



Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein

Teil 4: Neubauten für Schulen und Kindergärten

Herausgeber:
Ministerium für Soziales, Gesundheit, Familie und Gleichstellung
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

Foto: www.grafikfoto.de
Michael Staudt

Ansprechpartnerin:
Gudrun Petzold
Tel. 0431/988-5421

ISSN 0935-4379

September 2013

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.....	4
Verzeichnis der Abkürzungen und Fachbegriffe.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Untersuchungsmethoden.....	7
2.1 Probenahme.....	7
2.2 Analytik.....	7
2.3 Auswertung.....	7
3 Allgemeine statistische Angaben.....	8
4 Auswertung der VOC-Messungen.....	10
5 Raumlufthygienische Bewertung.....	13
5.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen.....	13
5.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept.....	15
6 Kohlendioxidkonzentration.....	17
7 Gesundheits- und Geruchsbeschwerden.....	20
8 Maßnahmen bei erhöhten VOC-Konzentrationen.....	22
9 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	24
10 Literatur.....	25
11 Anhang.....	26

Kurzfassung

Das Dezernat „Umweltbezogener Gesundheitsschutz“ des Landesamtes für soziale Dienste Schleswig-Holstein (LAsD) untersucht unter anderem die Qualität der Innenraumluft in öffentlichen Gebäuden. Ansprechpartner für Fragen zur Innenraumhygiene sind Herr Dr. Birger Heinzow und Herr Dr. Guido Ostendorp.

Im vorliegenden Bericht werden Ergebnisse aus Untersuchungen vorgestellt, die das LAsD in 49 Räumen in neuen oder kürzlich sanierten Schulen oder Kindergärten durchgeführt hat, um eine etwaige Belastung der Innenraumluft mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) zu erfassen. Ferner wurde mindestens einen Tag lang die Kohlendioxidkonzentration (CO₂) als Maß für die allgemeine Raumluftqualität aufgezeichnet. Die Ergebnisse haben wir mit den Daten anderer Studien verglichen und entsprechend des Konzeptes zur Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten bewertet.

In neuen oder kürzlich sanierten Räumen waren die VOC-Konzentrationen durchschnittlich höher als in älteren Gebäuden. Das Substanzspektrum war vergleichbar mit den in der Schulstudie 2005/07 gefundenen Stoffen: Es dominierten Terpene, Aldehyde und aliphatische Kohlenwasserstoffe sowie zahlreiche Glykolverbindungen. Aromaten waren von untergeordneter Bedeutung. In 28 Fällen wurden die Richtwerte I überschritten, vor allem bei Aldehyden (10 Fälle) und bityklische Terpenen (7 Fälle). Es gab eine Überschreitung des Richtwertes II für bityklische Terpene.

Etwa 90 % der untersuchten Räume wiesen unter worst-case-Bedingungen Summenkonzentrationen der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) auf, die eine Einordnung in die Stufen 1 (hygienisch unbedenklich) oder 2 (hygienisch noch unbedenklich) des TVOC-Konzeptes bedeuten würden. In nicht neu errichteten oder sanierten Schulen und Kindergärten waren es 97 %. Nur ein Raum fiel in die Kategorie 4 (hygienisch bedenklich).

Die meisten Räume bieten einen akzeptablen Luftaustausch: Während circa 65 % der Nutzungszeit wurde der CO₂-Leitwert von 1.000 ppm (hygienisch unauffällig) eingehalten. An etwa ²/₃ der Messtage verbrachten die Kinder mindestens 50 % der Zeit bei weniger als 1.000 ppm CO₂ und waren nie Werten über 2.000 ppm (hygienisch inakzeptabel) ausgesetzt.

In Einzelfällen war der Luftwechsel jedoch unzureichend: So traten im Extremfall an 60 % eines Tages Belastungen mit mehr als 2.000 ppm Kohlendioxid auf.

Rund ein Viertel der Räume war mit einer technischen Lüftungsanlage ausgestattet. In diesen Räumen war die Luft an fast allen Tagen akzeptabel.

Die Untersuchungen zeigen, dass die in Neubauten aus Gründen der Energieeinsparung übliche Reduzierung des ungezielten Luftwechsels nicht grundsätzlich zu problematischen Raumluftverhältnissen führt.

Verzeichnis der Abkürzungen und Fachbegriffe

BG:

Bestimmungsgrenze - geringste mit dem gewählten Verfahren bestimmbare Konzentration

Emission:

Abgabe Luft verunreinigender Stoffe in die Umgebung

Median:

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

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

Perzentil:

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

ppm:

Parts per million („Teile einer Million“, relative Maßeinheit)

RW I / RW II:

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

TVOC:

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

U-Test:

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

VOC:

Volatile Organic Compounds (englisch) - flüchtige organische Verbindungen

µg/m³:

Konzentrationsangabe in Millionstelgramm pro Kubikmeter (entspricht 1000 Liter)

°C:

Temperaturangabe in Grad Celsius

l/min:

Volumenstrom in Litern pro Minute

DPGBE: Dipropylenglykolbutylether

TXIB: 2,2,4-Trimethylpentandioldiisobutylester

PGBE: Propylenglykolbutylether

PGMEA: Propylenglycolmethyletheracetat

PGPE: Propylenglykolpropylether

PGEE: Propylenglykolethylether

PGME: Propylenglycolmethylether

DEGBEA: Diethylenglykolbutyletheracetat

DEGBE: Diethylenglykolbutylether

DEGEE: Diethylenglykolethylether

EGEEA: Ethylenglykolethyletheracetat

EGPhE: Ethylenglykolphenylether, Phenoxyethanol

EGBE: Ethylenglykolbutylether

1 Einleitung

Das Dezernat „Umweltbezogener Gesundheitsschutz“ im Landesamt für soziale Dienste des Landes Schleswig-Holstein (LAsD) untersucht unter anderem die Qualität der Innenraumluft in öffentlichen Gebäuden. Neben Messungen im Falle von Nutzerbeschwerden führen wir Studien mit speziellen Fragestellungen durch. Beispiele sind eine Studie zur Raumluftqualität in Containerklassen [1] oder Untersuchungen zu Mineralwollfasern aus Dämmstoffen [2]. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Belastung der Raumluft in neuen oder kürzlich sanierten Schulen und Kindergärten.

In den ersten Wochen oder Monaten nach umfangreichen Bauarbeiten sind die Konzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) meist erhöht, weil die Baustoffe noch VOC, zum Beispiel Lösemittel, in die Luft abgeben. Schulen und Kindergärten nutzen die neuen Räume oft unmittelbar nach Fertigstellung, so dass die Kinder und andere Nutzerinnen und Nutzer in den neuen Räumen hohen VOC-Belastungen ausgesetzt sein könnten. Das kann das Wohlbefinden stören, im ungünstigsten Fall die Gesundheit schädigen.

Moderne Gebäude haben außerdem fast luftdichte Fenster, Türen und Wände. Dadurch wird ein ungezielter Luftaustausch in den Räumen verhindert und Heizenergie eingespart.

Verbrauchte, „schlechte“ Luft stört jedoch das Wohlbefinden und die Konzentration der Kinder. Das heißt, sie lernen langsamer. Daher müssen die Nutzerinnen und Nutzer bewusst regelmäßig Fenster öffnen, um verbrauchte Luft heraus und frische Luft hinein zu lassen. Oft unterstützen technische Lüftungsanlagen den Luftaustausch. Durch regelmäßiges Lüften werden außerdem die VOC, die Baustoffe, Reiniger usw. abgeben, aus der Raumluft entfernt.

Mit diesen Untersuchungen wollen wir herausfinden

- ob Kinder in neuen oder renovierten Räumen durch VOC gefährdet werden und
- ob Kinder in neuen oder renovierten Räumen ausreichend Frischluft erhalten.

Der Untersuchungsumfang umfasst flüchtige organische Verbindungen (VOC) und die Aufzeichnung der Kohlendioxidkonzentration über mindestens einen Nutzungstag.

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Probenahme

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der örtlichen Gesundheitsbehörden oder des LASD haben die Luftproben zwischen Juni 2012 und Februar 2013 genommen. Diese trafen auch die Auswahl der Objekte und erhoben die gewünschten Daten zu den Gebäuden und Räumen. Die entsprechenden Fragebögen sind auf Nachfrage bei den Autoren erhältlich.

2.2 Analytik

Die auf Aktivkohle gesammelten VOC wurden mit Schwefelkohlenstoff / Methanol desorbiert und nach gaschromatographischer Trennung auf zwei Säulen mittels Flammenionisationsdetektor bestimmt. Details sind in [3] beschrieben.

2.3 Auswertung

Statistische Auswertungen wurden mit den Programmen PSPP und Microsoft Excel vorgenommen. Details sind in [3] beschrieben.

Für die Bewertung der CO₂-Konzentration in den Räumen wurden jeweils die gesamten Nutzungszeiten, einschließlich der Pausenzeiten, herangezogen, da eine genaue Protokollführung über die An- bzw. Abwesenheit der Kinder nicht umsetzbar war. Dies

Die VOC-Probenahme erfolgte aktiv durch Adsorption an Aktivkohle (Adsorptionsröhrchen Typ NIOSH). Details sind in [3] beschrieben. Die letzte Lüftung erfolgte am Abend vor der Probenahme; während der Probenahme blieben Fenster und Türen geschlossen („worst-case-Bedingungen“).

Die Kohlendioxidkonzentration wurde an mindestens einem kompletten Nutzungstag aufgezeichnet. Die Registrierung der Kohlendioxidkonzentrationen erfolgt in ein- bis fünfminütigem Rhythmus. Zum Einsatz kamen Messgeräte der Firmen Dittrich und Wöhler.

führt zu einem systematischen Fehler, der jedoch angesichts der weiten Schwankungsbereiche im Vergleich unterschiedlicher Räume akzeptabel erscheint. Offensichtlich fehlerhafte Werte, etwa durch Anhaften der Messgeräte, wurden eliminiert. Die einzelnen Messwerte wurden den Leitwert-Kategorien der Empfehlung der Innenraumkommission [4] zugeordnet und ausgezählt.

3 Allgemeine statistische Angaben

Die Untersuchungen erfolgten unter Beteiligung der Kreise und kreisfreien Städte des Landes Schleswig-Holstein. Insgesamt haben wir 50 Räume in 31 Gebäuden untersucht (s. Tabelle 1).

Nur ein Teil der Gebäude war vollständig neu erbaut worden, andere waren grundlegend (energie-

tisch) saniert. Zum Teil lag mehr als ein Jahr zwischen der Fertigstellung und der Untersuchung. Alle Gebäude waren jedoch ohne Altlasten, mit modernen Baustoffen ausgestattet und energiesparend. Zur Vereinfachung verwenden wir im Folgenden immer den Begriff „Neubauten“.

Tabelle 1: Anzahl untersuchter Räume in den Kreisen und kreisfreien Städten

Kreis / kreisfreie Stadt	Anzahl Räume	Kreis / kreisfreie Stadt	Anzahl Räume
Kiel	3	Kreis Pinneberg	3
Hansestadt Lübeck	9	Kreis Rendsburg-Eckernförde	3
Flensburg	3	Kreis Schleswig-Flensburg	4
Kreis Dithmarschen	4	Kreis Segeberg	4
Kreis Herzogtum Lauenburg	9	Kreis Steinburg	3
Kreis Ostholstein	2	Kreis Stormarn	3

Die Gebäude waren zwischen Juli 2010 und Dezember 2012 errichtet beziehungsweise saniert worden. Die Nutzung der Räume begann meist noch im Monat der Fertigstellung oder im Monat danach (37 von 50 Antworten). Zum Zeitpunkt der Probenahme nutzten die Schulen und Kindergärten ihre neuen Räume im Mittel bereits seit 10 Monaten. Circa 1/3 der Räume war weniger als 4 Monate alt.

Die je Nutzerin und Nutzer zur Verfügung stehende Fläche und Raumvolumen sind in Tabelle 2 wiedergegeben, soweit Angaben vorlagen. Sie unterscheiden sich nicht wesentlich von älteren Gebäuden [3]. Die Empfehlung von mindestens 1,5 m² [5] wurde in 5 von 44 Fällen unterschritten.

Tabelle 2: Fläche, Volumen pro Person

Fläche/Person, m ²		Volumen/Person, m ³	
Minimum	Median	Minimum	Median
0,9	2,6	2,6	7,5

Die Wände sind überwiegend verputzt und gestrichen (35 von 44 Räumen). Nur in 8 Räumen finden sich gestrichene Glas- oder Rauhfaser tapeten, in einem Papiertapete. Häufigste Fußbodenbeläge sind Linoleum (26 Räume) und Polyvinylchlorid (13), nur vereinzelt waren textile Teppichböden, Kautschuk, Kork oder Laminat verlegt. 18 Räume waren mit Massivholzmöbeln ausgestattet.

Die Räume werden überwiegend individuell über Fenster gelüftet. 10 Räume haben eine ergänzende technische Lüftung, zwei Räume werden ausschließlich über technische Anlagen gelüftet. Damit verfügt 1/5 der neuen Räume über technische Lüftungsanlagen.

Die Nutzerinnen und Nutzer empfanden die Räume überwiegend als trocken (34 von 40 Aussagen) und häufig als staubig (15 von 38), die Raumluft meist als unbelastet (30 von 39). Jedoch war es häufig zu warm (24 von 37) und stickig oder muffig (22 von 34). Geruchsprobleme gab es in 16 von 50 Räumen, Feuchtprobleme waren selten, ebenso Probleme mit Zugluft (je 4 Fälle). Mehrheitlich waren die Nutzerinnen und Nutzer mit den Verhältnissen zufrieden oder überwiegend zufrieden (36 von 49; Mittelwert 2,3 auf einer Skala von 1 bis 4).

Die Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur bei der Probenahme waren unauffällig (Tabelle 3).

Tabelle 3: Lufttemperatur, Luftfeuchte

Lufttemperatur, °C		Luftfeuchte, %	
Bereich	Median	Bereich	Median
17-25	21	30-59	49

4 Auswertung der VOC-Messungen

49 VOC-Proben waren auswertbar. Wir konnten in den Proben 89 verschiedene VOC nachweisen, von denen viele jedoch nur selten vorkamen. Auf die häufigsten 51 VOC entfallen 90 % der Nachweise. Die übrigen 38 Stoffe machten nur 10 % der Nachweise aus.

Die Tabellen 4 und 5 zeigen statistische Kennwerte für die VOC und für die Summe ausgewählter Stoffklassen. In Tabelle 4 haben wir Werte unterhalb der

Bestimmungsgrenze mit $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berücksichtigt. Bei Stoffen, die wir nur sehr selten nachgewiesen haben, ergeben sich so sehr niedrige Kennwerte. Für alle VOC sind daher die statistischen Kennwerte bei ausschließlicher Berücksichtigung von Befunden oberhalb der Bestimmungsgrenze (BG) im Anhang aufgelistet.

Zum Vergleich sind die entsprechenden Konzentrationen aus der schleswig-holsteinischen Schul- und Kindergartenstudie (LAsD 05/07) gegenübergestellt [3].

Tabelle 4: Statistische Kenngrößen, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Stoffname	Neubauten				LAsD 05/07 [3]		
	%>BG	P50	P95	MAX	P50	P95	MAX
Alkane							
n-Hexan*	79	1,0	5,0	24	<1	3,0	3060
n-Heptan	79	1,0	8,0	27	1,0	5,0	33
n-Octan	75	1,0	4,6	59	<1	3,0	350
n-Nonan	58	1,0	7,4	211	<1	6,0	230
n-Decan	85	2,0	26	50	1,0	17	180
n-Undecan	79	2,0	15	23	1,0	17	200
n-Dodecan	83	2,0	7,8	13	1,0	8,0	55
n-Tridecan	67	1,0	3,6	6	<1	2,0	27
n-Tetradecan	75	1,0	3,0	7	1,0	2,0	15
n-Pentadecan	77	1,0	2,0	4	<1	2,0	7
n-Hexadecan	73	1,0	2,0	2	1,0	2,0	4
n-Heptadecan	31	< 1	1,0	1	<1	1,0	3
n-Octadecan	2	< 1	0,5	1			
3-Methylhexan*	15	< 2	15	26	<2	2,0	52
2,3-Dimethylpentan*	6	< 2	6,2	18	<2	<2	19
2,4-Dimethylpentan*	2	< 2	< 2	40	<2	<2	35
2,3,4-Trimethylpentan*	42	< 2	13	21	<2	3,0	6
2,2,4-Trimethylpentan*	4	< 2	< 2	6	<2	<2	6
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	2	< 2	< 2	4	<2	<2	280
Cyclohexan	54	1,0	5,0	537	<1	4,7	28
Methylcyclopentan	29	< 1	2	71	<1	2,0	23
Methylcyclohexan	65	1,0	12	17	<1	3,7	145
Ethylcyclohexan	2	< 2	< 2	17			
Alkene							
1-Octen	19	< 1	1,0	4	<1	<1	440
1-Decen	31	< 1	1,6	3	<1	1,0	22
Alkohole							
Ethanol*	88	3,0	23	51	2,0	13	43
1-Propanol	92	12	1758	3564	<1	3,0	410
2-Propanol*	90	169	979	2427	14	289	1200
1-Butanol	94	13	59	232	3,0	12	39
Isobutanol*	23	< 2	3,6	45	<2	4,0	92
2-Ethyl-1-hexanol	94	5,0	16	108	1,0	15	175
Benzylalkohol*	4	< 2	< 2	4	<2	<2	260
Phenol	4	< 2	< 2	17			

Fortsetzung Tabelle 4: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Name	%>BG	P50	P95	MAX	P50	P95	MAX
Aromaten							
Benzol	19	< 1	2,0	4	<1	2,0	15
Toluol	94	3,0	13	18	2,0	18	120
m-Xylol	92	2,0	13	41	<1	13	130
p-Xylol	69	1,0	5,6	15	<1	9,0	79
o-Xylol	83	1,0	8,2	31	<1	5,7	70
Ethylbenzol	90	2,0	8,6	27	<1	7,7	59
Styrol	90	5,0	18	22	<1	4,0	18
1,2,3-Trimethylbenzol*	2	<2	<2	3	<2	<2	20
1,2,4-Trimethylbenzol	81	2,0	11	20	<1	8,0	109
Mesitylen	44	< 1	2,6	8	<1	2,0	26
2-Ethyltoluol	48	< 1	3,0	17	<1	2,7	25
3-Ethyltoluol	71	1,0	4,6	21	<1	5,0	51
4-Ethyltoluol*	2	<2	<2	3	<2	<2	18
n-Propylbenzol	63	1,0	2,0	21	<1	2,0	29
Naphthalin	44	< 1	1,0	1	<1	3,7	22
Terpene							
α-Pinen	94	42	936	4177	2,0	71	200
β-Pinen	81	4,0	52	130	<1	8,0	24
3-Caren	90	13	352	1290	1,0	23	130
Limonen	92	13	94	256	1,0	51	880
Camphen	10	< 2	3,0	26			
α-Terpinen*	6	< 2	6,2	27	<2	<2	5
Longifolen	42	< 1	2,0	3	<1	1,7	10
Aldehyde, Ketone							
Butanal	77	4,0	17	161	<1	3,0	15
Pentanal	90	9,0	58	113	<1	5,0	34
Hexanal	98	22	138	298	<1	11	77
Heptanal*	17	< 1	3,6	8	<2	2,0	7
Octanal*	25	< 1	3,0	10	<2	2,0	10
Nonanal	94	9,0	26	37	<1	12	27
Benzaldehyd	85	3,0	14	18	<1	9,0	46
Cyclohexanon	79	2,0	5,8	10	<1	1,7	12
2-Heptanon	4	< 2	< 2	7	<2	<2	3
Acetophenon	67	1,0	3,6	5	<1	1,0	18
Ester, Ether, Glykolderivate							
Ethylacetat*	2	< 2	< 2	7	<2	<2	44
n-Butylacetat	88	3,0	37	93	<1	21	144
Dimethylphthalat	2	< 1	< 1	1			
Ethylenglykolmonomethylether	65	3,0	18	59	<1	7,0	59
Ethylenglykolmonoethylether	25	< 1	2,6	4	<1	<1	88
Ethylenglykolmonobutylether	77	4,0	31	66	1,0	53	190

Fortsetzung Tabelle 4: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Name	%>BG	P50	P95	MAX	P50	P95	MAX
Phenoxyethanol	67	1,0	29	83	<1	16	150
2-Ethoxyethylacetat	33	< 1	8,6	25	<1	1,0	5
Diethylenglykolmonoethylether*	2	< 2	< 2	9	<2	16	232
Diethylenglykolmonobutylether	38	< 1	16	34	<1	27	200
Butyldiglykolacetat	23	< 1	3,6	20	<1	1,0	13
Propylenglykolmonomethylether*	17	< 2	12	420	<2	12	120
Methoxypropylacetat*	4	< 2	< 2	22	<2	<2	4
Propylenglykolmonoethylether*	2	< 2	< 2	11			
Propylenglykolmonopropylether*	4	< 2	< 2	13			
Propylenglykolmonobutylether*	21	< 2	7,2	36	<2	5,0	260
Dipropylenglykolmonobutylether*	2	< 2	< 2	59			
Phenoxypropanol	2	< 2	< 2	1			
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiisobutyrat	46	< 1	7,8	38	<1	3,0	15
Sonstige							
1,1,1-Trichlorethan	15	< 1	4,0	5	<1	<1	6
1,4-Dichlorbenzol	8	< 1	1,0	3	<1	<1	5
1-Chlornaphthalin	15	< 1	1,0	1	<1	1,0	10
Cyclopentasiloxan*	27	< 2	7,6	10	<2	6,7	30
nicht ident. Kohlenwasserstoffe*	79	8,0	174	1150	70	3010	4200

% > BG: Anteil der Werte oberhalb Bestimmungsgrenze;

P 50 = 50. Perzentil, Median; P 95 = 95. Perzentil, Referenzwert, Max: Höchster gemessener Wert;

Werte < BG sind mit der halben BG berücksichtigt;

*: Berechnet als Toluolequivalent.

Zur besseren Übersicht haben wir chemisch verwandte Substanzen zu Klassen zusammengefasst (Tabelle 5) und außerdem den TVOC-Wert (englisch: „Total

Volatile Organic Compounds“ [6, 7]) berechnet. Dabei haben wir nur Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze berücksichtigt.

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

Gruppe	Neubauten			LAsD 2005/07 [3]			Signifikanz (U-Test)
	P50	P95	MAX	P50	P95	MAX	
Alkane (einschl. nicht identifizierte Kohlenwasserstoffe)	35	278	1540	11	196	7669	<0,001
Aromaten (ohne Naphthaline)	23	60	224	10	73	518	<0,001
Alkohole	261	2509	6064	33	371	1213	<0,001
Terpene	83	1412	5734	17	124	917	<0,001
Aldehyde (ab Butanal)	49	295	507	3	31	160	<0,001
Ester, Ether, Glykolderivate	24	182	469	17	187	2113	<0,001
TVOC (einschl. nicht identifizierte Kohlenwasserstoffe)	328	2498	6335	95	786	8198	<0,001

Alle Proben, nur Werte > BG berücksichtigt;

Wie die Tabelle 5 zeigt, fanden wir in den Neubauten für die meisten VOC-Gruppen höhere Konzentrationen. Dies gilt ebenso für die mittleren Belastungen (P 50, Median) wie für die höchstbelasteten Räume (P 95, 95. Perzentil). Der Unterschied ist für alle aufgeführten Stoffgruppen statistisch signifikant. Grund für die höheren Konzentrationen ist die große Menge neu eingebrachter Materialien – trotz des Trends zu emissionsarmen Baustoffen.

Für die Untersuchungen haben wir kein bestimmtes Gebäudealter vorgegeben. Daher sind sowohl Räume enthalten, die erst einen Monat alt waren, als auch mehr als zwei Jahre alte Räume. Das wirkt sich auf die VOC-Belastung aus. Bild 1 zeigt wie TVOC-Wert und Gebäudealter bzw. Renovierungszeitpunkt zusammenhängen: Je länger die Baumaßnahme zurück liegt, desto niedriger sind die VOC-Konzentrationen. TVOC-Konzentrationen über ca. 1.000 µg/m³ fanden

wir überwiegend bei Räumen, die jünger als 9 Monate waren. In Bild 1 haben wir solche Räume, in denen Richtwert-Überschreitungen für einzelne VOC oder VOC-Gruppen vorlagen, mit roten Punkten dargestellt, Räume ohne Richtwert-Überschreitung mit blauen Dreiecken (weitere Informationen zu Richtwerten siehe Kapitel 5). Es ist erkennbar, dass auch Richtwert-Überschreitungen häufiger bei Räumen vorkamen, die vor weniger als 9 Monaten fertig gestellt worden waren. Ferner wiesen alle Räume, bei denen der TVOC-Gehalt über 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stufe 3) lag, Richtwert I Überschreitungen für einzelne Stoffe auf. Das entspricht den Erwartungen, denn die neu aufgebrauchten Farben, Kleber, Fußböden, Hölzer und so weiter geben zu Beginn relativ viele VOC in die Raumluft ab. Zu dem auffälligen Raum mit einer TVOC-Konzentration über 6.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siehe Kapitel 8.

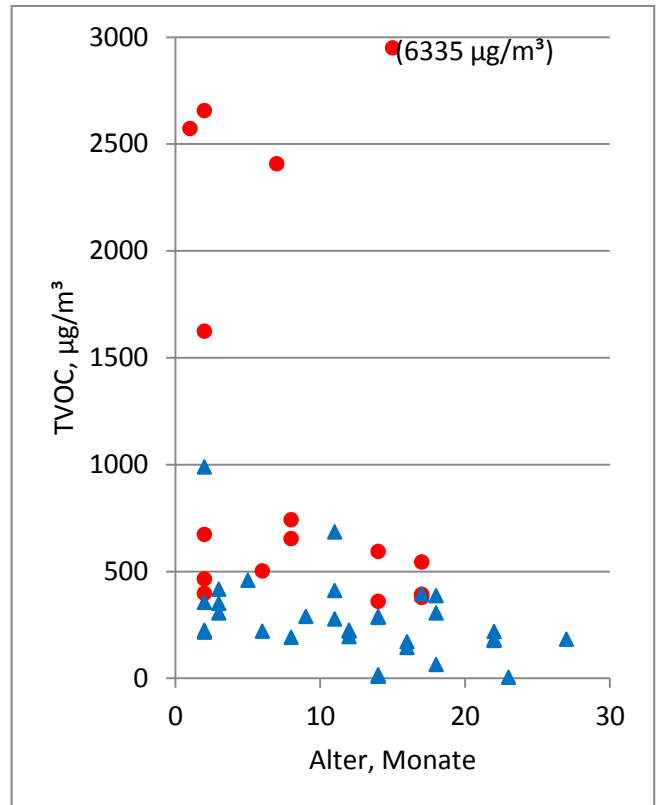


Bild 1: Zeit seit Neubau/Renovierung und TVOC-Belastung (rot = Räume mit RW-Überschreitung für einzelne VOC oder VOC-Gruppen, blau = Räume ohne RW-Überschreitung)

Die statistischen Kennwerte für die aliphatischen, unverzweigten, gesättigten Aldehyde sind in Tabelle 4 aufgelistet. Bild 2 vergleicht die Referenzwerte (95. Perzentil) mit den Hintergrundwerten [3]. Vor allem die flüchtigeren Aldehyde (Butanal, Pentanal, Hexanal) waren in Neubauten höher konzentriert. Die Aldehyde stellen auch die aus gesundheitlich-hygienischer Sicht auffälligste Gruppe dar (siehe Abschnitt 5.1).

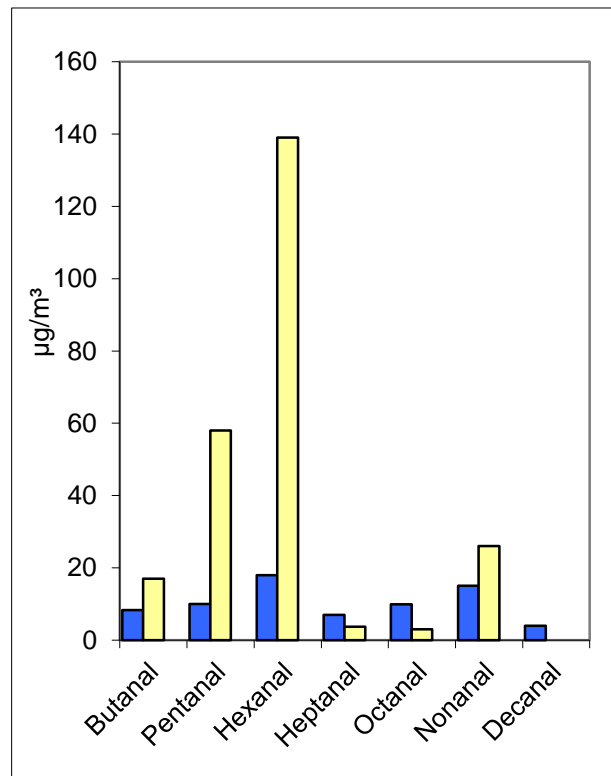


Bild 2: Vergleich der Referenzwerte (95. Perzentil) von Aldehyden (blau: Hintergrundwerte, LASD 2005/07 [3]; gelb: Neubauten)

5 Raumlufthygienische Bewertung der Proben

Die Bewertung von Raumlufthproben erfolgt über Richtwerte für einzelne Stoffe sowie anhand der Gesamtbelastung (TVOC-Konzept, Siedebereich von n-Hexan bis n-Hexadecan [6, 7]). Beide Verfahren hat die Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (ad-hoc-AG IRL) detailliert beschrieben [8].

Die Konzentrationsbereiche des TVOC-Konzeptes und die Richtwerte gelten für Nutzungsbedingungen,

5.1 Vorliegen von Richtwertüberschreitungen

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

Weil in den letzten Jahren für immer mehr VOC Richtwerte veröffentlicht wurden, haben wir unsere Daten über Containerklassen [1] und Schulen und Kindergärten [3] noch einmal geprüft. Tabelle 6 enthält die Zahl der Richtwertüberschreitungen in allen drei Studien.

In 18 von 49 Neubau-Räumen war mindestens der RW I von einem VOC bzw. einer VOC-Gruppe über-

also bei regelmäßiger Lüftung. Die Proben haben wir jedoch meist unter worst-case-Bedingungen genommen, also ohne Lüftung. Die gemessenen Konzentrationen sind daher höher als in der Realität, die Einstufung entsprechend etwas schlechter. Dies war bei der Schul- und Kindergartenstudie 05/07 und bei der Untersuchung der Containerräume auch der Fall. Die Untersuchungen sind deshalb direkt miteinander vergleichbar.

Insgesamt waren es 28 Fälle, die aliphatische Aldehyde, Terpene, Alkane und Ethylenglykollmonomethylether sowie Glykolderivate ohne individuellen Richtwert betrafen (Tabelle 6). Zudem überschritten in einem Raum bicyklische Terpene (Pinen, Caren) den Eingriffswert RW II. Naphthalin, das in älteren Gebäuden häufig zu Problemen führt, spielt in neuen Gebäuden keine Rolle.

Mehr als jeder dritte Raum in einem Neubau wies Überschreitungen auf, bei Containerklassenräumen und in älteren Gebäuden waren es circa 20 bis 25 %. Überschreitungen von Richtwerten II sind selten. Richtwertüberschreitungen können nicht nur baustoffbedingt, sondern auch durch Pflegemittel verursacht sein.

Tabelle 6: Überschreitung von Innenraum-Richtwerten I und II für VOC

Anzahl untersuchter Räume			Neubauten 2013 N = 49		Container- klassen 2011 [1] N = 41		Schulen, Kinder- gärten 2005/07 [3] N = 285	
	RW I*	RW II*	>RW I	>RW II	>RW I	>RW II	>RW I	>RW II
Alkylbenzole, C ₉ bis C ₁₅	100	1000	0	0	1	0	4	0
Naphthalin	2	20	0	0	0	0	15	2
Aromatenarme Kohlenwasser- stoffgemische, n-C ₉ bis n-C ₁₄ ^{a)}	200	2000	4	0	1	0	9	2
Bicyclische Terpene (Leitsub- stanz α -Pinen)	200	2000	7	1	2	0	3	0
Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)	100	2000	10	0	6	0	2	0
Benzaldehyd	20	200	0	0	1	0	5	0
Ethylenglykolmonomethylether	20	200	2	0	1	0	4	0
Ethylenglykolmonobutylether	100	1000	0	0	0	0	6	0
Ethylenglykolmonophenylether	29**	290**	3	0	0	0	0	0
Propylenglykolmonobutylether	28**	280**	1	0	0	0	0	0
Dipropylenglykolmonobutylether	40**	400**	1	0				
Richtwertüberschreitungen ins- gesamt	---	---	28	1	12	0	48	4
Anzahl betroffene Räume	---	---	18	1	8	0	42	4
Anteil betroffene Räume	---	---	38 %	2 %	20 %	0 %	23 %	2 %

*: RW werden in mg/m³ festgelegt. Abweichend davon verwenden wir wie im übrigen Text die Einheit $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1 \text{ mg}/\text{m}^3 = 1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

** : Kein individueller Richtwert festgelegt. Der Standard-RW I für solche Glykolverbindungen beträgt 0,005 ppm, der Standard-RW II 0,05 ppm. Die angegebenen Werte sind daraus berechnete Konzentrationen im $\mu\text{g}/\text{m}^3$

a): Einschließlich nicht identifizierter Kohlenwasserstoffe im Siedebereich

Seit 2013 gibt es einen Summenrichtwert für Glykolverbindungen in der Raumluft [9]. Dieser ist die Summe aus den Konzentrationen der Einzelstoffe geteilt durch den jeweiligen Richtwert des Einzelstoffes. Die Formel lautet: $\sum \frac{c_i}{RW_i} < 1$

Es wird also zunächst errechnet, zu welchem Anteil die einzelnen gemessenen Glykole ihren jeweiligen Richtwert ausschöpfen. Diese Anteile werden dann für alle Glykole zum sogenannten R-Wert addiert. Ist die

Summe größer als 1, liegt eine Richtwertüberschreitung vor.

Das Verfahren berücksichtigt, dass chemisch ähnliche Stoffe im Körper eine ähnliche Wirkung entfalten. Sie müssen deshalb nicht nur einzeln, sondern auch in der Summe betrachtet werden.

Insgesamt fanden wir in 11 Räumen eine Überschreitung des Summen-RW I.

Tabelle 7: Überschreitung von Innenraum-Richtwerten I und II für die Summe der Glykolverbindungen und Verteilung der R-Werte

	Anzahl n	R-Wert ^{a)}		
		P50	P95	Max
Überschreitungen RW I	11	0,4	2,9	4,4
Überschreitungen RW II	0	0,05	0,3	0,5

a): Berechnet gemäß $R = \sum C_i / RW_i$ [9]

Bild 3 zeigt, dass in 6 der 11 Fälle auch bereits eine RW-Überschreitung für wenigstens eine einzelne Glykolverbindung bestand (Räume Nr. 1, 2, 3, 4, 8, 11). In 5 Räumen waren die einzelnen Glykolverbindungen nicht zu beanstanden, in der Summe jedoch etwas erhöht. Nicht für alle Glykolverbindungen liegen ausreichende Daten vor, um einen Richtwert abzuleiten.

Für solche Stoffe wird ersatzweise mit einem „Default-RW I“ von 0,005 ppm gerechnet. Dies ist im Sinne der Vorsorge ein strenger Wert. Die Überschreitung des Summen-RW I in den Räumen 4, 5, 6, 7, 9 und 10 wird wesentlich von solchen nicht bewertbaren Glykolen verursacht. In all diesen Fällen ist der RW I aber nur wenig überschritten.

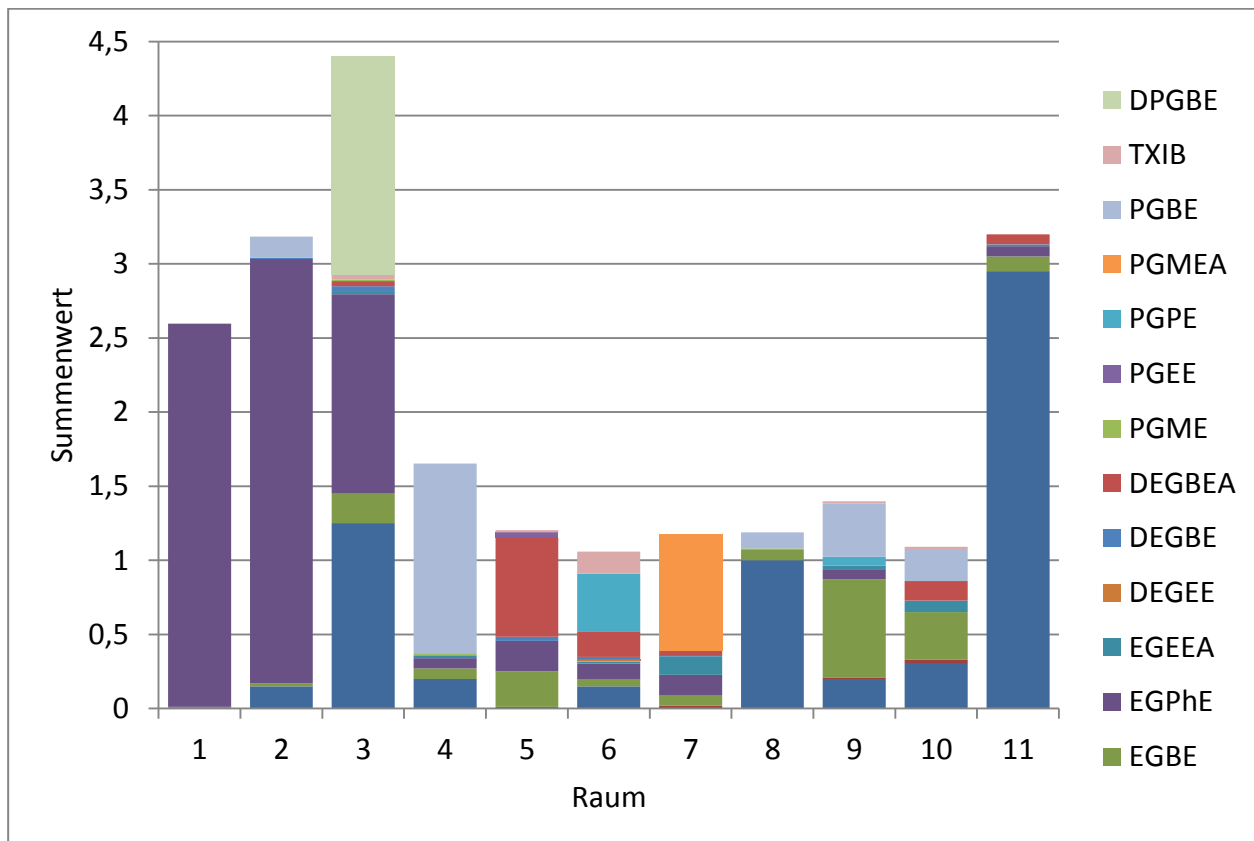


Bild 3: Räume mit Überschreitung des Summen-Richtwertes I für Glykole; Anteil einzelner Glykolverbindungen an der Summe

5.2 Einstufung nach dem TVOC-Konzept

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

wir das TVOC-Konzept vereinfacht dargestellt; detaillierte Informationen finden sich zum Beispiel in [6, 7, 8].

Tabelle 8: Einstufung nach dem TVOC-Konzept [6, 7, 8]

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

Ordnen wir die in den Räumen gemessenen TVOC-Werte den Stufen 1 bis 5 zu, erhalten wir das in Bild 4 dargestellte Ergebnis.

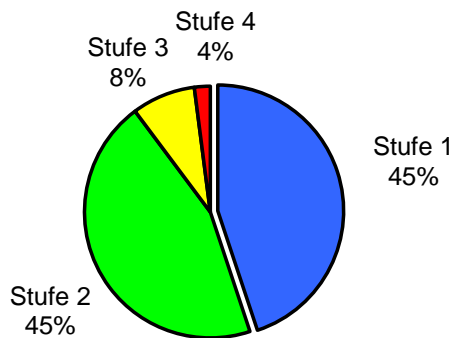


Bild 4: Bewertung der Proben nach dem TVOC-Konzept

Die Neubauten wiesen höhere VOC-Konzentrationen auf als übliche beschwerdefreie Räume (siehe Abschnitt 4.1). Das wirkt sich auch auf die TVOC-Einstufung aus. Rund 90 % der Räume waren „hygienisch unbedenklich“ (Stufe 1) bzw. „hygienisch noch unbedenklich“ (Stufe 2). Bei der Schul- und Kindergartenstudie 05/07 fielen 97 % der Räume in diese Kategorien [3]. Der Unterschied wird deutlicher, wenn wir die Räume in der besten Kategorie, TVOC-Stufe 1, betrachten: 45 % der neuen Räume im Vergleich zu 78 % bei der Schul- und Kindergartenstudie 05/07.

Etwa jeder zehnte Raum war hygienisch auffällig oder bedenklich (TVOC-Stufe 3 oder 4). Die Zeit zwischen Fertigstellung und Luftuntersuchung war bei diesen Räumen relativ kurz (< 9 Monate, siehe auch Abschnitt 4, Bild 1).

Alle Räume mit (unterstützender) technischer Lüftung fielen in die TVOC-Stufe 1 oder 2. Dies liegt unter anderem daran, dass die Lüftungsanlage häufig permanent eingeschaltet ist. Dadurch findet auch im ungünstigsten Fall immer ein Luftaustausch statt.

6 Kohlendioxidkonzentrationen

Menschen atmen Kohlendioxid (CO₂) aus. Halten wir uns in geschlossenen Räumen auf, steigt die CO₂-Konzentration deshalb schnell an. Je „verbrauchter“ die Luft ist, desto mehr CO₂ enthält sie. Die CO₂-Konzentration in Innenräumen sollte nicht höher als 1.000 ppm sein; steigt der Wert höher, müssen wir mehr lüften. Das erkannte Pettenkofer bereits im Jahr 1858 [10]. In den letzten Jahrzehnten interessierten sich Fachleute vor allem für chemische Verunreinigungen der Raumluft (VOC). Erst seit einigen Jahren erkennen wir wieder die Bedeutung des Kohlendioxids beziehungsweise des Lüftens. Denn wenn Menschen sich in einem Raum schlecht fühlen, obwohl die VOC-Konzentrationen niedrig sind, kann das an fehlender Frischluft liegen. Außerdem gibt es einen Zusammenhang zwischen Lernerfolg und CO₂-Konzentration [11, 12]. „Die Senkung der CO₂-Konzentration ist verknüpft mit höherer Aufmerksamkeit, einer intensiveren Schüler/Lehrer-Kommunikation, einem geringeren Geräuschpegel und einer Senkung der Beanspruchung (gemessen an der Herzfrequenz).“ [11]

Eine ausreichende Lüftung wirkt sich also sowohl gesundheitlich (VOC) als auch hygienisch (CO₂) und pädagogisch positiv aus.

Fenster, Türen und Wände moderner Gebäude sind fast luftdicht, um Energie zu sparen. Luft wird nur ausgetauscht, wenn Fenster geöffnet sind. Wir müssen häufiger und bewusster Lüften als in einem alten, zugigen Gebäude. Nutzerinnen und Nutzer müssen dazu ihre Lüftungsgewohnheiten überdenken und gegebenenfalls den baulichen Bedingungen des Gebäudes anpassen.

Wir haben in den Räumen an mindestens einem Nutzungstag die Entwicklung der CO₂-Konzentration aufgezeichnet, um zu sehen, ob in modernen Gebäuden ausreichend Frischluft zugeführt wird.

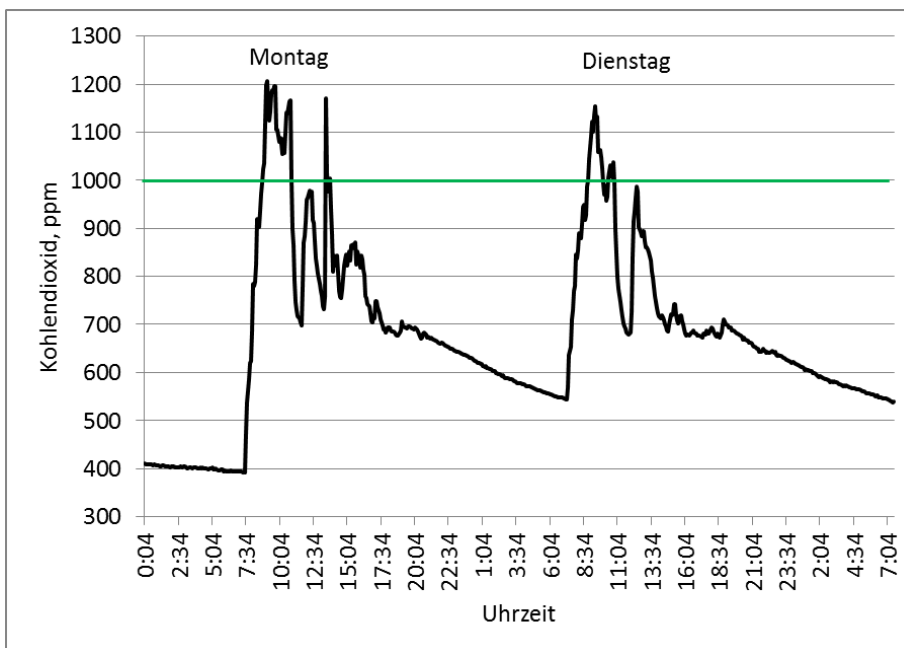


Bild 5: Verlauf der CO₂-Konzentration in einer Kindertagesstätte über zwei Tage

Bild 5 gibt den Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Raum wieder. Der sehr rasche Anstieg der Konzentration mit Betreuungs- oder Unterrichtsbeginn ist typisch; innerhalb von 15 - 20 min wird der Leitwert I von 1.000 ppm [4] erreicht oder überschritten. Im abgebildeten Fall bleibt die CO₂-Konzentration durch angemessenes Lüftungsverhalten immer akzeptabel und überschreitet den Leitwert I nur wenig. Interessant ist der Kurvenverlauf nach Nutzungsende: Vor

dem Verlassen des Raumes wird offenbar gelüftet und schnell eine Konzentration von ca. 700 ppm erreicht. Der natürliche Luftwechsel genügt dann aber nicht, um über Nacht etwa Außenluftverhältnisse zu erreichen. An beiden Tagen fällt die CO₂-Konzentration in gut 12 Stunden nur um etwa 160 bis 170 ppm ab. Unter Annahme einer CO₂-Außenluftkonzentration von circa 400 ppm bedeutet dies eine Luftwechselrate von weniger als 0,1/h.

Bild 6 zeigt an Hand eines anderen Raumes, wie das Verhalten die Raumluft beeinflusst. Am Montag lüfteten die Nutzer den Raum häufiger, zu erkennen an den zwischenzeitlich immer wieder fallenden Konzentrationen. Die CO₂-Konzentration stieg daher nur langsam stufenweise an und überschritt den Leitwert von 1.000 ppm nur wenig. Am Dienstag wurde nur zweimal gelüftet und die CO₂-Konzentration überstieg zeitweise den Leitwert II (2.000 ppm). Wie beim Raum aus Bild 5 fällt die Konzentration über Nacht wegen der fast luftdichten Bauweise sehr langsam.

Die Zeitanteile, an denen die CO₂-Konzentration in den drei Kategorien der Empfehlung der Ad-hoc-AG IRL lag, sind in Tabelle 9 zusammengefasst und in Bild 7 für jeden Messtag dargestellt. Dabei sollte beachtet werden, dass ein Teil der „hygienisch unbedenklich“ bewerteten Zeit Pausenzeiten sind, in denen sich die Schülerinnen und Schüler nicht (dauerhaft) im Raum aufhalten.

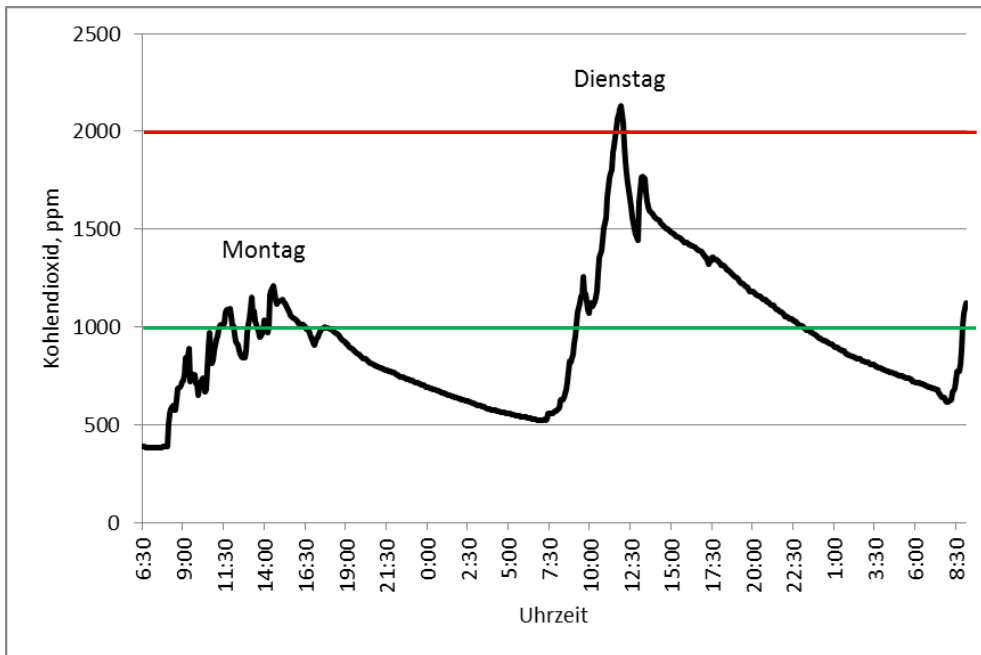


Bild 6: Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Kindergarten über zwei Tage

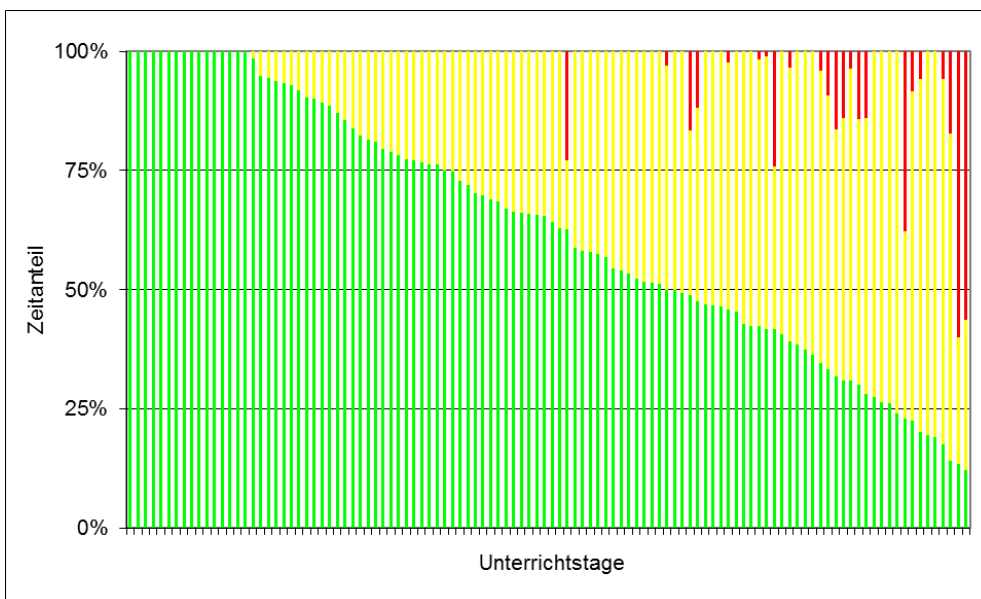


Bild 7: Verteilung der CO₂-Konzentration an 110 Messtagen (grün: < 1.000 ppm, gelb: 1.000 – 2.000 ppm, rot: > 2.000 ppm)

Tabelle 9: Zeitanteile in den drei Bewertungskategorien (110 Messtage)

CO ₂ (ppm)	Bewertung	Empfehlung	Median	Spanne
< 1.000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen	65 %	12 – 100 %
1.000-2.000	Hygienisch auffällig	Lüftung intensivieren, Verhalten überprüfen	34 %	0 – 81 %
> 2.000	Hygienisch inakzeptabel	+ Belüftbarkeit prüfen, ggf. weitere Maßnahmen	0 %	0 – 60 %

Die CO₂-Konzentration schwankt sehr stark. Einige Räume blieben während der gesamten Nutzungszeit unter 1.000 ppm CO₂, andere hielten den Wert nur während weniger als 1/5 der Zeit ein. An zwei Tagen lag während mehr als der Hälfte des Messzeitraumes die CO₂-Konzentration über 2.000 ppm, was also „hygienisch inakzeptabel“. Die durchschnittliche CO₂-Konzentration (Mediane) an den Messtagen lag zwischen circa 440 ppm und 2.400 ppm (Median aller Tage: circa 860 ppm). Extrem geringe Konzentrationen wie 440 ppm, was etwa der Außenluft entspricht, dürften auf extremes Lüften oder sehr wenige Personen im Raum zurückzuführen sein.

In den meisten Fällen ist die Lüftung annehmbar. Zwar wurde an jedem fünften Messtag der Wert von 2.000 ppm zeitweise erreicht oder überschritten, doch verbrachten die Kinder durchschnittlich 65 % der Zeit unter „hygienisch unbedenklichen“ Bedingungen, also bei maximal 1.000 ppm CO₂ in der Raumluft.

Wir können nicht damit rechnen, dass in jedem Raum zu jeder Zeit der Leitwert 1.000 ppm unterschritten wird. Als annehmbar könnte man daher ansehen, wenn

- zu keiner Zeit die CO₂-Konzentrationen oberhalb von 2.000 ppm liegt
- und während mindestens 50 % der Zeit der Wert von 1.000 ppm unterschritten wird.

Diese Kriterien erfüllen rund 64 % der in den Neubauten aufgezeichneten Tage bzw. 56 % der untersuchten Räume. Bei den Containerklassenräumen waren es weniger als 25 % [1].

Räume mit (unterstützender) technischer Lüftung wiesen geringere CO₂-Konzentrationen auf (Bild 9). So lagen diese während durchschnittlich 73 % des Tages unter 1.000 ppm, nie waren die Konzentrationen höher als 1.500 ppm.

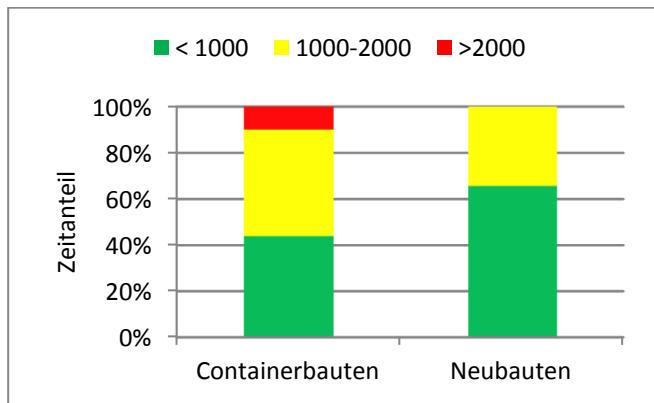


Bild 8: Anteil der bei <1.000, 1.000-2.000 und >2.000 ppm CO₂ verbrachten Zeit (Mediane)

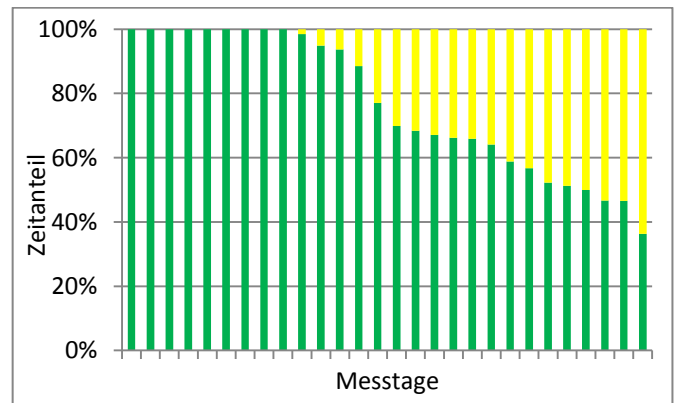


Bild 9: Verteilung der CO₂-Konzentration bei technischer Lüftung (grün: < 1.000 ppm, gelb: 1.000 – 2.000 ppm, rot: > 2.000 ppm)

Damit ist die Raumluft in den Neubauten besser als in den Containergebäuden [1], die wir untersucht haben (Bild 8).

Die Lüftungsanlagen bewirkten fast immer ausreichende Frischluftzufuhr und gute Raumluftverhältnisse.

7 Gesundheits- und Geruchsbeschwerden

Die Nutzerinnen und Nutzer sollten angeben, ob sie seit Bezug der neuen Räume Gesundheitsprobleme haben, die sie mit den Räumen in Verbindung bringen. Bei 8 von 48 Räumen wurde über Gesundheitsprobleme berichtet. Es handelt sich um reine Selbstauskunft, eine ärztliche Untersuchung erfolgte nicht.

Wir haben sieben Krankheitsbilder aufgelistet, zu denen die Befragten angeben konnten, ob sie nie,

manchmal oder häufig auftreten. Ordnet man den Antworten „nie“, „manchmal“ und „häufig“ die Werte 0, 1 und 2 zu, kann man die durchschnittliche Häufigkeit für die einzelnen Beschwerden berechnen (Tabelle 10). Nasen- und Halsreizungen sowie Kopfschmerzen waren die häufigsten Beschwerden. Wenn Beschwerden auftraten, dann gaben die Nutzerinnen und Nutzer meist mehrere Krankheitsbilder an.

Tabelle 10: Gesundheitsbeschwerden, Selbsteinschätzung, Score (nie = 0, manchmal = 1, häufig = 2)

Augenbrennen	Nasenreizung	Halskratzen	Husten	Hautreizung	Kopfschmerzen	Müdigkeit
0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,5	0,4

Interessant ist, ob die Gesundheitsbeschwerden mit der Luftqualität im Raum zusammenhängen. Beispielfähig haben wir dies für Kopfschmerzen untersucht.

Über gelegentliche oder häufige Kopfschmerzen klagten Nutzerinnen und Nutzer von 6 Räumen in vier Gebäuden. Für diese Räume haben wir CO₂-Messungen von insgesamt 12 Nutzungstagen. Bild 10 verdeutlicht, dass in den Räumen mit Beschwerden die Luftqualität schlechter war, als in den Räumen ohne Kopfschmerzen. In den betroffenen Räumen lag die CO₂-Konzentration nur während ca. 28 % der Zeit unter dem Zielwert von 1.000 ppm.

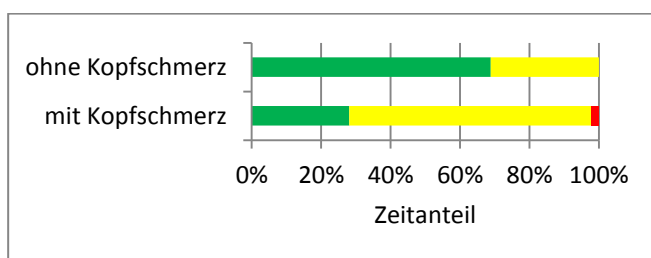


Bild 10: CO₂-Konzentration in Räumen mit und ohne Kopfschmerzen (grün: < 1.000 ppm, gelb: 1.000 - 2.000 ppm, rot: > 2.000 ppm)

Die durchschnittliche CO₂-Konzentration (Median) war in diesen Räumen mit 1319 ppm ebenfalls deutlich höher als in den Vergleichsräumen (834 ppm).

Die TVOC-Konzentration unterschied sich bei betroffenen und nicht betroffenen Räumen dagegen kaum (Tabelle 11). Zwar war die durchschnittliche Konzentration in Räumen, in denen über Kopfschmerzen geklagt wurde, etwas höher. Doch liegen die Belastungen im Bereich zwischen „hygienisch unbedenklich“ (TVOC = 1) und „hygienisch noch unbedenklich“ (TVOC = 2) und die höchsten Gesamtbelastungen gab es in beschwerdefreien Räumen.

Richtwertüberschreitungen für einzelne VOC gab es in Räumen mit Klagen über Kopfschmerzen häufiger (6 Überschreitungen in 6 Räumen im Vergleich zu 18 Überschreitungen in 41 Räumen, Tabelle 12). Am deutlichsten ist der Unterschied bei den Aldehyden, die in jedem zweiten Raum mit Beschwerden über dem RW I lagen. Die durchschnittliche Konzentration (Median) betrug bei den 6 Räumen 99 µg/m³, bei 41 Räumen ohne Kopfschmerzen bei 36 µg/m³.

In dem einzigen Raum, der einen Eingriffswert (RW II für bicyklische Terpene) überschritt, gab es keine gesundheitlichen Probleme.

Zum Zusammenhang zwischen Gesundheitsbeschwerden und Raumluftqualität können wir nur Anhaltspunkte liefern, weil die Auskünfte über Gesundheitsbeschwerden nicht ärztlich überprüft wurden. Weil es sich nur um sehr wenige Räume und Fälle handelt, können diese Beobachtungen auch zufällig sein.

Tabelle 11: TVOC-Stufe und Kopfschmerzen

	n	Median	TVOC = 1	TVOC = 2	TVOC = 3	TVOC = 4, 5
Ohne Kopfschmerz	41	306 µg/m ³	20 (49 %)	17 (41 %)	3 (7 %)	1 (2 %)
Mit Kopfschmerz	6	405 µg/m ³	1 (17 %)	4 (67 %)	1 (17 %)	0

Tabelle 12: Überschreitung von Innenraum-Richtwerten und Kopfschmerzen

	n	> RW	Kohlenwasserstoffe, n-C ₉ bis n-C ₁₄	Bicyclische Terpene	Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁	EGMME
Ohne Kopfschmerz	41	18	3 (7 %)	7 (17%)	7 (17 %)	1 (2 %)
Mit Kopfschmerz	6	6	1 (17 %)	1 (17 %)	3 (50 %)	1 (17 %)

8 Maßnahmen bei erhöhten VOC-Konzentrationen

Bei erhöhter VOC-Konzentration und Überschreitung von Richtwerten haben wir empfohlen unter Nutzungsbedingungen (Lüften vor Probenahmebeginn + 5 min während der Probenahme) erneut zu messen. Erst diese Probe erlaubt die genaue Beurteilung der Belastung, da sich die Richtwerte und das TVOC-Konzept auf Messungen unter Nutzungsbedingungen beziehen.

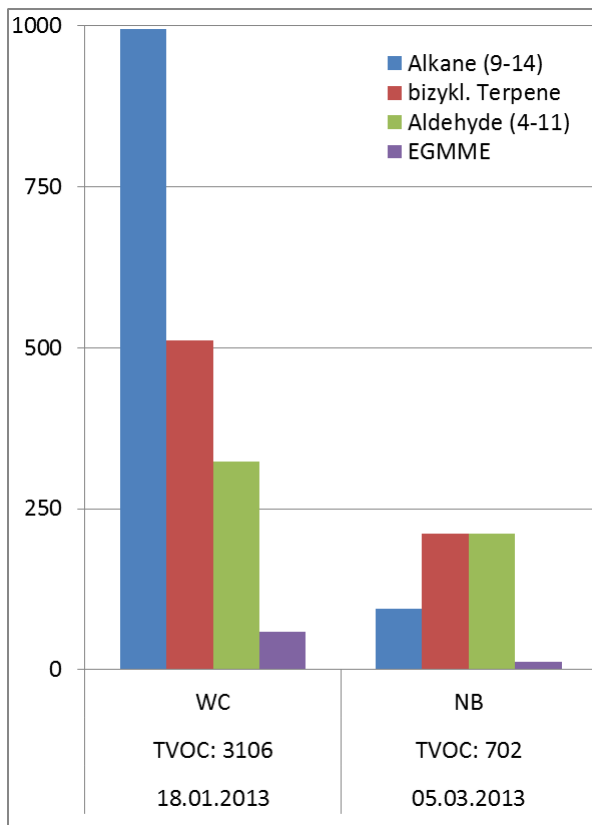


Bild 11: Konzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) auffälliger VOC in einem Raum bei Erstmessung (worst case) und Kontrollmessung (Nutzungsbedingungen)

Bei Überschreitungen des Zielwertes (größer RW I aber kleiner RW II) empfehlen wir entsprechend der Handreichung der ad-hoc AG IRL zunächst konsequent und häufiger zu lüften [5]. Gerade bei Neubauten sinken die VOC-Konzentrationen in den ersten Monaten deutlich, weil die neuen Materialien wie Farben, Kleber oder Fußbodenbeläge auslüften und immer weniger VOC an die Raumluft abgeben.

Das Bild 11 zeigt die Ergebnisse einer ersten Messung am 18.1. und der Kontrollmessung im selben Raum ca. 10 Wochen später. Bei der ersten Messung war der Raum ungelüftet (worst-case), die zweite Messung erfolgte unter Nutzungsbedingungen. Zwischen beiden Messungen hatte sich die Situation wesentlich verbessert. Die Gesamtbelastung fiel nun in die TVOC-Stufe 2 „hygienisch noch unbedenklich“ statt zuvor Stufe 4 „hygienisch bedenklich“. Alkane und Ethylenglykolmonomethylether (EGMME) unterschritten den RW I (Zielwert), die bityklichen Terpene erreichten den RW I gerade. Nur die Aldehyde hielten den RW I zu diesem Zeitpunkt noch nicht ein.

Das Beispiel unterstreicht, dass sich unmittelbar nach Renovierungen auftretende Raumluftprobleme bei guter Lüftung häufig innerhalb akzeptabler Zeit oft ohne weitere Maßnahmen lösen. Dies ist aber nicht immer der Fall, wie das nächste Beispiel zeigt.

In einer Kinderkrippe wurde der Eingriffswert (RW II) für bitykliche Terpene ($2.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in ungelüftetem Zustand (worst case) nicht eingehalten. Die Konzentration betrug ca. $5.620 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auch lag die Aldehydkonzentration mit $238 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem Zielwert (RW I = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mehrere Kontrollmessungen bestätigten auch hier, dass unter Nutzungsbedingungen die Belastung viel niedriger war (siehe Bilder 12 und 13): Die Aldehyde lagen unterhalb des RW I und die Terpene hielten den RW II ein, überschritten aber den Zielwert von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ noch deutlich. Während vier Monaten verbesserte sich die Situation nicht und in einem Schlafräum der Kinderkrippe fanden wir noch ungünstigere Verhältnisse. Im Gegensatz dazu war der Altbau trakt, am 28.5. zur Kontrolle ebenfalls untersucht, unauffällig. Sehr wahrscheinlich sind Holzbaustoffe (OSB-Platten), aus denen der Neubau überwiegend besteht, die Ursache für die hohen Terpenkonzentrationen. Bauliche Maßnahmen sind unter diesen Umständen schwer umsetzbar. Deshalb sollen die Nutzer die neuen Räume bis auf weiteres sehr intensiv lüften. Ziel ist es, im Verlaufe des Sommers die Konzentrationen dauerhaft zu senken. Das LAsD und das zuständige Gesundheitsamt boten weitere Raumluftuntersuchungen zur Erfolgskontrolle an.

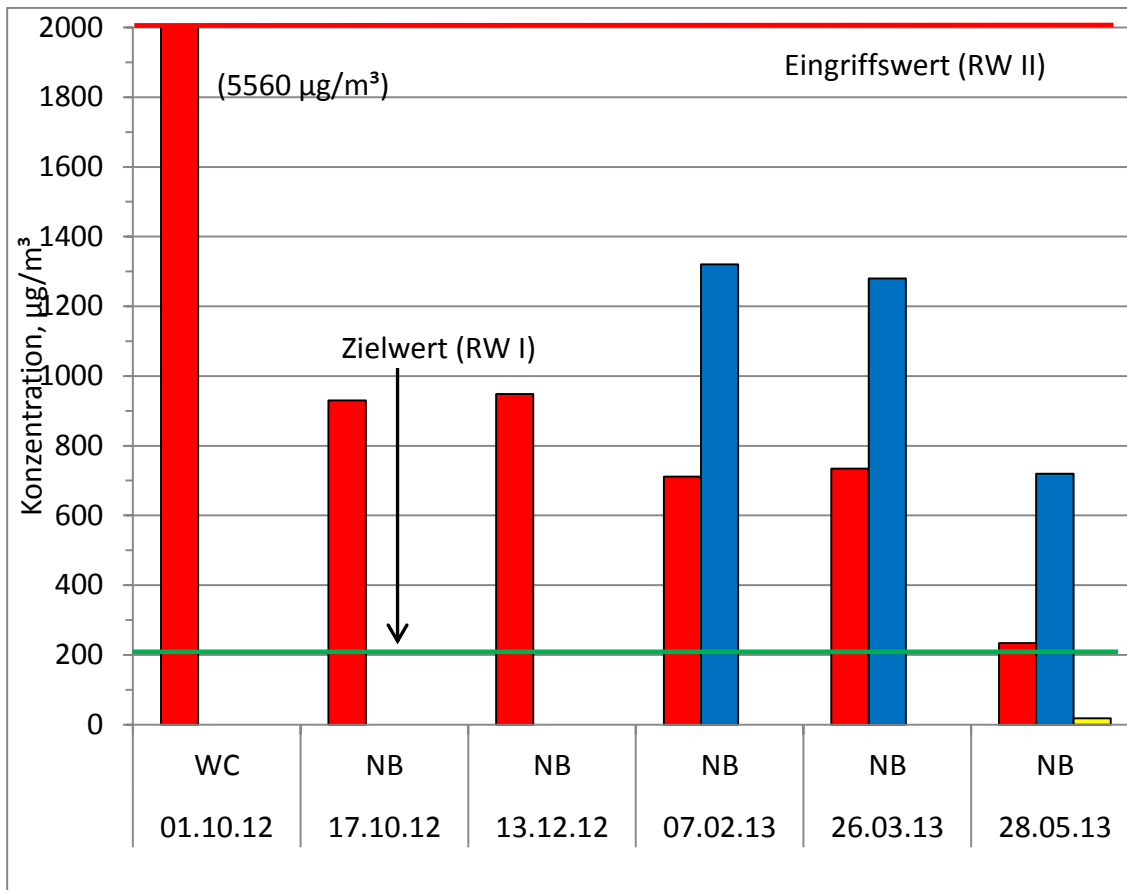


Bild 12: Terpenkonzentration in einem Kripfenraum (rot), benachbarten Schlafraum (blau) und im Altbaustrakt (gelb); NB = Nutzungsbedingungen, WC = worst case Bedingungen

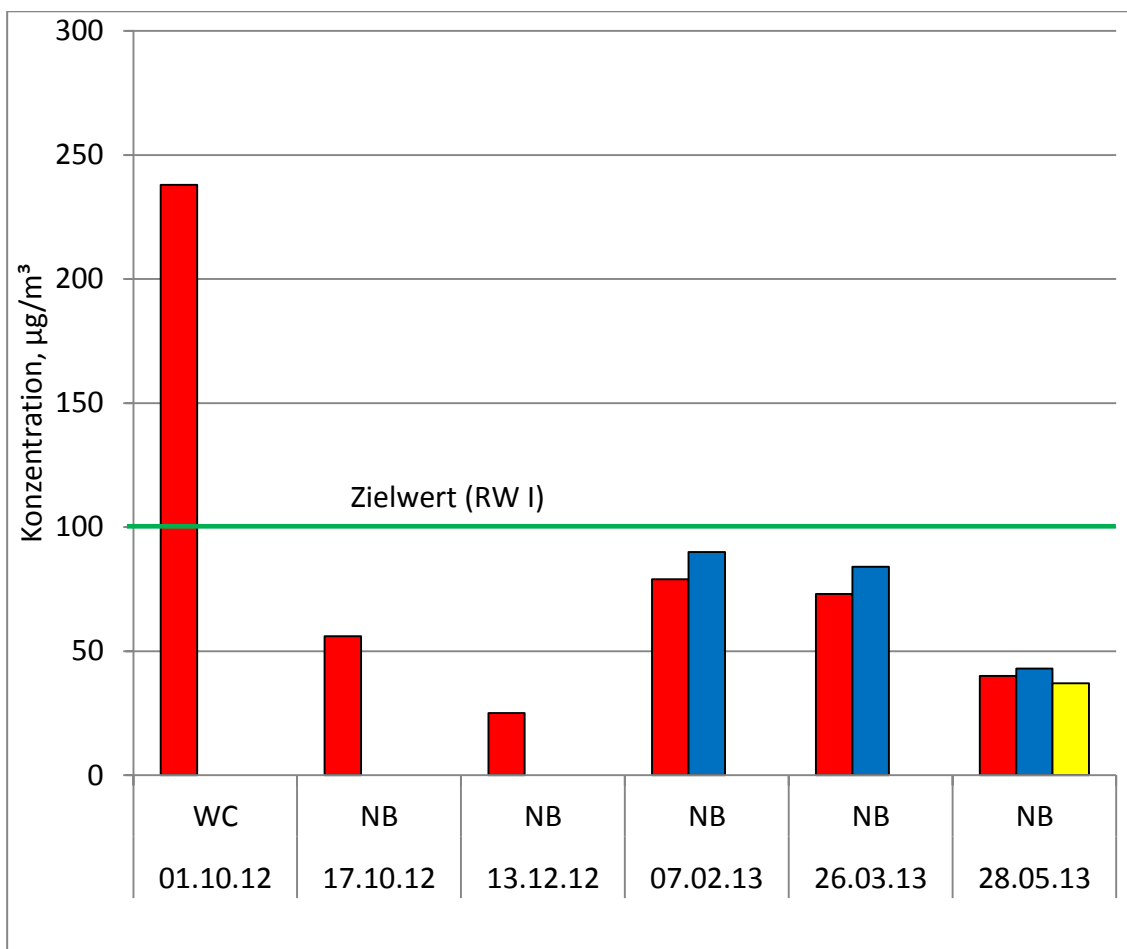


Bild 13: Aldehydkonzentration in einem Kripfenraum (rot), benachbarten Schlafraum (blau) und im Altbaustrakt (gelb); NB = Nutzungsbedingungen, WC = worst case Bedingungen

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Kleine Kinder reagieren besonders empfindlich gegenüber Schadstoffen. Weil sich Kinder einen sehr großen Teil des Tages in Innenräumen aufhalten, kommt möglichen Schadstoffen in der Raumluft eine große Bedeutung zu.

In dieser Studie haben wir untersucht, ob die Raumluft in neuen oder (energetisch) sanierten Gebäuden schlechter ist als in älteren Gebäuden. Dazu haben wir flüchtige organische Verbindungen (VOC) und den Kohlendioxidgehalt während des Unterrichts beziehungsweise während der Betreuungszeit gemessen. Das Programm umfasste 48 Räume.

Die neuen Räume waren im Durchschnitt höher mit VOC belastet als die übliche Hintergrundbelastung. Beim Bau werden viele Materialien verwendet, die VOC an die Luft abgeben. Dies wird von der zunehmenden Verwendung emissionsarmer Produkte zwar verringert, kann in den ersten Monaten aber dennoch zu erhöhten VOC-Konzentrationen führen.

In etwa jedem dritten Raum wurden gesundheitlich begründete Richtwerte I (RW I, Zielwert) überschritten; in einem Raum der Richtwert II (RW II, Eingriffswert) für bicyklische Terpene.

Rund 90 % der Räume waren aber gemäß TVOC-Konzept als „hygienisch unbedenklich“ oder „hygienisch noch unbedenklich“ einzustufen. Dies ist vergleichbar mit älteren Räumen (97 %). Die übrigen Räume waren „hygienisch auffällig“ oder „hygienisch bedenklich“. „Hygienisch inakzeptabel“ war kein Raum.

Betroffen von erhöhten VOC-Konzentrationen waren fast nur Räume, die weniger als etwa 10 Monate alt waren. Wie bei konventionellen, nicht energiesparenden Gebäuden sinkt die VOC-Konzentration mit der Zeit.

Waren VOC-Konzentrationen erhöht, haben wir empfohlen, zunächst mehr und systematisch zu lüften. Nachbeprobungen ergaben, dass auf diesem Weg die Belastungen auf ein akzeptables Maß sanken.

Der Luftwechsel, gemessen über die Kohlendioxidkonzentration, war in den meisten Räumen und an den meisten Tagen akzeptabel. Durchschnittlich verbrachten die Kinder etwa 65 % der Aufenthaltszeit unter „hygienisch unauffälligen“ Bedingungen, das heißt bei weniger als 1.000 ppm Kohlendioxid. Es gab jedoch einzelne Räume, bei denen die Kohlendioxidkonzentration während der Raumnutzung über lange Zeit größer als 2.000 ppm und „hygienisch inakzeptabel“ war. Räume mit technischen Lüftungsanlagen wiesen durchgängig Werte unter 1.500 ppm, meist auch unter 1.000 ppm auf.

Aus diesen Untersuchungen leiten wir ab, dass Neubauten überwiegend gute Raumluftqualität bieten. Zu Nutzungsbeginn können jedoch erhöhte VOC-Konzentrationen auftreten. Grundsätzlich geben wir folgende Empfehlungen:

- Die zuständigen Baubehörden sollten bei Ausschreibungen die Verwendung emissionsarmer Baustoffe vorgeben, damit möglichst schon in den ersten Monaten keine inakzeptabel hohen VOC-Belastungen auftreten.
- Insbesondere in der ersten Zeit nach Bezug der Räume sollte intensiv gelüftet werden.
- Eine gut geplante und gebaute technische Lüftungsanlage ist hilfreich, aber nicht zwingend notwendig.
- Ist keine Lüftungsanlage vorhanden, so müssen die Nutzerinnen und Nutzer regelmäßig, planvoll und ausreichend lüften.
- Dazu sollten konkrete Lüftungsvorgaben erarbeitet und durch die Leitung der Schule oder der Betreuungseinrichtung konsequent umgesetzt werden.

10 Literatur

- [1] Ministerium für Arbeit, Soziales und Gesundheit des Landes Schleswig-Holstein (2011): Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein. Teil 2: Containerbauten für Schulen und Kindergärten.
- [2] Ministerium für Arbeit, Soziales und Gesundheit des Landes Schleswig-Holstein (2012): Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein. Teil 3: Stäube in Innenräumen: Künstliche Mineralfasern (KMF) und Feinstaub in Schulen und Kindergärten.
- [3] Ministerium für Arbeit, Soziales und Gesundheit des Landes Schleswig-Holstein (2009): Raumluftuntersuchungen in öffentlichen Gebäuden in Schleswig-Holstein. Teil 1: Hintergrundwerte für Schulen und Kindergärten.
- [4] UBA, Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 51, 1358-1369.
- [5] Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (2008): Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Berlin, Deutschland. Überarbeitete Neuauflage.
- [6] Mölhavé 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.
- [7] EU-ECA-WG13 (1996): The use of TVOC as an indicator in IAQ investigations. Report of working Group 13 of European Collaborative Action on Indoor Air Quality and its Impact on Man. JRC, Ispra, Italien.
- [8] UBA, Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2007): Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 50, 990-1005.
- [9] UBA, Bekanntmachung des Umweltbundesamtes (2013): Richtwerte für Glykolether und Glykolester in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 56, 286-320.
- [10] Pettenkofer M. von (1858): Besprechung Allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J.G. Cotta'sche Buchhandlung, München.
- [11] Myhrvold A. N., Olsen E., Lauridsen O. (1996): Indoor environment in schools - Pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. *Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Indoor Air* 4, 369-374.
- [12] Twardella T. et al. (2012): Effect of classroom air quality on student's concentration: results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air* 22, 378-387.

11 Anhang

Tabelle: Statistische Kenngrößen, in µg/m³, nur Werte > BG

Stoffname	%>BG	P50	P95	MAX
Alkane				
n-Hexan*	82	1,0	5,0	24
n-Heptan	82	1,0	8,0	27
n-Octan	78	1,0	4,6	59
n-Nonan	57	1,0	7,2	211
n-Decan	88	2,0	26	50
n-Undecan	82	2,0	15	23
n-Dodecan	86	2,0	7,7	13
n-Tridecan	69	1,0	3,6	6
n-Tetradecan	78	1,0	3,0	7
n-Pentadecan	76	1,0	2,0	4
n-Hexadecan	71	1,0	2,0	2
n-Heptadecan	31	0	1,0	1
n-Octadecan	2	0	0	1
3-Methylhexan*	15	4,0	16	17
2,3-Dimethylpentan*	6	5,0	17	18
2,4-Dimethylpentan*	2			40
2,3,4-Trimethylpentan*	42	3,0	20	21
2,2,4-Trimethylpentan*	4	5,0	5,9	6
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan*	2			4
Cyclohexan	54	1,0	5,0	537
Methylcyclopentan	29	<1	2,0	71
Methylcyclohexan	65	1,0	11	17
Ethylcyclohexan	2			17
Alkene				
1-Octen	19	<1	1,0	4
1-Decen	31	<1	1,7	3
Alkohole				
Ethanol*	88	3,0	23	51
1-Propanol	92	13	1822	3564
2-Propanol*	90	173	995	2427
1-Butanol	94	13	55	89
Isobutanol*	23	3,0	25	45
2-Ethyl-1-hexanol	94	4,5	16	108
Benzylalkohol*	4			4
Phenol	4	13	17	17

Fortsetzung Tabelle 4: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Stoffname	%>BG	P50	P95	MAX
Aromaten				
Benzol	19	< 1	2,0	4
Toluol	94	3,0	12	18
m-Xylol	92	2,0	13	41
p-Xylol	69	1,0	5,0	15
o-Xylol	83	1,0	7,6	31
Ethylbenzol	90	2,0	8,7	27
Styrol	90	5,0	18	22
1,2,3-Trimethylbenzol*	2			3
1,2,4-Trimethylbenzol	81	1,5	12	20
Mesitylen	44	< 1	2,7	8
2-Ethyltoluol	48	< 1	3,0	17
3-Ethyltoluol	71	1,0	4,7	21
4-Ethyltoluol*	2			3
n-Propylbenzol	63	1,0	2,0	21
Naphthalin	44	< 1	1,0	1
Terpene				
α-Pinen	94	43	947	4177
β-Pinen	81	4,0	52	130
3-Caren	90	12	355	1290
Limonen	92	14	95	256
Camphen	10	3,0	22	26
α-Terpinen*	6	10	25	27
Longifolen	42	< 1	2,0	20
Aldehyde, Ketone				
Butanal	77	3,5	17	161
Pentanal	90	8,5	58	113
Hexanal	98	21	139	298
Heptanal*	17	3,0	7,0	8
Octanal*	25	3,0	6,7	10
Nonanal	94	9,0	26	37
Benzaldehyd	85	3,0	14	18
Cyclohexanon	79	2,0	6,0	10
2-Heptanon	4	5,5	6,9	7
Acetophenon	67	1,0	3,7	5
Ester, Ether, Glykolderivate				
Ethylacetat*	2			7
n-Butylacetat	88	3,0	37	42
Dimethylphthalat	2			1
Ethylenglykolmonomethylether	65	3,0	19	59
Ethylenglykolmonoethylether	25	< 1	2,7	4
Ethylenglykolmonobutylether	77	4,0	31	66

Fortsetzung Tabelle 4: Statistische Kenngrößen, in µg/m³

Stoffname	%>BG	P50	P95	MAX
Phenoxyethanol	67	1,0	30	83
2-Ethoxyethylacetat	33	< 1	8,7	25
Diethylenglykolmonoethylether*	2			9
Diethylenglykolmonobutylether	38	< 1	16	34
Butyldiglykolacetat	23	< 1	3,7	20
Propylenglykolmonomethylether*	17	9,5	334	420
Methoxypropylacetat*	4	13	21	22
Propylenglykolmonoethylether*	2			11
Propylenglykolmonopropylether*	4	7,5	12	13
Propylenglykolmonobutylether*	21	5,5	24	36
Dipropylenglykolmonobutylether*	2			59
Phenoxypropanol	2			1
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiisobutyrat	46	< 2	8,0	38
Sonstige				
1,1,1-Trichlorethan	15	< 1	4,0	8
1,4-Dichlorbenzol	8	< 1	1,0	3
1-Chlornaphthalin	15	< 1	1,0	1
Cyclopentasiloxan*	27	5,0	9,4	10

% > BG: Anteil der Werte oberhalb Bestimmungsgrenze;

P50, P95: Perzentile;

Max: Maximaler gemessener Wert;

*: Berechnet als Toluolequivalent.