

VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen unter unterschiedlichen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen

H.-D. Neumann, M. Buxtrup, S. Benitez, J.-U. Hahn

Zusammenfassung Um einen Überblick über die Normalbelastung von flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) und Aldehyden in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu erhalten, führte die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Projektes „Gesunde Luft in Schulen“ in 381 nicht verdächtigen Klassenräumen an 111 Schulen Messungen der Raumluftkonzentration durch. Als Ergebnis ist festzustellen, dass sich in Klassenräumen im Normalzustand in der Regel keine auffälligen VOC- und Aldehydkonzentrationen zeigen. Dennoch kann die Raumluftqualität durch Lüftungsmaßnahmen weiter verbessert werden. Die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Schulart, vom Schuljahr, von der Lage der Schule, vom Baujahr, von Renovierungsmaßnahmen, der Bauweise und der Ausstattung des Klassenraumes werden erläutert. Die Richtwerte I des Umweltbundesamtes sind deutlich unterschritten. Schülerinnen und Schüler verursachen einen zusätzlichen VOC-Eintrag in den Klassenraum. Auffälligste Werte sind hierbei Decamethylcyclpentasiloxan (D5) und Limonen. D5 wird insbesondere durch die Aufbewahrung von Straßenkleidung wie Jacken und Mäntel in Klassenräume eingetragen.

VOC and aldehyde concentrations in non-suspect classrooms with varying room uses and ventilation arrangements

Abstract To obtain an overview of normal contamination with volatile organic compounds (VOCs) and aldehydes in classrooms of ordinary schools with varying room uses and ventilation arrangements, North-Rhine/Westphalia's social accident insurance institution conducted indoor air concentration measurements in 381 non-suspect classrooms in 111 schools as part of the Healthy Air in Schools project. In conclusion, it can be stated that, as a rule, no conspicuous VOC or aldehyde concentrations arise in classrooms in their normal state. Even so, there is still room for using ventilation to improve indoor air quality. The results broken down into school type, pupil age, school location, date of construction, renovation measures, type of structure and classroom furnishings/equipment are explained. The values fall well below the guide values I of the German Federal Environmental Agency. The pupils themselves increase the classroom VOC levels. The most striking values are achieved by decamethylcyclpentasiloxane (D5) and limonene. D5 is imported particularly when outdoor clothing, e.g. jackets and coats, is kept in classrooms.

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann, Martin Buxtrup,
Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Dipl.-Chem. Ing. Susanne Benitez,
Hygieneinstitut des Ruhrgebietes, Gelsenkirchen.

Dr. rer. nat. Jens-Uwe Hahn,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

1 Einleitung

Gute Luft in Schulen ist eine wichtige Voraussetzung für gutes Lernen und Lehren. Aber gerade in Schulen wird immer wieder über schlechte Luftqualität geklagt. Häufig werden Baumaterialien oder Einrichtungsgegenstände als Quellen für Schadstoffemissionen verdächtigt. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (UBA) und der Obersten Landesgesundheitsbehörden hat zur Beurteilung solcher Fälle im Jahre 2007 folgende Bewertungsrangfolge empfohlen [1]: Zunächst sind die von der Arbeitsgruppe für einzelne Substanzen oder Substanzgruppen toxikologisch abgeleiteten Innenraumrichtwerte heranzuziehen, die für Personen jeden Alters und unabhängig vom Gesundheitszustand der Raumnutzer gelten. Diese Werte sind auf eine Expositionszeit von 24 Stunden ausgelegt.

Für Stoffe, für die es bislang keine Richtwerte gibt, kann man statistisch abgeleitete Referenzwerte zur Bewertung heranziehen. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Unterschreitung der Richtwerte bei Unterschreitung von Referenzwerten keine Beurteilung der gesundheitlichen Gefährdung möglich ist. Eine wesentliche Überschreitung des Wertes kann jedoch ein Hinweis darauf sein, dass in dem Raum Emissionsquellen vorhanden sind, die möglicherweise zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können.

Um einen statistisch abgesicherten Überblick über Innenraumbelastungen in Schulen unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu gewinnen, führten die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen (NRW) und ihre Vorgängerinstitutionen im Rahmen des Projektes „Gesunde Luft in Schulen“ im Zeitraum von 2005 bis 2009 umfangreiche Messungen u. a. auf flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) und Aldehyde in zufällig ausgewählten, nicht belasteten Klassenräumen durch [2]. Die Probenahme erfolgte im leeren Raum und zusätzlich unter verschiedenen Lüftungsbedingungen in Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern. Mithilfe eines standardisierten Fragebogens wurden darüber hinaus Daten, wie z. B. über die Belegungsstärke des Raumes, Schuljahrgang, Schulart, Baujahr, Lage sowie Bau- und Ausstattungsmerkmale der Schule, dokumentiert. Die Auswertung der Daten wird hier vorgestellt.

2 Methode

2.1 Datenerhebung

Die Messstrategien für Innenraumarbeitsplatzmessungen basieren auf der Richtlinienreihe VDI 4300 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen“ [3] und auf der Normenreihe DIN EN ISO 16000 „Innenraumluftverunreinigungen“ [4]. Die Messungen wurden unter Ausgleichsbedingungen durchgeführt.

Tabelle 1. Übersicht über die Ergebnisse der Aldehyd-Einzelkomponenten.

BG: Bestimmungsgrenze

Stoff	n gesamt	n > BG	n > BG in %	90-Perzentil in µg/m³	95-Perzentil in µg/m³
Formaldehyd	371	247	66,6	57	70
Acetaldehyd	334	56	16,8	50	60
Propionaldehyd	325	2	0,6	BG	BG
Butyraldehyd	325	0	0,0	BG	BG
Glutaral (Glutardialdehyd)	325	0	0,0	BG	BG
Acrylaldehyd	325	0	0	BG	BG

- Straßenkleidung im Raum (Mäntel, Jacken),
- Lüftungsöffnungen bei Stoßlüftung,
- Lüftungsöffnungen bei Dauerlüftung,
- Raumklima.

2.2 Datenauswertung

Zur Ableitung von Perzentil- und Mittelwerten der Stoffe sowie der Summenwerte (Total volatile organic compounds, TVOC) wurden die Messdaten

Vor der Messung wurden die Klassenräume intensiv mindestens 15 min lang gelüftet. Anschließend wurden alle Türen und Fenster für einen Zeitraum von mindestens acht Stunden – in der Regel über Nacht – geschlossen. Im Anschluss daran erfolgten die Messungen mit durchflussgeregelten Probenahmepumpen nach folgendem Schema:

- Probenahme im unbelegten Klassenraum im ungelüfteten Zustand des Raumes unter Ausgleichsbedingungen,
- Probenahme im ungelüfteten Zustand des Raumes in Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern während des Unterrichts,
- Probenahme nach Stoßlüftung über geöffnete Fenster und Türen in Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern bei Kipplüftung während des Unterrichts.

Gemessen wurde in Räumen für den allgemeinbildenden Unterricht, in denen es keine Beschwerden über eine unzureichende Luftqualität gab. Die Lage des Messortes ist in dem Beitrag auf Seite 79 ff. in diesem Heft beschrieben.

Die Bestimmung der VOC führte das Hygieneinstitut des Ruhrgebietes durch. Probenahme und Analytik sind in dem Beitrag auf Seite 79 ff. in diesem Heft beschrieben. Die Analytik der separat zu berücksichtigenden Aldehyde erfolgte im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).

Die Probenahme von Formaldehyd und weiterer Aldehyde erfolgte mit dem Probenträger Waters Sep-Pak. Die Probenahmezeit betrug 30 min bei einem Luftvolumenstrom von 0,666 l/min. Zur Bestimmung der Aldehyde wurden die Kartuschen mit Acetonitril eluiert. Die qualitative und quantitative Bestimmung erfolgte mittels High Performance Liquid Chromatography (HPLC). Die in **Tabelle 1** aufgelisteten Aldehyde sind als Einzelkomponenten angegeben, wobei Hexanal im Gegensatz zu den anderen Aldehyden mit dem VOC-Verfahren bestimmt wird. Die analytischen Bestimmungsgrenzen für Formaldehyd, Acrylaldehyd und Glutardialdehyd betragen 20 µg/m³, die für Acetaldehyd, Butyraldehyd und Propionaldehyd 40 µg/m³ [5].

Zusätzlich wurden mithilfe eines standardisierten Begleitbogens die Randbedingungen der Messung beschrieben. Erfasst wurden folgende Parameter:

- Schulart,
- Schuljahr,
- Raumgröße,
- Anzahl der Raumnutzer,
- Gebäudeart (massiv, Pavillon- oder Ständerbauweise),
- Baujahr (vor 1950, von 1950 bis 1985, nach 1985, innerhalb der letzten zwei Jahre),
- Renovierung in den letzten zwei Jahren,
- Lage der Schule,
- Ausstattung des Klassenraumes (Boden, Decke, Wände, Einrichtung, Pflanzen),

statistisch ausgewertet. Bestimmt wurden die arithmetischen Mittelwerte, Mediane, 90- und 95-Perzentilwerte. In der Situation „Grundbelastung“ wurden so 381 Klassenräume an 111 Schulen untersucht. Daraus resultieren alleine für die standardmäßig ausgewerteten Komponenten ca. 78 900 Analysen. Hinzu kommen die zusätzlich als Toluoläquivalent analysierten Einzelstoffe, die zahlenmäßig nicht angegeben werden können.

Durch die statistische Auswertung der Daten ist es möglich, Referenzwerte zu gewinnen. Entsprechend einer international anerkannten Konvention wird der 95-Perzentilwert eines hinreichend großen Datenkollektivs als Referenzwert bezeichnet [1]. Dabei wird ohne toxikologische Bewertung angenommen, dass der in den untersuchten Räumen angebotene und nicht zu Erkrankungen und Beschwerden Anlass gebende „Normalzustand“ allgemein akzeptiert werden kann. Die Träger der gesetzlichen Unfallversicherung haben bislang Referenzwerte auf der Basis der niedrigeren 90-Perzentilwerte empfohlen [6; 7]. In einem gemeinsamen Entwurf der Arbeitsgruppen Analysenverfahren der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Ad-hoc-Kommission Innenraumluft wird das 95-Perzentil zur Ableitung von Referenzwerten empfohlen [8]. Die Unfallversicherungsträger werden sich zukünftig dieser empfohlenen Vorgehensweise anschließen. Stoffe, die unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze liegen, sind bei der Auswertung der Daten jeweils mit der halben Bestimmungsgrenze berücksichtigt.

3 Ergebnisse

3.1 Messorte, raumklimatische Verhältnisse und Lüftungsbedingungen

Die Untersuchung erfolgte in 381 Räumen an 111 Schulen, davon 41 Grundschulen, zwölf Hauptschulen, 15 Realschulen, 19 Gymnasien, acht Gesamtschulen, neun Berufskollegs und neun Sonderschulen.

Im Sommerhalbjahr ließ sich in 166 Unterrichtsstunden die Situation „mit Schülerinnen und Schülern, bei Kipplüftung“ realisieren, im Winterhalbjahr in 197 Unterrichtsstunden. Die geöffnete Fensterfläche betrug dabei im Sommerhalbjahr im Mittel 1,8 m² und als 90-Perzentil 3,3 m², im Winterhalbjahr im Mittel 1 m² und als 90-Perzentil 1,8 m². Um Beschwerden über ein unbehagliches Raumklima zu vermeiden, bestimmten die Raumnutzer die Zahl der geöffneten Fenster. Bei Stoßlüftung lag die geöffnete Fensterfläche im Mittel bei 3,1 m² und als 90-Perzentil bei 5,7 m², gemittelt über beide Halbjahre. Die bei den Messungen vorherrschenden raumklimatischen Bedingungen, Raumvolumina und Klassenbelegungsstärken sind in dem Beitrag auf Seite 79 ff. in diesem Heft beschrieben.

Tabelle 2. Übersicht relevanter VOC in den Situationen Grundbelastung; ungelüftet, mit Schülerinnen und Schülern; mit Schülerinnen und Schülern nach Lüftungsintervention und Kipplüftung.

		Grundbelastung			Ungelüftet, mit Schülern				Gelüftet, mit Schülern				
		n (über Nachweisgrenze)	50-Perzentil	90-Perzentil	95-Perzentil	n (über Nachweisgrenze)	50-Perzentil	90-Perzentil	95-Perzentil	n (über Nachweisgrenze)	50-Perzentil	90-Perzentil	95-Perzentil
Aromatische Kohlenwasserstoffe													
Benzol	µg/m ³	12	1	1	3	41	1	3	5	26	1	1	3
Toluol	µg/m ³	360	5	25	35	354	7	25	33	306	3	12	20
Ethylbenzol	µg/m ³	198	2	6	10	210	2	6	10	108	1	3	5
m/p-Xylol	µg/m ³	208	2	10	15	215	2	7	15	102	1	3	5
o-Xylol	µg/m ³	136	1	5	5	141	1	5	5	52	1	2	3
n-Propylbenzol	µg/m ³	36	1	1	3	31	1	1	3	13	1	1	1
1,2,4-Trimethylbenzol	µg/m ³	92	1	3	5	86	1	4	5	37	1	1	3
1,3,5-Trimethylbenzol	µg/m ³	81	1	3	5	74	1	3	5	27	1	1	2
2-Ethyltoluol	µg/m ³	96	1	5	5	88	1	5	5	34	1	1	3
Styrol	µg/m ³	115	1	5	8	117	1	5	6	38	1	2	3
Naphthalin	µg/m ³	29	1	1	3	25	1	1	3	10	1	1	1
Phenol	µg/m ³	49	0	2	3	48	0	2	3	32	0	0	3
4-Phenyl-cyclohexen	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Aliphatische Kohlenwasserstoffe													
n-Hexan	µg/m ³	61	1	5	12	56	1	5	11	40	1	2	5
n-Heptan	µg/m ³	90	1	10	15	89	1	10	16	70	1	5	14
n-Octan	µg/m ³	7	1	1	1	8	1	1	1	5	1	1	1
n-Nonan	µg/m ³	22	1	1	2	13	1	1	1	6	1	1	1
n-Decan	µg/m ³	125	1	5	5	128	1	5	6	56	1	2	3
n-Undecan	µg/m ³	185	1	6	10	184	1	5	10	65	1	3	5
n-Dodecan	µg/m ³	49	1	3	5	49	1	3	5	23	1	1	2
n-Tridecan	µg/m ³	6	1	1	1	5	1	1	1	6	1	1	1
n-Tetradecan	µg/m ³	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1
n-Pentadecan	µg/m ³	8	1	1	1	7	1	1	1	3	1	1	1
n-Hexadecan	µg/m ³	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
2-Methylpentan	µg/m ³	32	1	1	4	30	1	1	4	30	1	1	4
1-Octen	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1-Decen	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	µg/m ³	35	0	0	5	36	0	0	5	12	0	0	0
Cycloalkane													
Methylcyclopentan	µg/m ³	21	1	1	2	24	1	1	3	27	1	1	3
Cyclohexan	µg/m ³	21	1	1	2	18	1	1	1	18	1	1	1
Methylcyclohexan	µg/m ³	21	1	1	2	26	1	1	3	23	1	1	3
Terpene													
3-Caren	µg/m ³	62	1	8	15	61	1	6	20	24	1	1	4
α-Pinen	µg/m ³	85	1	22	45	100	1	25	45	48	1	3	12
β-Pinen	µg/m ³	62	1	5	15	77	1	6	15	28	1	1	3
Limonen	µg/m ³	230	4	35	45	291	10	45	74	200	2	20	35
Longifolen	µg/m ³	43	0	3	5	35	0	0	5	13	0	0	0
Alkohole													
2-Propanol	µg/m ³	64	1	5	10	63	1	5	10	39	1	2	5
1-Butanol	µg/m ³	86	1	7	11	76	1	6	12	38	1	2	4
2-Ethyl-1-hexanol	µg/m ³	188	1	15	21	178	1	15	26	96	1	5	14
Glykole/Glykoether													
2-Methoxyethanol	µg/m ³	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
2-Ethoxyethanol	µg/m ³	6	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1
2-Butoxyethanol	µg/m ³	128	1	15	25	126	1	15	25	60	1	4	6
1-Methoxy-2-propanol	µg/m ³	32	1	1	4	43	1	2	7	25	1	1	3
2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	µg/m ³	145	1	15	25	156	1	15	25	97	1	6	12

2-(2-Ethoxyethoxy)ethanol	µg/m ³	56	0	5	20	52	0	5	18	4	0	0	0
2-Phenoxyethanol	µg/m ³	56	0	3	10	56	0	4	9	36	0	1	4
Aldehyde													
Butanal	µg/m ³	9	1	1	1	8	1	1	1	0	1	1	1
Pentanal	µg/m ³	49	1	3	4	53	1	3	4	14	1	1	1
Hexanal	µg/m ³	207	4	22	25	227	5	20	29	106	1	5	10
Nonanal	µg/m ³	65	1	4	7	69	1	5	9	43	1	2	4
Benzaldehyd	µg/m ³	182	1	12	24	179	1	12	21	108	1	4	5
Ketone													
Methylethylketon	µg/m ³	85	1	5	10	81	1	5	9	31	1	1	3
Methylisobutylketon	µg/m ³	7	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1	1
Cyclohexanon	µg/m ³	45	1	3	5	38	1	2	6	13	1	1	1
Acetophenon	µg/m ³	69	1	3	5	64	1	4	5	34	1	1	2
Halogenkohlenwasserstoffe													
Trichlorethen	µg/m ³	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1
Tetrachlorethen	µg/m ³	17	1	1	1	22	1	1	3	5	1	1	1
1,1,1-Trichlorethan	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1,4-Dichlorbenzol	µg/m ³	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Säuren													
Hexansäure	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Ester													
Ethylacetat	µg/m ³	86	1	3	5	101	1	5	8	42	1	2	3
Butylacetat	µg/m ³	100	1	5	8	141	1	5	7	55	1	2	3
Isopropylacetat	µg/m ³	9	1	1	1	6	1	1	1	4	1	1	1
2-Ethoxyethylacetat	µg/m ³	3	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1
Texanolisobutyrat (TXIB)	µg/m ³	4	1	1	1	8	1	1	1	7	1	1	1
Furane													
2-Pentylfuran	µg/m ³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Tetrahydrofuran (THF)	µg/m ³	13	1	1	1	6	1	1	1	3	1	1	1
Siloxane													
Decamethylcyclopentasiloxan	µg/m ³	179	1	15	25	182	1	32	55	167	1	21	29
Dodecamethylcyclohexasiloxan	µg/m ³	143	1	8	10	149	0	10	15	132	0	5	10
Hexamethylcyclotrisiloxan	µg/m ³	121	0	5	8	118	0	5	6	71	0	3	3
Octamethylcyclotetrasiloxan	µg/m ³	149	1	15	22	143	0	15	20	136	0	8	12
Sonstige													
Aceton	µg/m ³	52	0	10	25	58	0	15	25	40	0	3	5
Summenwerte													
TVOC (VDI) und sonstige	µg/m ³	381	148	364	569	367	163	382	522	364	93	222	305
TVOC (Toluoläquivalent)	µg/m ³	380	62	227	355	367	70	244	314	364	16	107	190

3.2 Übersicht über die Messwerte der Grundbelastung

Die in Tabelle 1 aufgelisteten unter Ausgleichsbedingungen gewonnenen Einzelkomponenten der Aldehyde werden nur für die Situation „Grundbelastung“ dargestellt, da Veränderungen durch den Eintrag von Schülerinnen und Schülern nicht zu erwarten sind. Wie man der Tabelle entnehmen kann, ist Formaldehyd die am meisten und in der höchsten Konzentration nachgewiesene Einzelkomponente der Aldehyde. Häufiger nachgewiesen, allerdings deutlich seltener als Formaldehyd, wurde auch Acetaldehyd. Die anderen Einzelkomponenten der Aldehyde sind nicht relevant.

Tabelle 2 zeigt die Übersicht relevanter VOC in den Situationen „Grundbelastung“ unter Ausgleichsbedingungen, Belegung des Raumes mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftung und Belegung des Raumes mit Schülerinnen und Schülern nach Lüftungsintervention und Kipplüftung. Insgesamt sind 72 Stoffe dargestellt. 60 weitere Stoffe sind ohne statistische Relevanz. Man erkennt einen leichten Anstieg der TVOC-Werte bei Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern

ohne vorherige Lüftung im Vergleich zur Grundbelastung und eine deutliche Reduzierung in der Stunde mit Schülerinnen und Schülern nach Lüftungsinterventionen. Auffälligste Werte zeigen bei den Aromaten Toluol, bei den Terpenen α -Pinen und Limonen, bei den Glykolethern 2-Butoxyethanol und 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol, bei den Aldehyden Hexanal und Benzaldehyd sowie bei den Siloxanen Decamethylcyclopentasiloxan (D5) und Octamethylcyclotetrasiloxan (D4).

3.3 Ergebnisse in Abhängigkeit von den Randbedingungen

Bild 1 zeigt die fünf Stoffe mit den höchsten Differenzen zwischen den Situationen „Grundbelastung“ und „ungelüftet, mit Schülerinnen und Schülern“ als 90-Perzentil. Demnach stieg der Summenwert der VOC (TVOC) während der 20-minütigen Probenahme nach Beginn des Unterrichtes um 18 µg/m³ bei Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler. Am größten ist der Konzentrationsunterschied für Decamethylcyclopentasiloxan (D5) mit 17 µg/m³, gefolgt von

Limonen mit $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Das 90-Perzentil von D5 steigt somit bei Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler um mehr als das Doppelte an. Der Unterschied für α -Pinen und Dodecamethylcyclohexasiloxan (D6) ist gering.

Die höchste mittlere Grundbelastung von TVOC (Bild 2) ist in Sonder- und Grundschulen zu verzeichnen. Die geringste TVOC-Differenz zwischen der Grundbelastung und der Situation „ungelüftet, mit Schülerinnen und Schülern“ ergab sich in Sonderschulen. Hier sind die Schülerzahlen jedoch auch am geringsten. Ferner konnte in Sonderschulen das vorgegebene Lüftungsschema nicht immer realisiert werden, da sich der Unterricht häufig nicht an einem starren Unterrichtsstundenschema orientiert. Nach Lüftungsintervention sind die mittleren TVOC-Konzentrationen jedoch für alle Schulformen in etwa gleich.

Der Eintrag von VOC durch Schülerinnen und Schüler ist als Median in den Jahrgangsstufen 10 und 11 am höchsten (Bild 3). Der hohe 90-Perzentilwert in der Jahrgangsstufe 13 ist auf die hohe VOC-Zunahme in einer Klasse zurückzuführen. Der D5-Anstieg in der Stunde ohne Lüftung betrug hier $620 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der D6-Anstieg $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nach Stoßlüftung sanken die Konzentrationen in der Stunde mit Kipplüftung auf $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für TVOC, $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für D5 und $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für D6. Mäntel und Jacken wurden im Raum aufbewahrt. Grundsätzlich scheint die Aufbewahrung von Straßenkleidung wie Jacken oder Mäntel in den Klassenräumen eine zusätzliche Quelle von VOC zu sein (Bild 4). Auffällig ist hier insbesondere die D5-Konzentration, die in Räumen mit aufbewahrter Straßenkleidung im Vergleich zur Grundbelastung deutlich ansteigt. Die weiteren Einzelstoffe sind diesbezüglich dagegen unauffällig.

Höchste TVOC-Median- und Mittelwerte nach Lüftung zeigen sich unter dem Aspekt der Lage im Bereich der Innenstadt und an vielbefahrenen Straßen (ca. $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Unterschiede sind jedoch insgesamt nicht gravierend. Die höchsten TVOC-Differenzen nach Lüftung wurden im Wohn- und Mischgebiet ermittelt, die geringsten im Bereich der Innenstadt. Die Auswertung hinsichtlich der Baujahre ergab, dass die mittleren TVOC-Konzentrationen in Schulen bis zum Baujahr 1985 in etwa gleich sind (Bilder 5 und 6). In diesem Zeitraum sind auch die meisten an der Studie beteiligten Schulen entstanden. Für die Baujahre nach 1985 steigen die Werte leicht an, insbesondere in Schulen, die in den letzten zwei Jahren gebaut wurden. Bei den Einzelstoffen sind für die Toluol- und Formaldehydkonzentration leichte Anstiege über die Baujahre erkennbar. Die Werte für 2-Ethyl-1-hexanol unterscheiden sich dagegen kaum.

Limonen ist in Schulen relevant, die nach 1985 gebaut wurden, insbesondere in den letzten zwei Jahren. Die Spannweite der Einzelwerte für Limonen ist erheblich. Vier Einzelwerte wurden zwischen 285 und $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen,

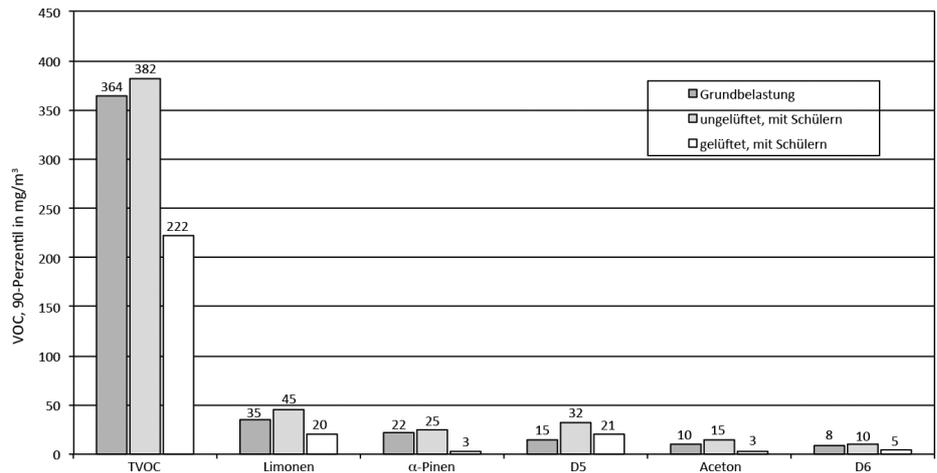


Bild 1. Fünf höchste TVOC-Differenzen zwischen den Situationen „ungelüftet, Grundbelastung“ und „ungelüftet, mit Schülerinnen und Schülern“, sortiert nach 90-Perzentilwerten.

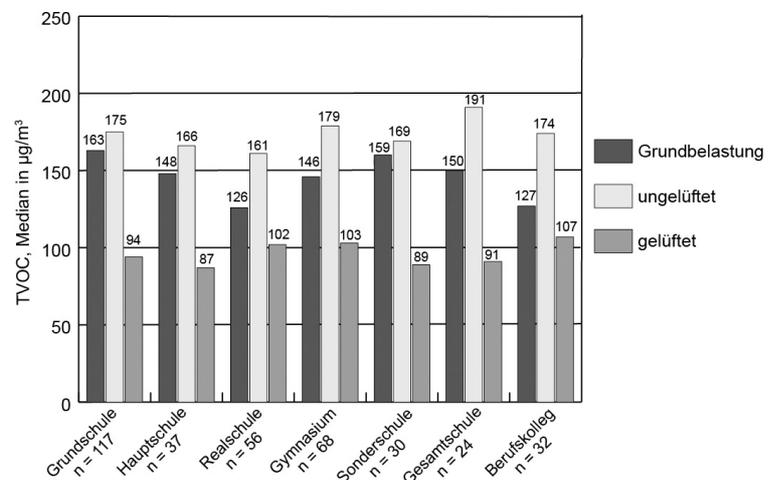


Bild 2. Median von TVOC nach Schularten.

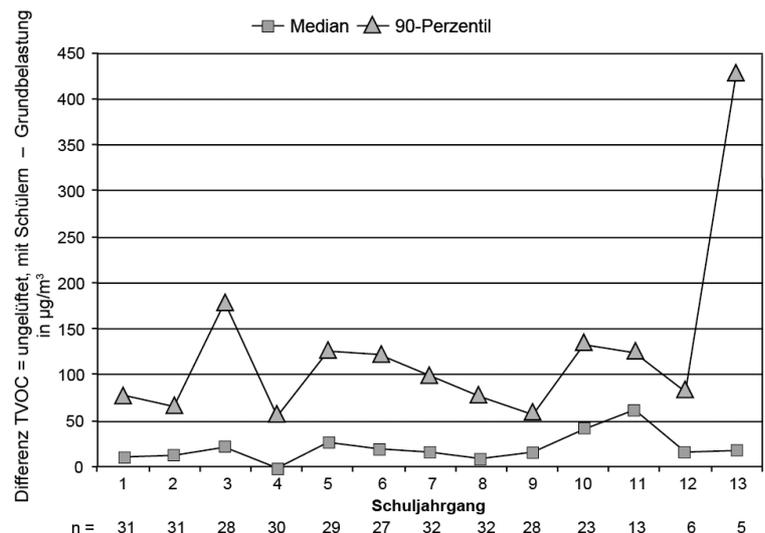


Bild 3. TVOC-Differenz zwischen der Situation Grundbelastung und der Situation „ungelüftet, mit Schülerinnen und Schülern“ als Median und 90-Perzentil nach Jahrgängen.

wobei drei der vier Räume mit Linoleumfußboden ausgestattet sind. Für Hexanal ist ein deutlicher Anstieg der Konzentration in Schulen erkennbar, die nach 1985 und insbesondere in den letzten zwei Jahren erbaut wurden. Die

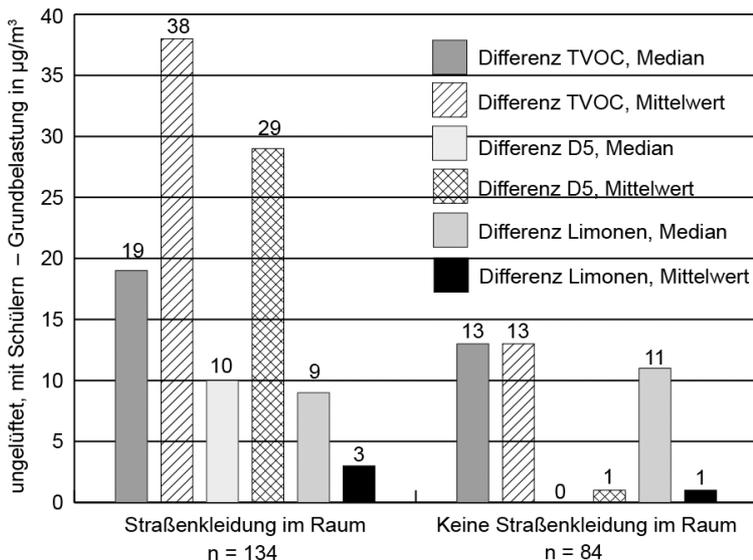


Bild 4. VOC-Eintrag durch die Aufbewahrung von Straßenkleidung in Klassenräumen.

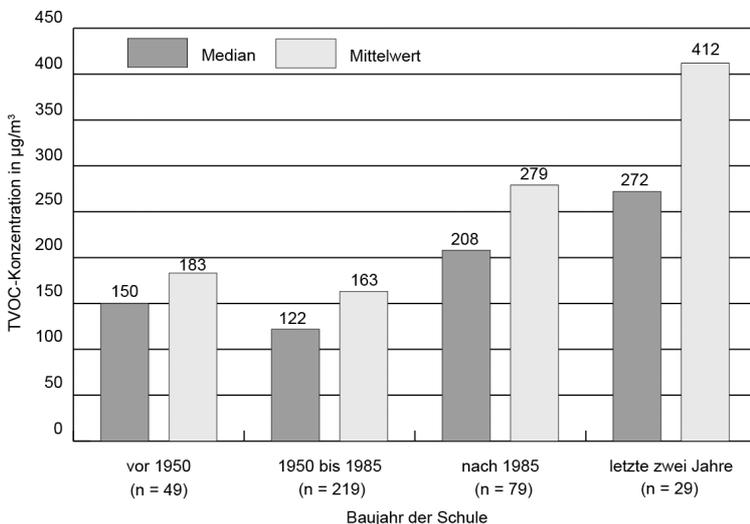


Bild 5. Konzentrationen von TVOC in Abhängigkeit vom Baujahr als Median und Mittelwert.

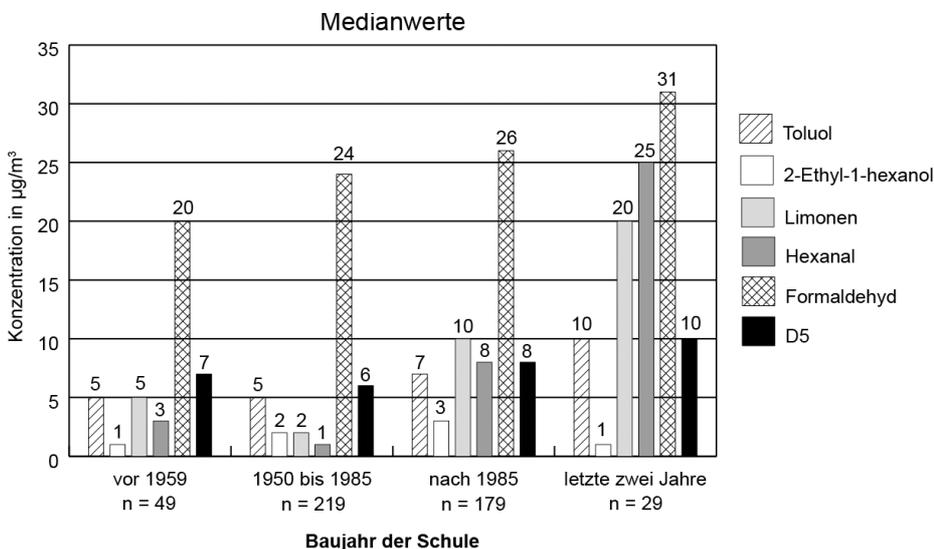


Bild 6. Konzentrationen ausgewählter Einzelstoffe in Abhängigkeit vom Baujahr als Medianwert.

D5-Konzentration ist dagegen weitgehend konstant. Unterschiedliche TVOC-Werte zeigen sich auch in Abhängigkeit vom Renovierungszustand. Die Konzentrationen in den Räumen, die in den letzten zwei Jahren renoviert wurden ($n = 96$), sind mit $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Median (Unterschied 46 %) und $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Mittelwert (Unterschied 28 %) höher als die in Räumen, die nicht renoviert wurden ($n = 280$).

Auch einzelne VOC zeigen bis auf α -Pinen eine leichte Erhöhung in renovierten Räumen im Vergleich zu nicht renovierten Räumen (Bild 7). Die D5-Konzentration unterscheidet sich dagegen kaum (Median jeweils ca. $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Formaldehydkonzentration ist in renovierten Räumen (Median $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) leicht höher als in nicht renovierten Räumen (Median $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Der Vergleich von TVOC, Limonen und Formaldehyd in Gebäuden mit massiver Bauweise ($n = 332$) und in Gebäuden in Pavillon- oder Ständerbauweise ($n = 41$) weist dagegen nur geringe Unterschiede auf. Die Werte für Limonen und Formaldehyd sind in Gebäuden in Pavillon- und in Ständerbauweise etwas höher im Vergleich zur massiven Bauweise.

PVC ist der in den untersuchten Schulräumen am meisten verwendete Fußbodenbelag (Bild 8), gefolgt von Linoleum, Kautschuk, Teppich und Holz. Die höchsten TVOC-Mittelwerte sind bei Linoleum und im Median bei Kautschuk, die geringsten bei PVC-Oberbelag zu verzeichnen. Dies gilt auch für die Einzelstoffkonzentrationen, die in etwa gleichauf mit Holzfußböden liegen (Bild 9). Bei Linoleumböden wurden in Einzelfällen höhere Messwerte ermittelt. Ein hoher Einzelwert für Benzaldehyd bei Kautschukböden ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ist wohl einer fehlerhaften Verlegung des Belags in einem Klassenraum geschuldet. Die Formaldehydkonzentrationen unterscheiden sich in den Räumen unter dem Aspekt des Fußbodenbelags nur unwesentlich (Median 20 bis $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die vergleichsweise niedrigeren Werte bei Holzfußböden (Median $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sind darauf zurückzuführen, dass es sich in der Regel um Räume mit Massivholzböden in Schulen älterer Baujahre handelt, von denen keine nennenswerten Emissionen zu erwarten sind. Darüber hinaus sind die Fallzahlen gering. Für Acetaldehyd war bei allen Fußbodenbelägen kein arithmetischer Mittelwert bestimmbar. Die Medianwerte für Linoleum- ($n = 104$) und Kautschukböden ($n = 55$) in Höhe von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden jeweils durch die halbe analytische Nachweisgrenze bestimmt. Die Maximalwerte betragen $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Linoleum bzw. $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Kautschuk. Naphthalin als eventuelle Emission aus Parkettklebern oder teerhaltigen Dampfsperren im Fußbodenaufbau von Altbauten wurde in nur fünf Fällen nachgewiesen. Die Konzentrationen lagen mit 3 bis $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Bereich des 95-Perzentilwerts dieser Studie bzw.

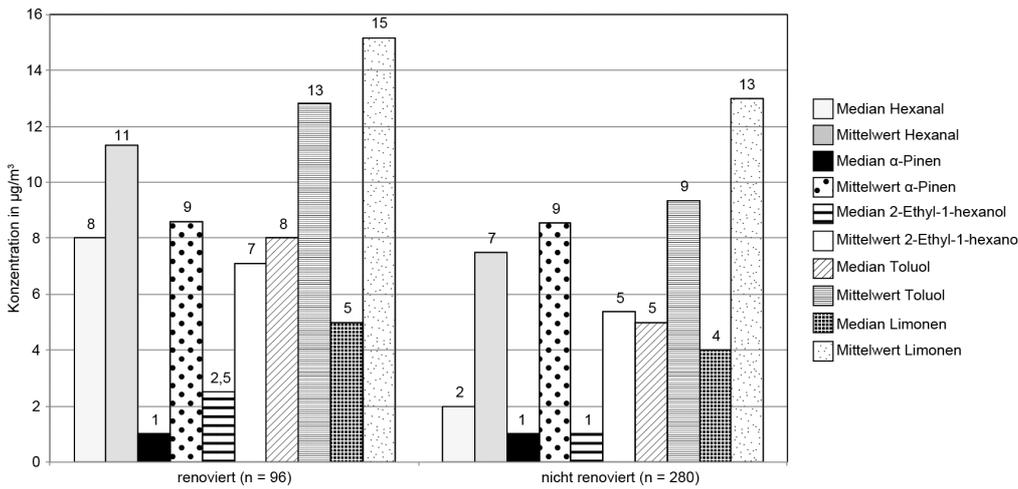


Bild 7. Konzentration der nach 90-Perzentil sortierten höchsten VOC-Grundbelastungen in renovierten und nicht renovierten Räumen.

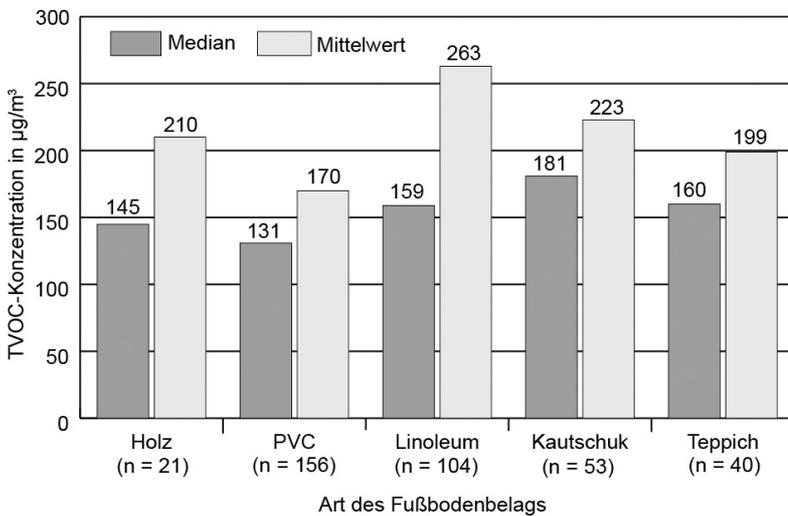


Bild 8. TVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag.

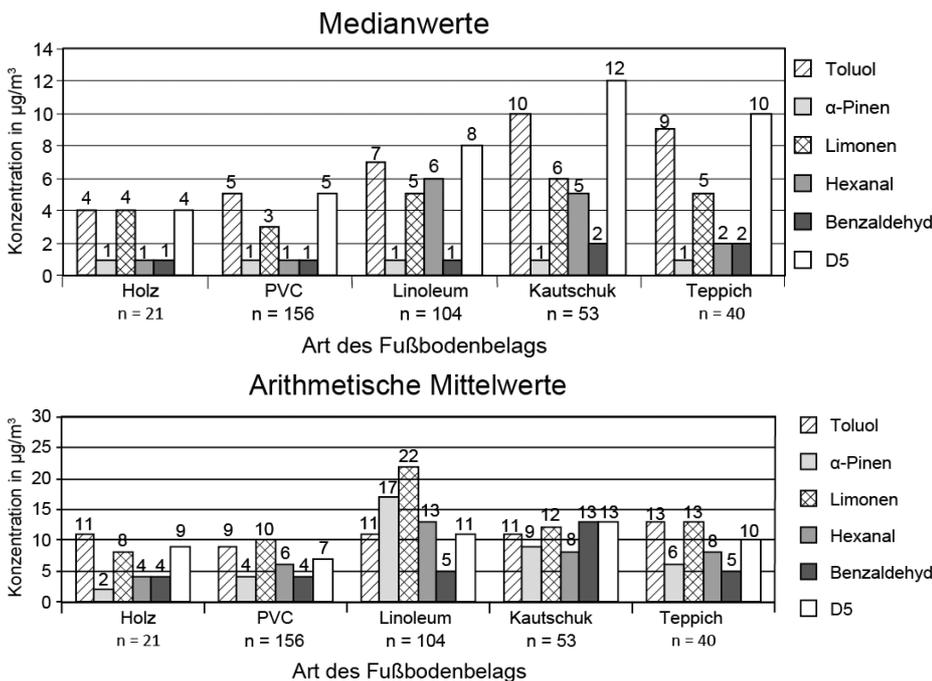


Bild 9. Konzentrationen von ausgewählten VOC in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag.

leicht darüber. Akustikdecken mit Mineralwollplatten oder Mineralwollhinterlegung sind in den Klassenräumen am häufigsten anzutreffen, gefolgt von Decken mit Gipskartonverkleidung (Bild 10). In Räumen mit Gipskartondecken wurden die höchsten TVOC-Mediane und -Mittelwerte ermittelt, die geringsten in Räumen mit Metalldecken. Bei den Metalldecken ist die Fallzahl jedoch sehr gering. Da Metalldecken in der Regel mit Mineralwolle hinterlegt sind, sind sie den Akustikdecken zuzuordnen, die ebenfalls deutlich niedrige TVOC-Werte als Gipskartondecken aufweisen.

Die höchsten Limonenkonzentrationen sind in Räumen mit Holzdecken zu verzeichnen. Hier ist im Mittel auch die Formaldehydkonzentration am höchsten. Ansonsten sind die Einzelstoffkonzentrationen hinsichtlich der Deckengestaltung etwa gleich.

4 Diskussion

Wie Abschnitt 3 zeigt, ist die Zahl der in leicht erhöhter Konzentration nachgewiesenen Stoffe gering. In Tabelle 5 sind die 95-Perzentilwerte der TVOC und ausgewählter Einzelstoffe dieser Studie denen des Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) [9], den 90-Perzentilwerten (Auffälligkeitswerte) aus dem Datenpool der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) [10; 11] und, soweit vorhanden, dem Richtwert I (Vorsorgerichtwert) des UBA [12; 13] gegenübergestellt. Die Bedeutung des Richtwertes sowie die Datenbasis der Werte der AGÖF und des KUS sind in dem Beitrag auf S. 79 ff. in diesem Heft beschrieben. Das 95-Perzentil der TVOC dieser Studie ist erheblich niedriger als das der Vergleichswerte. Einige der 95-Perzentilwerte der Einzelstoffe sind dagegen leicht höher. Insbesondere die Aldehyde liegen über den Werten des KUS, jedoch – bis auf Benzaldehyd – unter den Auffälligkeitswerten der AGÖF. Bei Benzaldehyd wird auch der Richtwert I leicht überschritten. Der in Deutschland gültige Innenraumrichtwert für Formaldehyd in Höhe von 120 µg/m³ [14] sowie der Empfehlungswert der Weltgesundheitsorganisation in Höhe von 100 µg/m³ [15] werden nicht tangiert. Das 95-Perzentil für Formaldehyd liegt mit 70 µg/m³ jedoch über den Werten, die in anderen Bundesländern ermittelt wurden [16 bis 18]. Hier lagen die

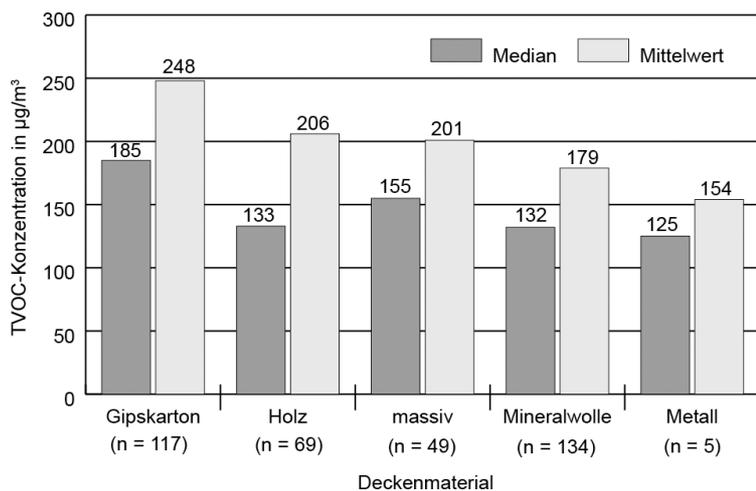


Bild 10. TVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Deckengestaltung.

Werte zwischen 31 und 36,4 µg/m³. Gleiches gilt für Acetaldehyd mit einem Bereich zwischen 15 und 27 µg/m³ im Vergleich zu 60 µg/m³.

Bei Betrachtung der Einzelfaktoren sind folgende Feststellungen zu treffen:

Durch die Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler ergibt sich ein messbarer Anstieg der VOC, insbesondere von D5 und Limonen. Besonders auffällig ist der Anstieg der D5-Konzentration in Klassenräumen, in denen Straßenkleidung wie Mäntel und Jacken aufbewahrt werden. Unter dem Aspekt der Minimierung von VOC-Konzentrationen in Klassenräumen ist dort die Aufbewahrung von Straßenkleidung somit nicht zu empfehlen. Der Eintrag von VOC in die Klassenräume ist im Median in den Jahrgangsstufen 10 und 11 am höchsten. D5 trägt vermutlich wesentlich dazu bei.

Durch Komponenten von Textilien, Wasch- und Reinigungsmitteln sowie Körperpflegemitteln und Parfüms sind diese Anstiege plausibel. Auch in einer vergleichbaren Studie in Bayern [16] wurden mit 210 µg/m³ als Sommerwert und 126 µg/m³ als Winterwert vergleichsweise hohe 95-Perzen-

tilwerte für D5 ermittelt. Hier erfolgten die Messungen jedoch durchweg in Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern, wobei nicht angegeben ist, wie lange sie sich bereits vor der Messung in der Klasse aufhielten. Die hier dargestellten Werte basieren dagegen auf Messungen während der ersten 20 min nach Eintreten der Schülerinnen und Schüler. Betrachtet man die Schularten, weisen Grund- und Sonderschulen die höchsten Summenwerte für VOC in der Grundbelastung auf. Diese Schulen unterscheiden sich von den anderen dadurch, dass hier z. B. häufig Farben, Kleber, Zeichenmaterial, Zeichnungen, Bastelmaterial und -erzeugnisse sowie Bücher aufbewahrt werden, was zu einer höheren Grundbelastung beitragen kann.

In Abhängigkeit vom Baujahr steigen die VOC-Konzentrationen in den Baujahren nach 1985 erwartungsgemäß an. Hier sind insbesondere Limonen und Hexanal zu bemerken, wobei Hexanal insbesondere

in Gebäuden der letzten zwei Baujahre auffällig ist. Formaldehyd zeigt eine leicht ansteigende Tendenz unter Berücksichtigung der Baujahre. Analog zu den Baujahren zeigt sich, dass auch die VOC-Konzentrationen in renovierten Räumen höher sind als in nicht renovierten. Auch im Rahmen des KUS [9] wurden in renovierten, grundsanierten und neu errichteten Gebäuden signifikant höhere VOC-Gehalte ermittelt als in älteren Gebäuden.

Massivbauten und Pavillonbauten zeigen unter dem Aspekt der Bauweise im Mittel keine gravierenden Unterschiede hinsichtlich der VOC-Konzentration. Limonen und Formaldehyd sind in der Pavillonbauweise im Vergleich zur Massivbauweise leicht erhöht. In Pavillonbauten kommen häufiger Holzbaustoffe zum Einsatz als in Massivbauten.

Hinsichtlich des Fußbodenbelages weisen Räume mit Linoleum- und Kautschukbelag die höchsten TVOC-Werte als Median und Mittelwert auf. Als arithmetische Mittelwerte sind bei Linoleum die Werte von α-Pinen, Limonen und Hexanal am höchsten. Sonst sind die arithmetischen Mittelwerte für alle dargestellten Einzelstoffe in etwa gleich. Die

Tabelle 3. Vergleich der 95-Perzentilwerte ausgewählter VOC und Aldehyde mit denen des KUS, den 90-Perzentilwerten (Auffälligkeitswerte) der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) und dem Richtwert I1 (RW I) des Umweltbundesamtes (UBA) in µg/m³. * Richtwert des ehemaligen Bundesgesundheitsamtes (BGA), ** gesättigte acyclische aliphatische C4 – C11-Aldehyde

VOC und Aldehyde	UK NRW 2003 bis 2009 n = 381	KUS UBA [9] 2003 bis 2006 n = 555	AGÖF [10] 2002 bis 2006	RW I UBA
TVOC	569	1 100	1 636	1 000
n-Heptan	15	22,8	13	–
n-Undecan	10	14,8	29	–
Toluol	35	57,6	49	300
Butan-1-ol	11	17,6	45,7	–
2-Ethylhexan-1-ol	21	11,4	12,8	–
2-Phenoxyethanol	10	3,7	9,2	–
Ethylacetat	5	70,8	38,0	–
α-Pinen	45	67,6	93,0	200
Limonen	45	103,0	33,3	1 000
D5	25	–	30,4	400
Hexanal	35	30,00	67,0	100**
Formaldehyd	70	47,4	84,5	120*
Acetaldehyd	60	50,3	72,2	–
Benzaldehyd	24	6,6	10	20

Formaldehydkonzentration ist gleichmäßig verteilt über alle Fußbodenarten, mit den geringsten Werten bei Holz. Hierbei handelt es sich überwiegend um Massivholzböden in Gebäuden älterer Baujahre, bei denen keine nennenswerten Formaldehydemissionen mehr zu erwarten sind. Empfehlungen für die Fußbodengestaltung lassen sich aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede daraus jedoch nicht ableiten.

Auch in einer Studie aus Schleswig-Holstein [17] wiesen die Räume mit Holzfußböden im Vergleich mit den anderen Bodenbelägen signifikant höhere VOC-Konzentrationen auf. Allerdings war dort ein überproportionaler Anteil der Räume innerhalb der letzten 12 Monate renoviert worden. Im Gegensatz zu den eigenen Ergebnissen wurden dort in Räumen mit Holzfußböden auch höhere Naphthalinkonzentrationen als in Räumen mit anderen Bodenbelägen gefunden [17]. Im KUS waren in Räumen mit Linoleumböden die mittleren Gehalte an Acetaldehyd signifikant höher [9], ein Sachverhalt, der hier in gleicher Weise nicht bestätigt werden kann. Ansonsten sind die Ergebnisse mit denen aus dieser Studie vergleichbar.

Unter dem Aspekt der Deckengestaltung ist die TVOC-Konzentration bei Gipskartondecken am höchsten, bei relativ gleichmäßiger Verteilung der Stoffe im arithmetischen Mittelwert. Die Gipskartondecken sind überwiegend gestrichen. Sie leisten insofern einen Beitrag zur VOC-Emission durch Tapeten, Kleber und Anstrichstoffe. Bei den Holzdecken sind die Limonen- und Formaldehydkonzentrationen am höchsten. Im Gegensatz zu den Holzböden bestehen Holzdecken häufig aus Pressspanmaterial, was eine mögliche Quelle für diese Stoffe ist. Decken aus Mineralwollplatten oder mit Mineralwollhinterlegung weisen die geringsten TVOC-Konzentrationen auf. Da sie gleichzeitig für gute raumakustische Bedingungen in Klassenräumen sorgen, ist eine solche Deckengestaltung als vorteilhaft anzusehen.

Die hier ermittelten 95-Perzentilwerte für Limonen sind jedoch deutlich niedriger als sie in Berliner Schulen ($155 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [18] und im KUS ($103 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [9] ermittelt wurden. In Schleswig-Holstein wurden erhöhte Terpenwerte insbesondere in Räumen mit Holzverkleidungen gefunden [17] sowie im Rahmen des KUS in Räumen mit Vollholzmöbeln [9]. Eine vergleichbare Tendenz zeigt sich in dieser Studie in Räumen mit Holzdecken.

5 Zusammenfassung

Um einen Überblick über die Normalbelastung mit VOC und Aldehyden in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in NRW in 381 nicht verdächtigen Klassenräumen an 111 Schulen Raumluftkonzentrationsmessungen mittels Anreicherung an Tenax bzw. Dinisphenylhydrazin durchgeführt.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass sich in Klassenräumen im Normalzustand in der Regel keine auffälligen VOC- und Aldehydkonzentrationen zeigen. Dennoch kann die Raumluftqualität durch Lüftungsmaßnahmen weiter verbessert werden. Insgesamt liegen dann nur wenige der ca. 140 untersuchten VOC und Aldehyde oberhalb der analytischen Bestimmungsgrenze. Die Mittel-, Median- und Perzentilwerte in der Grundbelastung liegen weitgehend unter den Auffälligkeitwerten der AGÖF und den Ergebnissen des KUS. Auch die Richtwerte I des UBA sind deutlich unterschritten.

Schülerinnen und Schüler verursachen einen zusätzlichen VOC-Eintrag in den Klassenraum. Auffälligste Werte sind hierbei die Siloxanverbindung D5 und Limonen. Limonen ist unter anderem in Pflegemitteln und als Duftstoff in Kosmetika erhalten, D5 in zahlreichen Produkten des täglichen Lebens wie Haar- und Körperpflegemitteln, Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmittel sowie Textilien. D5 wird daher offenbar auch insbesondere durch die Aufbewahrung von Straßenkleidungen wie Jacken und Mäntel in Klassenräume eingetragen. Durch Lüftungsmaßnahmen lassen sich die VOC-Konzentrationen in den Klassenräumen jedoch deutlich reduzieren. Die Lage der Schule verursacht keine wesentlichen Unterschiede der VOC-Konzentrationen in Klassenräumen. Nach dem Lüften sind diese jedoch in Räumen im Bereich der Innenstadt am höchsten.

Ein leichter Anstieg der VOC-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Baujahr zeigt sich für Schulen, die nach 1985 und insbesondere in den letzten zwei Jahren errichtet wurden. Gleiches gilt auch für Räume, die in den letzten zwei Jahren renoviert wurden. Die TVOC-Konzentrationen für Gebäude in massiver Bauweise unterscheiden sich im Mittel nicht wesentlich von den Räumen in Holz- oder Ständerbauweise. Räume mit Linoleum- und Kautschukböden zeigen leicht höhere VOC-Belastungen im Vergleich zu anderen Fußbodenarten. Wegen der geringen Unterschiede lassen sich daraus aber keine Fußbodenbelagsempfehlungen ableiten. Auch unter dem Aspekt der Deckengestaltung sind die Unterschiede gering. Decken, die mit Mineralwolle hinterlegt oder mit Mineralwollplatten versehen sind, wie zum Beispiel Akustikdecken, haben die geringsten Werte. Diese Art der Deckengestaltung kann somit unter raumakustischen Gesichtspunkten wie auch hinsichtlich der VOC-Emission als vorteilhaft angesehen werden.

Im Vergleich zu Privathaushalten sind die 95-Perzentilwerte der VOC in Klassenräumen bis auf wenige Ausnahmen niedriger, die der Aldehyde dagegen leicht höher.

Danksagung

Wir möchten an dieser Stelle allen an dieser Studie Beteiligten herzlichen Dank aussprechen. Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der örtlichen Fachämter, den Schulleiterinnen und Schulleitern, den Lehrkräften sowie den Schülerinnen und Schülern, die uns bei der Studie vor Ort unterstützt haben und ohne deren Mitwirkung diese Studie nicht möglich gewesen wäre. Ferner bedanken wir uns bei Herrn Dr. *Thomas Klüner* von der Unfallkasse NRW für die Unterstützung bei der Auswahl von Messobjekten und die hilfreichen Diskussionsbeiträge sowie bei Herrn *Andreas Sander* für die Unterstützung bei den vorbereitenden Arbeiten zur Datenauswertung.

Literatur

- [1] Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Handreichung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 50 (2007), S. 990-1005.

- [2] Gesunde Luft in Schulen – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen. Hrsg.: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2013. www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Sonderschriften/S_63.pdf
- [3] VDI 4300 Blatt 1: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Meßstrategie. Berlin: Beuth 1995.
- [4] DIN EN ISO 16000-5: Innenraumluftverunreinigungen – Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Berlin: Beuth 2007.
- [5] *Assenmacher-Maiworm, H.; Hahn, J.-U.*: Aldehyde (Kennzahl 6045). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 39. Lfg. XI/07: Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/6045
- [6] *von Hahn, N.; Van Gelder, R.; Breuer, D.; Hahn, J.-U.; Gabriel, S.; Kleine, H.*: Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 7/8, S. 314-322.
- [7] *Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Weber, M.; von Hahn, N.; Koppisch, D.; Breuer, D.; Hahn, J.-U.*: Vorschläge zur Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 72 (2012) Nr. 7/8, S. 291-298.
- [8] Messung chemischer Verunreinigungen der Luft von Innenraum-Arbeitsplätzen (ohne Tätigkeit mit Gefahrstoffen). Gemeinsames Papier der Deutsche Forschungsgemeinschaft und der Ad-hoc-Kommission Innenraumluft (Entwurf).
- [9] *Schulz, C.; Ulrich, D.; Pickfuß, H.; Seiwert, M.; Conrad, A.; Brenske, K. H.; Hünken, A.; Lehman, A.; Kolossa-Gehring, M.*: Kinder-Umwelt-Survey (KUS) 2003/2006 – Innenraumluft – Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft in Haushalten mit Kindern in Deutschland. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit 03/2010. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2010. www.uba.de/uba-info-medien/4011.html
- [10] AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V., Springe-Eidagsen 2008. http://agoef.de/agoef/service/photoarchiv/pdfs/AGÖF_Orientwerte
- [11] *Hofmann, H.; Plieninger, P.*: Bereitstellung einer Datenbank zum Vorkommen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft. Forschungsbericht 205 61 243. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) e. V., Springe-Eidagsen 2008. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3637.pdf
- [12] Gesundheit und Umwelthygiene. Richtwerte für die Innenraumluft. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2013. www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm
- [13] *Seifert, B.*: Richtwerte für die Innenraumluft – Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 42 (1999) Nr. 3, S. 270-278.
- [14] Krebs erzeugende Wirkung von Formaldehyd – Änderung des Richtwertes für die Innenraumluft von 0,1 ppm nicht erforderlich. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 49 (2006), S. 1169.
- [15] Air Quality Guidelines for Europe. 2. Aufl. Hrsg.: World Health Organization. Regional Office for Europe, Kopenhagen, Dänemark 2001. www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf
- [16] *Fromme, H.; Heitmann, D.; Dietrich, S.; Schierl, R.; Körner, W.; Kiranoglu, M.; Zapf, A.; Twardella, D.*: Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70 (2008), S. 88-97.
- [17] *Ostendorp, G.; Riemer, D.; Harmel, K.; Heinzow, B.*: Aktuelle Hintergrundwerte zur VOC-Belastung in Schulen und Kindergärten in Schleswig-Holstein. Umweltmed. Forsch. Prax. 14 (2009), S. 135-152.
- [18] *Lahrz, T.; Piloty, M.; Oddoy, A.; Fromme, H.*: Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Untersuchungen zur Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Hrsg.: Institut für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen (ILAT), Fachbereich Umwelt und Gesundheitsschutz, Berlin 2003.