anhang 3.2.1: Histogramm für TVOC



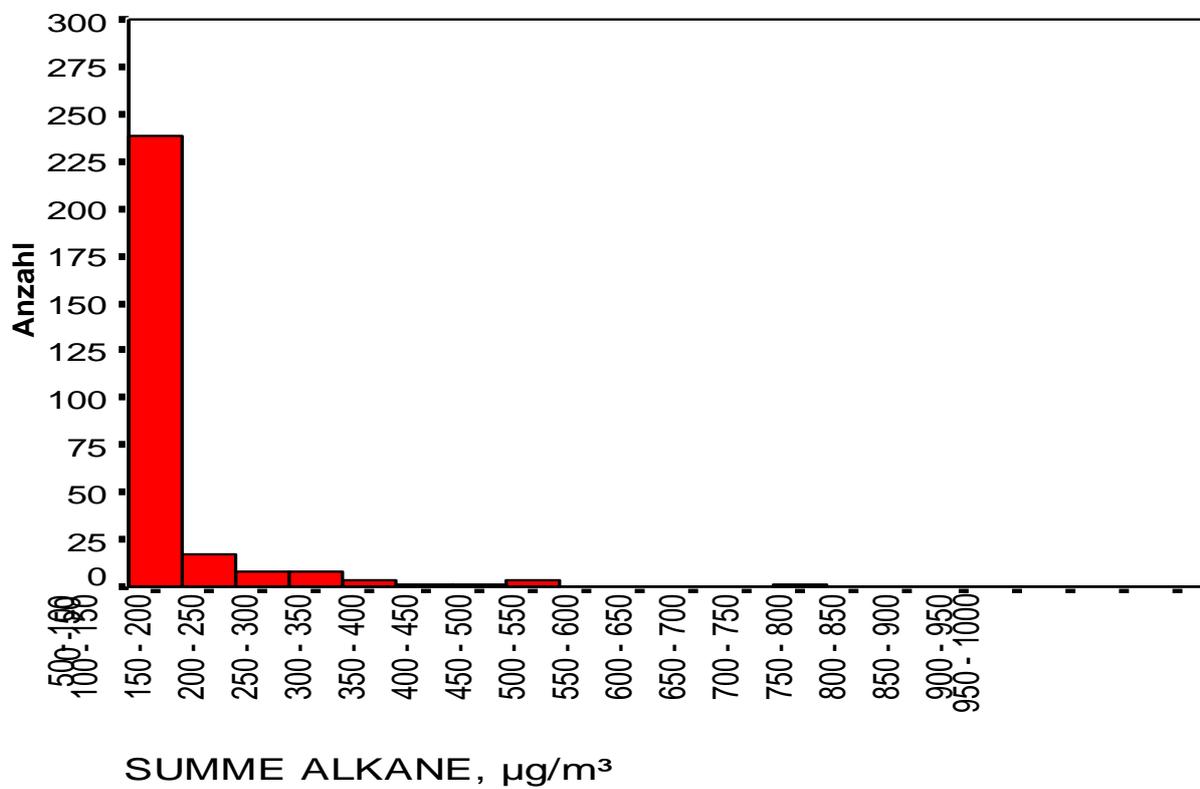
Anhang 3.2.2: Histogramm für Summe VOC



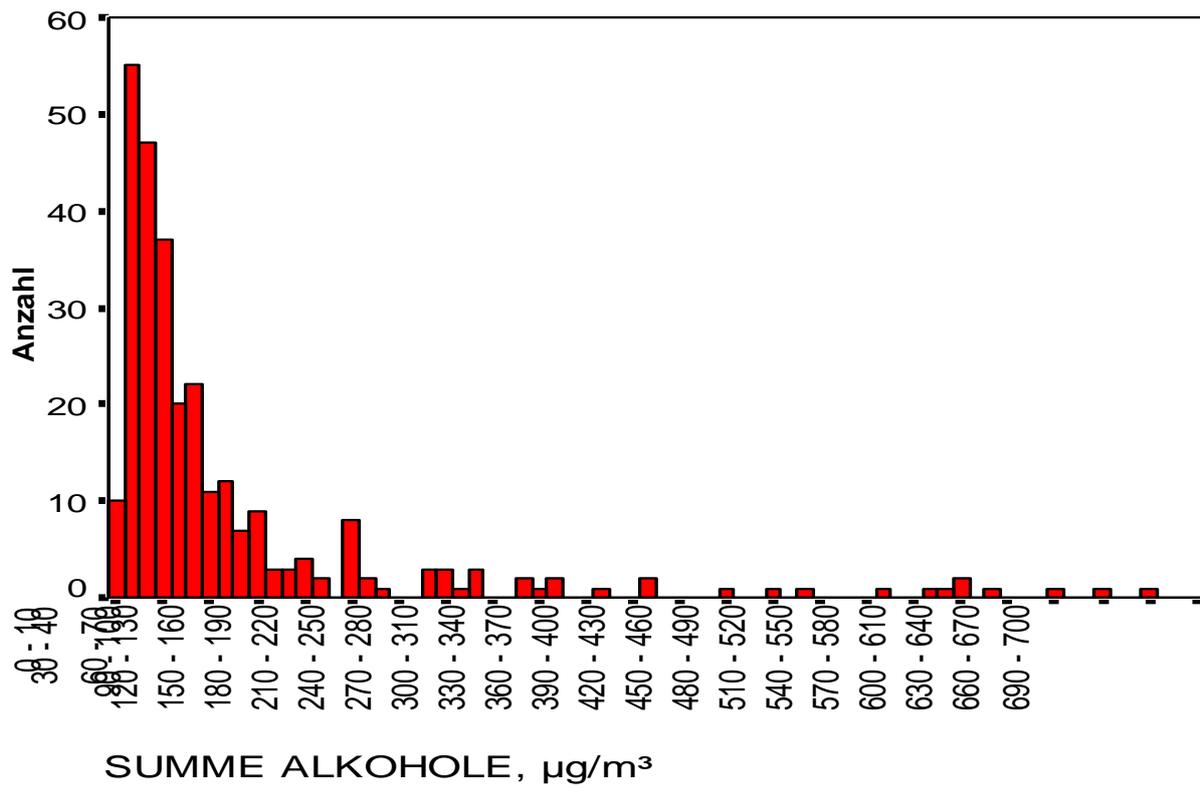
Anhang 3.2.3: Histogramm für Summe Aromaten



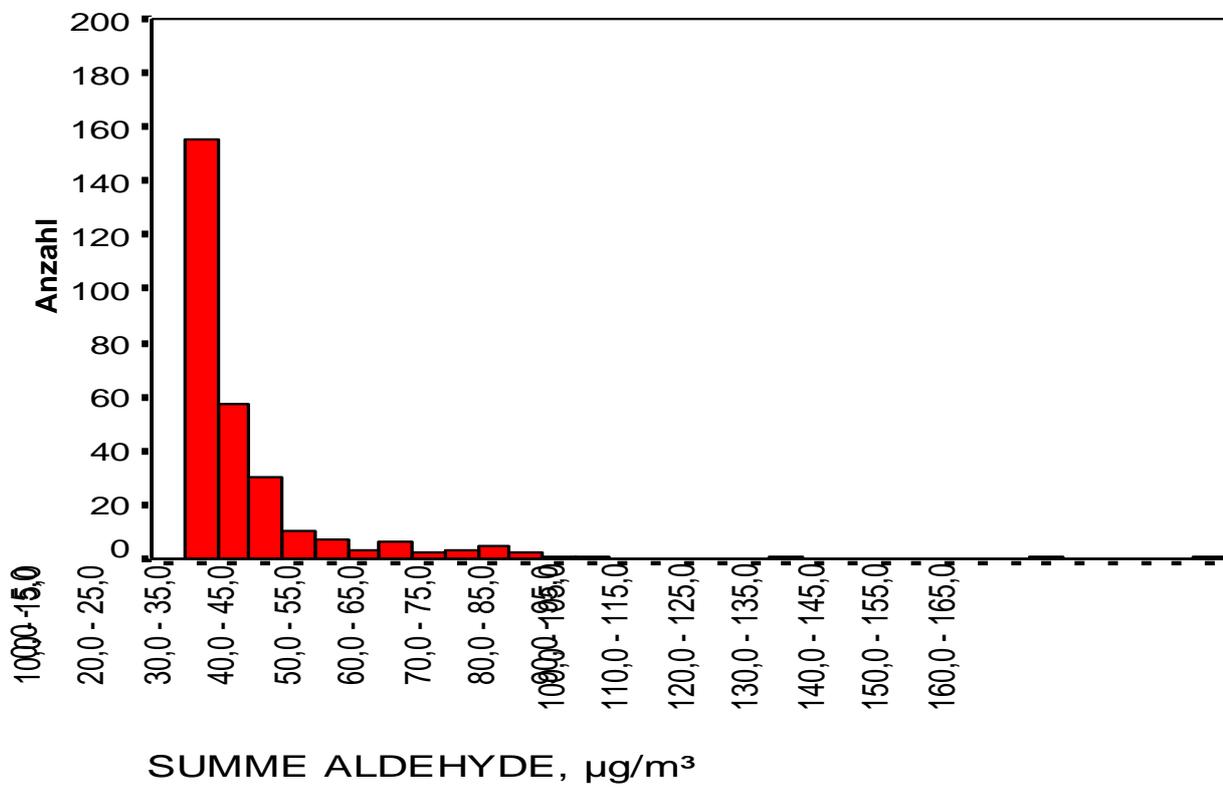
Anhang 3.2.4: Histogramm für Summe Alkane



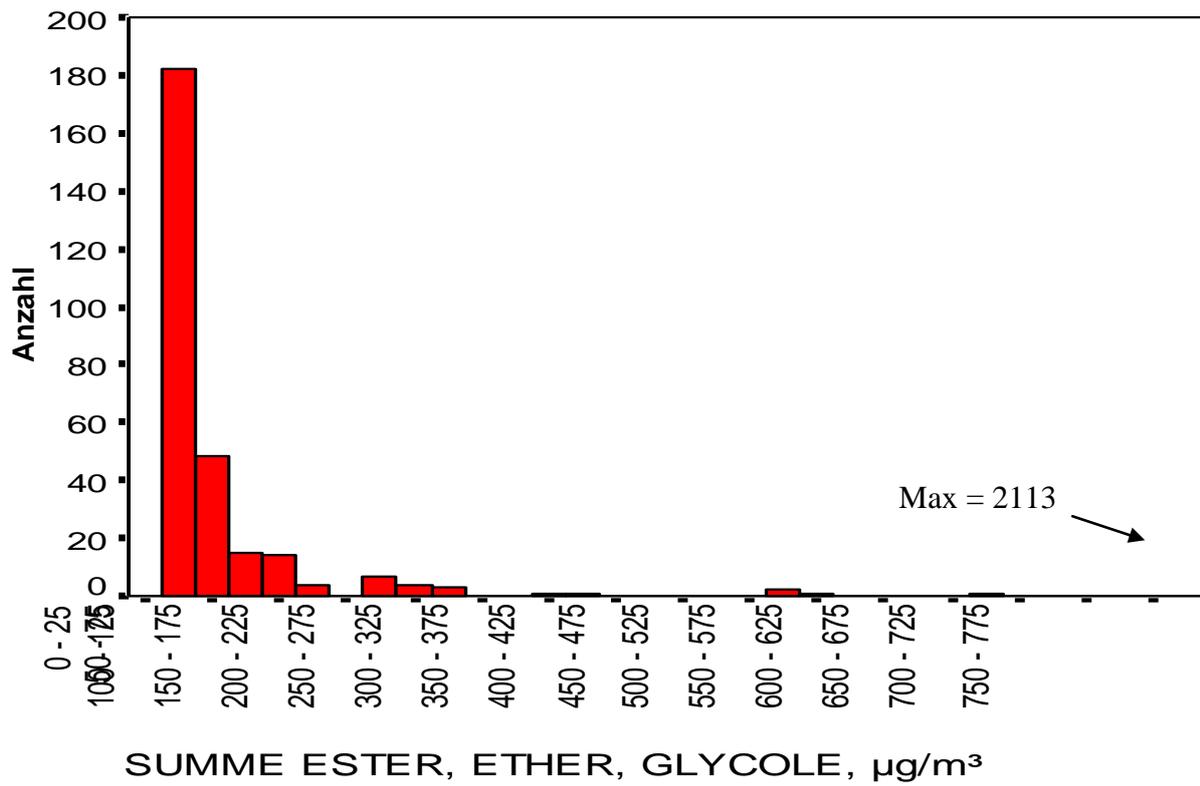
Anhang 3.2.5: Histogramm für Summe Alkohole



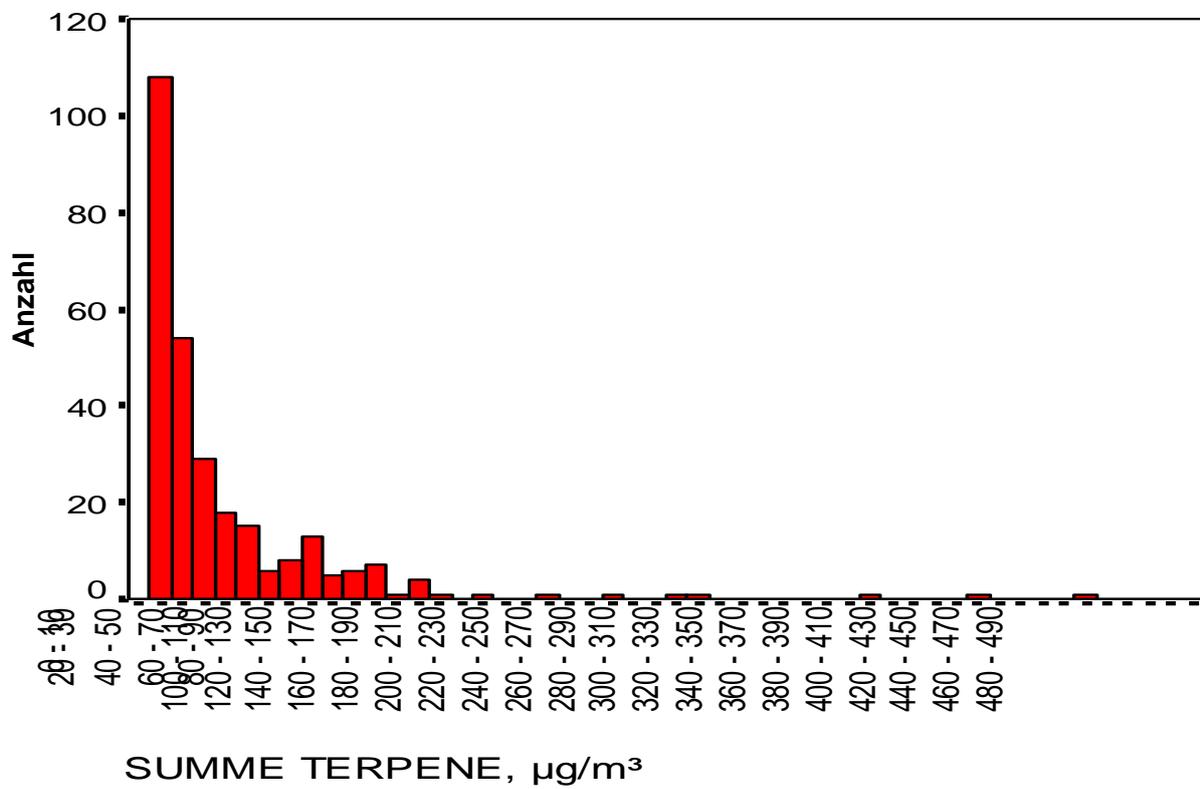
Anhang 3.2.6: Histogramm für Summe Aldehyde



Anhang 3.2.7: Histogramm für Summe Ester, Ether und Glykole



Anhang 3.2.8: Histogramm für Summe Terpene

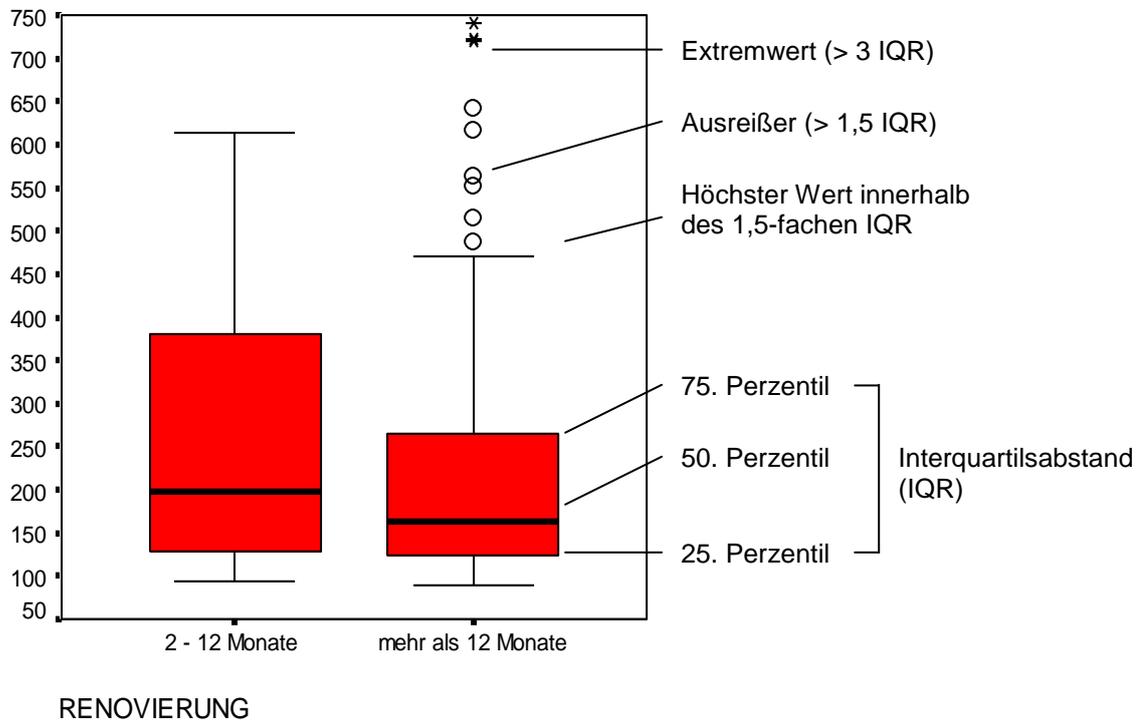


Anhang 3.3: Korrelation zwischen Temperatur und TVOC

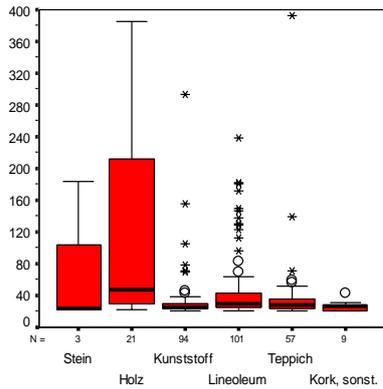
			T_PUMP	TVOC2
Spearman-Rho	T_PUMP	Korrelationskoeffizient	1,000	0,191(**)
		Signifikanz (2-seitig)	.	0,001
		N	284	284
	TVOC2	Korrelationskoeffizient	0,191(**)	1,000
		Signifikanz (2-seitig)	0,001	.
		Anzahl	284	285

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

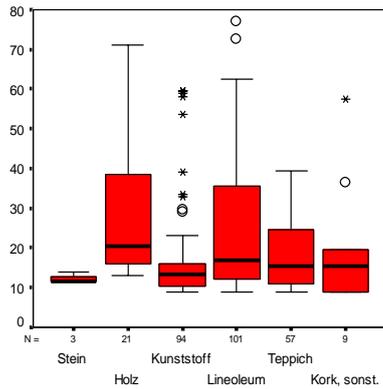
Anhang 6.1: Erläuterung des Boxplots (Kastengrafik zur Darstellung der Verteilung und Streuung einer Reihe von Werten)



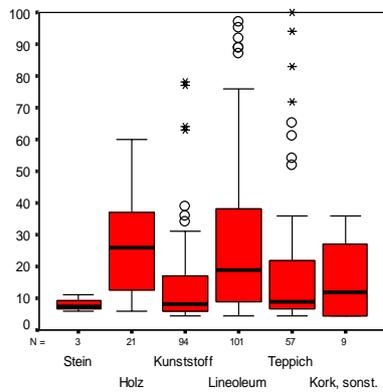
Anhang 6.2.1a: Vergleich der Konzentration verschiedener Substanzklassen in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag



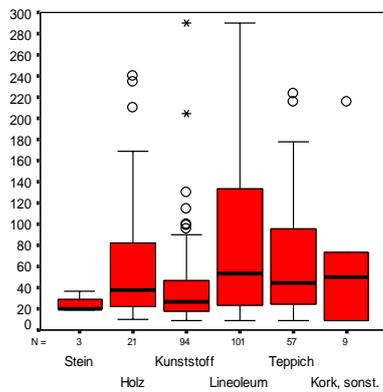
FUSSBODEN



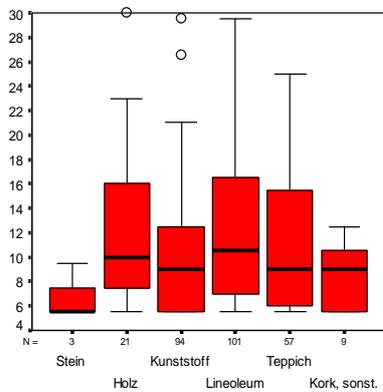
FUSSBODEN



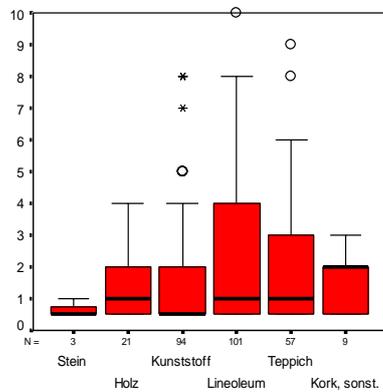
FUSSBODEN



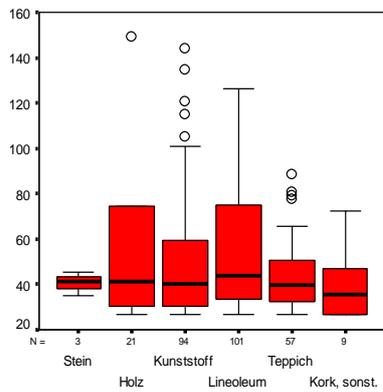
FUSSBODEN



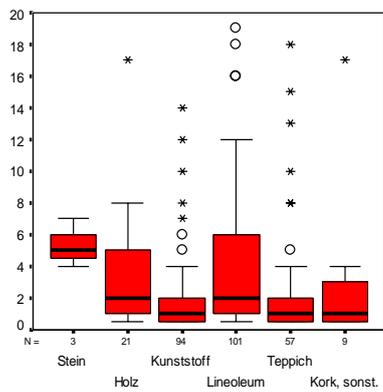
FUSSBODEN



FUSSBODEN



FUSSBODEN



FUSSBODEN

Anhang 6.2.1b: Irrtumswahrscheinlichkeiten für den Zusammenhang zwischen Bodenbelag und der Konzentration verschiedener Substanzklassen in der Raumluft.

	Bicyclische Terpene	Glykole	Aldehyde	Alkohole	Aromaten	Alkane
Holz – Kunststoff	0,000 H > K	0,723	0,092	0,110	0,000 H > K	0,000 H > K
Holz – Linoleum	0,389	0,674	0,938	0,517	0,061	0,002 H > L
Holz – Teppich	0,004 H > T	0,543	0,347	0,853	0,008 H > T	0,001 H > T
Linoleum – Kunststoff	0,000 L > K	0,137	0,008 L > K	0,000 L > K	0,000 L > K	0,000 L > K
Linoleum – Teppich	0,010 L > T	0,035 L > T	0,153	0,411	0,289	0,189
Kunststoff - Teppich	0,184	0,586	0,458	0,003 T > K	0,025 T > K	0,074

dunkelblau: hoch signifikant (Niveau 0,01),
hellblau: signifikant (Niveau 0,05)