

VOC-Konzentrationen in Schulen

Parallelmessungen auf flüchtige organische Stoffe in zwei Laboratorien

H.-D. Neumann, M. Buxtrup, S. Benitez, D. Breuer

Zusammenfassung Die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen und ihre Vorgängerorganisation haben von 2003 bis 2009 in 381 nicht belasteten Klassenräumen an 111 Schulen umfangreiche Messungen durchgeführt, um einen statistisch abgesicherten Überblick über Innenraumbelastungen in Schulen unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu gewinnen. Die Messungen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) wurden parallel in zwei Laboratorien ausgewertet. Beide Laboratorien setzten Messverfahren ein, bei denen die organischen Stoffe auf Tenax^{TA} gesammelt und zur Analyse thermisch desorbiert werden. Die Methoden unterschieden sich im Wesentlichen im Typ des Tenaxröhrchens und des Thermodesorbers. Die Ergebnisse beider Verfahren waren gut vergleichbar. Das Verfahren Nr. 2 lieferte in der Regel etwas höhere Ergebnisse bei den Einzelstoffen und im Summenwert (totale volatile organic compounds, TVOC), zumeist jedoch in einem Bereich von deutlich unter 50 %. Unabhängig von der eingesetzten Methode sind die Ergebnisse gut vergleichbar mit Resultaten aus anderen Studien und können als repräsentativ für nicht belastete Klassenräume angesehen werden. Als Ergebnis ist festzustellen, dass sich in Klassenräumen im Normalzustand in der Regel keine auffälligen VOC-Konzentrationen zeigen.

VOC concentrations in schools – parallel measurements of volatile organic compounds in two laboratories

Abstract From 2003 to 2009, the North-Rhine/Westphalian social accident insurance institution and its predecessor organisation conducted extensive measurements in 381 non-suspect classrooms in 111 schools in order to obtain a statistically sound overview of indoor contamination in schools with varying room uses and ventilation arrangements. The measurements of volatile organic compounds (VOCs) were evaluated in parallel in two laboratories. The two laboratories used measuring methods in which the organic compounds were collected on Tenax^{TA} and thermally desorbed for analysis. The methods differed essentially in terms of the type of Tenax tube and thermal desorber. The findings from the two methods were readily comparable. Method No. 2 generally yielded slightly higher values for the individual substances and for the totale volatile organic compounds (TVOC), though in most cases within a range of well below 50%. Independently of the method employed, the results compare well with findings from other studies and can be regarded as representative of non-suspect classrooms. In conclusion, it can be stated that, as a rule, no conspicuous VOC concentrations arise in classrooms in their normal state.

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann, Martin Buxtrup,

Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Dipl.-Chem. Ing. Susanne Benitez,

Hygieneinstitut des Ruhrgebietes, Gelsenkirchen.

Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Breuer,

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

1 Einleitung

Die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen (UK NRW) und ihre Vorgängerorganisation haben von 2003 bis 2009 umfangreiche Messungen unter anderem auf flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) und Aldehyde in zufällig ausgewählten, nicht belasteten Klassenräumen durchgeführt. Ziel war es, einen statistisch abgesicherten Überblick über Innenraumbelastungen in Schulen unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu gewinnen [1]. Probenahme und Analyse der Proben wurden parallel in zwei Laboratorien durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Expositionsdatenbank MEGA des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) [2] dokumentiert und im Jahr 2011 erstmals statistisch ausgewertet, um Vorschläge für aktuelle Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerte für Klassenräume abzuleiten. Diese Vorschläge wurden zwischenzeitlich publiziert [3]. Die Ergebnisse eines Vergleichs der mit den unterschiedlichen Verfahren gewonnenen Daten werden hier vorgestellt. Messergebnisse bei Belegung des Raumes mit Schülerinnen und Schülern unter verschiedenen Lüftungsbedingungen werden in dem Beitrag auf Seite 85 in diesem Heft erläutert.

2 Methode

2.1 Datenerhebung

Die Messungen fanden unter Ausgleichsbedingungen in Anlehnung an die in der Richtlinienreihe VDI 4500 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen“ [4] und der Normenreihe DIN EN ISO 16000 „Innenraumluftverunreinigungen“ [5] beschriebene Vorgehensweise statt.

Vor der Messung wurden die Klassenräume intensiv mindestens 15 min lang gelüftet. Anschließend blieben alle Türen und Fenster für einen Zeitraum von mindestens acht Stunden – in der Regel über Nacht – geschlossen. Die Probenahmen in den nicht belegten Klassenräumen erfolgten im Anschluss bei weiterhin geschlossenen Türen und Fenstern. Die Messungen erfolgten in den Jahren 2003 bis 2009 in Räumen für den allgemeinbildenden Unterricht, zu denen es keine Beschwerden über eine unzureichende Luftqualität gab. Fachräume wie z. B. für den Chemie- oder Physikunterricht oder das Fach Technik sind in dem Datenkollektiv nicht enthalten. Die Messorte lagen in der Regel auf der Mittelachse des Klassenraumes in Höhe der letzten Tischreihe (**Bild**). Der Abstand zu den Wänden betrug jeweils mindestens 1,5 m, der Ansaugpunkt lag ca. 1,2 m über dem Fußboden in Kopfhöhe der Schüler. Die Probenahmen erfolgten mit geeigneten volumenstromgeregelten Probenahmepumpen.

2.2 Messverfahren

Die VOC-Bestimmung führte das Hygieneinstitut des Ruhrgebietes nach Verfahren Nr. 1 sowie das IFA nach Verfahren Nr. 2 durch. Beide Verfahren beruhen auf der thermischen



Messaufbau.

Desorption von Tenax^{TA} mit anschließender gaschromatographischer Trennung und massenspektrometrischer (MS) Detektion. Bei Verfahren Nr. 2 erfolgen die Identifizierung der Stoffe mittels MS und die Quantifizierung über einen Flammenionisationsdetektor. Die wesentlichen Unterschiede liegen in dem verwendeten Typ der Thermodesorptionsröhrchen und den Probenahmebedingungen:

Bei Verfahren Nr. 1 erfolgte die Probenahme mit Gerstel-TDS-Thermodesorptionsröhrchen (Länge: 178 mm, Innendurchmesser: 4 mm, Fa. Supelco Deisenhofen, gefüllt mit ca. 200 mg Tenax 60/80). Bei einem Volumenstrom von 0,20 l/min und einer Probenahmedauer von 20 min ergibt sich ein Probenahmenvolumen von 4 l. Die thermische Desorption erfolgte mit einem TDS-Thermodesorber der Fa. Gerstel, gekoppelt mit einem Gaschromatographen Typ Trace Ultra der Fa. Thermo Fisher Scientific und einem massenselektiven Detektor Typ DSQ II. Zur gaschromatographischen Trennung der VOC diente eine unpolare Kapillarsäule RTX1 (Länge: 60 m, Innendurchmesser: 0,25 mm, Filmdicke: 0,5 µm).

Für die Kalibrierung des Verfahrens wurde aus ausgewählten Einzelkomponenten (pro Gruppe 1 bis 3) für jede VOC-Gruppe ein Kalibriermix hergestellt und der Messbereich bis ca. 100 µg/m³ überprüft. Die Liste der zu analysierenden VOC orientiert sich an VDI 4300 Blatt 6 (zurückgezogen 9/2008) [6] bzw. DIN ISO 16000, Blatt 6 [7]. Standardmäßig

Tabelle 1. Verteilung der an der Studie beteiligten Schulen.

Schultyp	Anzahl der Schulen	Anzahl der Räume
Grundschulen	41	121
Hauptschulen	12	39
Realschulen	13	59
Gymnasien	19	71
Gesamtschulen	8	25
Berufskollegs	9	33
Sonderschulen	9	33
Summe	111	381

wurden somit zwischen 67 und 71 Einzelkomponenten analysiert. Die unterschiedlichen Zahlen resultieren aus während der Studiedauer neu hinzugekommenen Einzelkomponenten. Zusätzlich wurden Substanzen mit relevanter Konzentration ausgewertet, die als Einzelverbindungen individuell quantifiziert, mittels Bibliothekenrecherche identifiziert und als Toluoläquivalent angegeben werden. Insgesamt kamen somit ca. 70 weitere Substanzen in die Auswertung. Die so gewonnene Summe der quantifizierten Einzelkomponenten wird nach diesem Verfahren als total volatile organic compounds (TVOC) bezeichnet; die analytische Bestimmungsgrenze für die Einzelstoffe beträgt bei diesem Verfahren 2 µg/m³.

Bei Verfahren Nr. 2 wurden Thermodesorptionsröhrchen aus Edelstahl (Länge: 8,9 cm, Außendurchmesser: 0,6 cm, Fa. Supelco, Deisenhofen, gefüllt mit 200 mg Tenax TA) eingesetzt. Bei einem Volumenstrom von 0,066 l/min und 30 min Probenahmedauer ergibt sich ein Probenahmenvolumen von 2 l. Die thermische Desorption erfolgte mit einem Turbomatrix-650-Thermodesorber, gekoppelt mit einem GC/MS-System Clarus 600 GC und Clarus 600 MS der Fa. PerkinElmer. Die gaschromatographische Trennung der VOC erfolgte auch bei diesem Verfahren auf einer unpolaren Säule Elite 5 MS (Länge: 60 m, Innendurchmesser: 0,25 mm, Filmdicke: 1 µm).

Für die Kalibrierung wurden wie bei Verfahren Nr. 1 verschiedene Gruppen zusammengestellt; diese umfassen insgesamt 47 Einzelkomponenten. Die Methode wurde für sieben ausgewählte Einzelkomponenten nach DIN EN 1076 [8] mit Versuchen an der Prüfgasstrecke des IFA im Bereich von ca. 10 bis ca. 200 µg/m³ vollständig validiert [9]. Traten weitere Stoffe auf, wurden diese zunächst mittels GC/MS identifiziert und basierend auf einer Toluolkalibrierung (Toluoläquivalent) sowie bei iso-Alkan- und Cycloalkanverbindungen auf einer Dodecankalibrierung (Dodecanäquivalent) ausgewiesen. Die Summe aus diesen beiden Ergebnissen wird nach diesem Verfahren als TVOC angegeben; die analytische Bestimmungsgrenze für die Einzelstoffe beträgt bei diesem Verfahren 5 µg/m³.

Für die Kalibrierung wurden wie bei Verfahren Nr. 1 verschiedene Gruppen zusammengestellt; diese umfassen insgesamt 47 Einzelkomponenten. Die Methode wurde für sieben ausgewählte Einzelkomponenten nach DIN EN 1076 [8] mit Versuchen an der Prüfgasstrecke des IFA im Bereich von ca. 10 bis ca. 200 µg/m³ vollständig validiert [9]. Traten weitere Stoffe auf, wurden diese zunächst mittels GC/MS identifiziert und basierend auf einer Toluolkalibrierung (Toluoläquivalent) sowie bei iso-Alkan- und Cycloalkanverbindungen auf einer Dodecankalibrierung (Dodecanäquivalent) ausgewiesen. Die Summe aus diesen beiden Ergebnissen wird nach diesem Verfahren als TVOC angegeben; die analytische Bestimmungsgrenze für die Einzelstoffe beträgt bei diesem Verfahren 5 µg/m³.

3 Ergebnisse

3.1 Messorte, raumklimatische Verhältnisse und Lüftungsbedingungen

Messungen wurden in 111 Schulen in NRW durchgeführt (Tabelle 1). Die ausgewählten Schultypen entsprachen in etwa der Schullandschaft in NRW zum Zeitpunkt der Messungen.

Das Raumvolumen betrug im Mittel 204 m³, als 95-Perzentil 277 m³. Die Klassenräume waren minimal mit fünf Schülerinnen und Schülern in einer Sonderschule und maximal mit 35 in einer Realschule belegt; im Mittel betrug die Klassenbelegungsstärke 25.

Die optimalen Raumtemperaturen lagen in der Grundbelastungssituation im Winterhalbjahr von November bis April zwischen 20,5 und 21,4 °C sowie im Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober zwischen 21,9 und 22,6 °C. Die relative Luft-

Tabelle 2. Übersicht über die Ergebnisse der parallel durchgeführten VOC-Messungen mit zwei Verfahren.

BG: Bestimmungsgrenze

	Verfahren Nr. 1					Verfahren Nr. 2				
	n gesamt	n > BG	n > BG in %	90-Per- zentil	95-Per- zentil	n gesamt	n > BG	n > BG in %	90-Per- zentil	95-Per- zentil
TVOC	381	381	100	364	569	349	307	88	631	841
aliphatische Kohlenwasserstoff- gemische (C ₉ bis C ₁₄)	–	–	–	–	–	279	29	10,4	21	51
Alkane										
n-Heptan	381	90	23,6	10	15	350	85	24,3	12	19
n-Octan	381	7	1,8	BG	BG	279	12	4,3	BG	BG
n-Nonan	381	22	5,8	BG	BG	279	9	3,2	BG	BG
n-Decan	381	125	32,8	5	5	279	22	7,9	BG	6
n-Undecan	381	185	48,6	6	10	279	51	18,3	7	14
n-Dodecan	381	49	12,9	3	5	279	85	12,5	6	10
n-Tridecan	381	6	1,6	< BG	< BG	279	20	7,2	BG	8
n-Tetradecan	381	4	1,0	< BG	< BG	279	14	5,0	BG	7
n-Pentadecan	381	8	2,1	< BG	< BG	279	14	5,0	BG	6
n-Hexadecan	381	2	0,5	< BG	< BG	279	10	3,6	BG	BG
Aromaten										
Benzol	381	12	3,1	< BG	3	343	12	3,5	BG	BG
Toluol	381	360	94,5	25	35	353	255	72,2	26	37
Ethylbenzol	381	198	52,0	6	10	353	57	16,1	7	10
Xylol (alle Isomere)	–	–	–	–	–	73	23	31,5	16	18
o-Xylol	381	136	35,7	5	5	280	16	5,7	BG	7
m-Xylol	–	–	–	–	–	280	63	22,5	8	10
p-Xylol	–	–	–	–	–	280	13	4,6	BG	BG
m/p-Xylol	381	208	54,6	10	15	280				
1,2,3-Trimethylbenzol	–	–	–	–	–	352	1	0,3	BG	BG
1,2,4-Trimethylbenzol	381	92	24,1	3	5	353	45	12,7	6	8
1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	381	81	21,3	3	5	353	1	0,3	BG	BG
Styrol	381	115	30,2	5	8	353	87	24,6	1	15
Naphthalin	381	29	7,6	< BG	3	283	6	2,1	BG	BG
Phenol	381	49	12,9	2	3	335	78	23,3	14	18
Alkohole										
Butan-1-ol	381	86	22,6	7	11	319	179	56,1	25	36
2-Ethylhexan-1-ol	381	188	49,3	15	21	321	235	73,2	22	35
Ketone										
Butanon	–	–	–	–	–	331	51	15,4	9	19
Ester										
Ethylacetat	381	86	22,6	3	5	353	67	19,0	9	21
n-Butylacetat	381	100	26,2	5	8	352	58	16,5	9	16
Ether										
2-Butoxyethanol	381	128	33,6	15	25	321	118	36,8	20	37
2-Butoxyethylacetat	–	–	–	–	–	353	2	0,6	BG	BG
2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	381	145	38,1	15	25	270	94	34,8	29	40
2-(2-Butoxyethoxy)ethylacetat	381	7	1,8	< BG	< BG	351	9	2,6	BG	BG
2-Phenoxyethanol	381	56	14,7	3	10	269	77	28,6	20	33
Terpene										
α-Pinen	381	85	22,3	22	45	350	106	30,3	15	33
Limonen	381	230	60,4	35	45	352	152	43,2	20	34
3-Karen	381	62	16,3	8	15	353	42	11,9	6	17
(+)-Longifolen	381	43	11,3	3	5	221	7	3,2	BG	BG
Siloxane										
Hexamethylcyclotrisiloxan (D3)	229	121	52,8	5	8	221	188	85,1	30	49
Octamethylcyclotetrasiloxan (D4)	229	149	65,1	15	22	220	93	42,2	23	32
Decamethylcyclopentasiloxan (D5)	229	179	78,2	15	25	352	166	47,2	18	23
Aldehyde										
Hexanal	381	207	54,3	22	25	342	182	53,2	22	37

* Messwerte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (BG) des jeweiligen Messverfahrens sind bei der Auswertung mit der halben BG berücksichtigt.

Tabelle 3. 95-Perzentilwerte ausgewählter VOC und Aldehyde aus verschiedenen Studien und dem Kinder-Umwelt-Survey (KUS) sowie 90-Perzentilwerte (Auffälligkeitswerte) der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) und Richtwerte I (RW I) des Umweltbundesamtes (UBA) in µg/m³.
*: gesättigte acyclische aliphatische C4 – C11-Aldehyde

	UK NRW		Bayern [12]		Berlin [13]	Schleswig-Holstein [14]	KUS [17]	AGÖF [15; 16]	RW I UBA [18]
	Verfahren 1 2003 bis 2009	Verfahren 2 2003 bis 2009	Winter 2004	Sommer 2005	2002 bis 2003	2005 bis 2007	2003 bis 2006	2007	
	n = 381	n = 349	n = 90	n = 75	n = 39	n = 285	n = 555		
TVOC	569	841	706	686	–	1023	1100	1636	1000
n-Heptan	15	19	7,6	9,6	10	5	22,8	13	–
n-Undecan	10	14	0,1	0,1	16,4	17	14,8	29	–
Toluol	35	37	45	130	109	18	57,6	49	300
Butan-1-ol	11	36	–	–	–	12	17,6	45,7	–
2-Ethylhexan-1-ol	21	35	9,4	12,6	–	15	11,4	12,8	–
2-Phenoxyethanol	10	33	29	39,4	–	16	3,7	9,2	–
Ethylacetat	5	21	10	2,8	22,8	< 2	70,8	38,0	–
α-Pinen	45	33	10	8,7	14,8	71	67,6	93,0	200
Limonen	45	34	36,9	14,0	153	51	103,0	33,3	1000
D5	25	23	210	126	22,4	12	–	30,4	400
Hexanal	25	37	12,0	15,0	5,0	11	30,0	67,0	100*
Benzaldehyd	24	–	–	4,7	5,7	9	6,6	10	20

feuchtigkeit lag im Winterhalbjahr zwischen 38,5 und 46,7 % und im Sommerhalbjahr zwischen 50 und 57 %.

3.2 Vergleich der Messverfahren

In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse der mit den beiden Verfahren gewonnenen VOC-Messwerte dargestellt. Sie zeigt, dass in Klassenräumen im Normalzustand keine auffälligen VOC-Konzentrationen zu verzeichnen sind. Auch stimmt die Mehrzahl der Perzentilwerte der Einzelkomponenten beider Verfahren bei fast allen Stoffen gut überein. Abweichungen ergaben sich bei den Einzelstoffen für Phenol, Butan-1-ol, Ethylacetat, 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol, 2-Phenoxyethanol und Hexamethylcyclotrisiloxan.

4 Diskussion

Wie **Tabelle 2** zeigt, sind die Perzentilwerte der untersuchten Einzelkomponenten gut vergleichbar, mit Verfahren Nr. 2 wurden in der Regel etwas höhere Werte ermittelt. Die Unterschiede lagen jedoch zumeist deutlich unter 50 %. Wie Ringversuche zeigen, sind Abweichungen von 50 % im vorliegenden Bereich der Spurenanalytik jedoch nicht ungewöhnlich [10; 11]. Als Folge der etwas höheren Werte für die Einzelsubstanzen errechnet sich ebenfalls ein höherer Wert für TVOC.

In **Tabelle 3** sind die 95-Perzentilwerte der TVOC und ausgewählter Einzelstoffe dieser Studie den Ergebnissen anderer Studien [12 bis 14] sowie den 90-Perzentilwerten (Auffälligkeitswerten) aus dem Datenpool der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) [15; 16], dem Kinder-Umwelt-Survey (KUS) [17] und den Richtwerten I des Umweltbundesamtes (UBA) [18], soweit vorhanden, gegenübergestellt. Die Datenbasis aus dem Datenpool der AGÖF ist unterschiedlich. Sie liegt in einem Bereich zwischen n = 1 564 und n = 2 402 für die Einzelstoffe und bei n = 382 für die TVOC. Der Richtwert I (RW I-Vorsorgerichtwert) des UBA beschreibt die Konzentration eines Stoffes in der Innen-

raumluft, bei der bei einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Erkenntnisstand auch dann keine gesundheitliche Beeinträchtigung zu erwarten ist, wenn ein Mensch diesem Stoff lebenslang ausgesetzt ist. Eine Überschreitung ist allerdings mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, unerwünschten Belastung verbunden [18].

4.1 Studien mit Bezug zu Schulen

Die Studien in Bayern, Berlin und Schleswig-Holstein [12 bis 14] bezogen sich unmittelbar auf Schul- bzw. Kindergartenräume. Die Resultate sind durchaus vergleichbar mit den Bedingungen der in diesem Artikel vorgestellten Studie. Im Winter der Jahre 2004 und 2005 wurden in Bayern 90 Klassenräume und aus diesem Kollektiv im Sommer 2005 nochmals 76 Klassenräume auf ihre VOC-Gehalte überprüft. Die Probenahme erfolgte während der Unterrichtszeit [12]. Im Winter der Jahre 2002 und 2003 wurden in Berlin 39 Schulen [13], in Schleswig-Holstein in den Jahren 2005 bis 2007 209 Schul- und 76 Kindergartenräume in 105 Gebäuden untersucht [14]. Da die Räume in Kindergärten häufiger als die in Schulen mit Holzelementen ausgestattet sind, sind dort auch etwas unterschiedliche VOC-Profile und -Konzentrationen zu erwarten. Eine Differenzierung der Räumlichkeiten erfolgt jedoch nicht.

Die Messverfahren für VOC und Aldehyde der Studie aus Bayern [12] sind mit dieser Studie vergleichbar. Auch die Probenahmebedingungen entsprechen sich weitgehend. Der Probenahmeort befand sich ebenfalls an der hinteren Wand, jedoch näher zur Wand und zum Fußboden. In Schleswig-Holstein erfolgte die Probenahme aktiv durch Absorption an Aktivkohle (Probenahmeröhrchen Typ NIOSH) bei einer Probenahmezeit von 300 min. Die Luftprobe sollte etwa in Raummitte in 1 bis 1,5 m Höhe entnommen werden. Die Werte der AGÖF [15; 16] stammen ebenso aus Schulen und beruhen auf anlassbezogenen Messungen aus den Jahren 2002 bis 2006 aus unterschiedlichen Bereichen, sodass

auch erhöhte Werte in der Statistik enthalten sein werden. Ein unmittelbarer Vergleichswert für Klassenräume kann somit daraus nicht abgeleitet werden. Bei den Zahlen handelt es sich zudem um 90-Perzentile und nicht wie bei den anderen Auswertungen um 95-Perzentile. Messverfahren, Analytik und Verfahren bei der Datenauswertung sind jedoch weitgehend vergleichbar.

4.2 Kinder-Umwelt-Survey (KUS)

Das UBA hat im Zeitraum von 2003 bis 2006 die Schadstoffbelastungen der drei- bis 14-jährigen Kinder in Deutschland auf repräsentativer Basis erfasst [17]. Die Untersuchung erfolgte in 150 Orten, wobei 555 VOC- und 586 Aldehydproben gewonnen wurden. Die Probenahme fanden in dem Raum statt, in dem sich das Kind im Allgemeinen während der 24 Stunden eines Tages am längsten aufhält. Zu ca. 95 % war dies das Kinderzimmer.

Die Probenahme im Rahmen des KUS erfolgte mit drei Passivsammlertypen (PerkinElmer Tenax-Röhrchen, 5M OVM-5500 und SKC UMEX-100), die über eine Woche eingesetzt wurden. Damit wurden Wochenmittelwerte unter realen Bedingungen der Raumnutzung bestimmt. Die chemischen Analysen erfolgten mittels Gaschromatographie (Detektion der VOC mittels FID oder Massenspektrometer) und High Performance Liquid Chromatography (Detektion der umgesetzten Aldehyd-Hydrazone mittels Diodenarray-Detektor). Die Bestimmungsgrenze für die VOC betrug $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.3 Vergleich der Studien

Trotz der Einschränkung unterschiedlicher Probenahmebedingungen und analytischer Vorgehensweise sowie eines nicht identischen Substanzspektrums können die Studien miteinander verglichen werden (Tabelle 3).

Die 95-Perzentilwerte für TVOC der Ergebnisse aus Bayern im Sommer wie im Winter liegen genau zwischen den Ergebnissen der in der vorliegenden Studie von den beiden Messinstituten erhaltenen, die Werte aus Schleswig-Holstein und die des KUS liegen etwas darüber.

Im KUS werden etwas höhere Werte angegeben, die auch den TVOC-Leitwert I des UBA für hygienische Auffälligkeit [19] leicht überschritten. Der Auffälligkeitswert der AGÖF wird jedoch in allen Studien bei Weitem nicht erreicht, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass diese Messungen anlassbezogen erfolgten.

Größere Abweichungen sind bei den 95-Perzentilwerten für Toluol zu verzeichnen. So sind die Werte in Bayern im Sommer und in Berlin deutlich höher als die hier vorgestellten Resultate für nicht auffällige Schulen; in Schleswig-Holstein ist der Wert etwa halb so hoch. Die Winterwerte in Bayern sind allerdings mit den hier vorgestellten Werten vergleichbar. Der jeweilige Richtwert I des UBA ist in allen Studien deutlich unterschritten.

Die Unterschiede mögen auf einen höheren Toluolgehalt der seinerzeit verwendeten Produkte zurückzuführen sein. So wurde auch bei der Ableitung von Innenraumreferenzwerten für Büroarbeitsplätze festgestellt, dass die Toluolkonzentration der Auswertung für die Jahre 2006 bis 2010 im Vergleich zum Zeitraum von 2001 bis 2005 um 36 % als 90-Perzentilwert und 39 % als 95-Perzentilwert gesunken ist [20]. Auch die Autoren der Studie aus Schleswig-Holstein

stellen fest, dass die Entwicklung wasserbasierter Farben und Kleber zu einer Verschiebung des Substanzspektrums weg von Alkanen und Aromaten hin zu Ersatzstoffen wie Estern, Ethern und Glykolderivaten geführt hat [14]. Die Veränderung lässt sich durch einen Vergleich der Ergebnisse mit ihrer Referenzwertstudie aus den Jahren von 1990 bis 1995 belegen [21].

Deutlich unterschiedlich sind die 95-Perzentilwerte für Limonen der Berliner Studie und des KUS im Vergleich zu den anderen Studien. In Schleswig-Holstein wurden erhöhte Terpenwerte insbesondere in Räumen mit Holzverkleidungen gefunden [14] sowie im KUS in Räumen mit Vollholzmöbeln [17].

In Bayern ist die D5-Konzentration vergleichsweise hoch. Hierbei ist allerdings festzuhalten, dass die Messungen in Anwesenheit von Schülern erfolgten [12].

Abschließend ist festzustellen, dass die Werte der hier mit beiden Verfahren ermittelten Einzelkomponenten dieser Studie deutlich unter den Richtwerten des UBA und auch unter den empfohlenen Orientierungswerten für flüchtige organische Verbindungen der Raumluft der AGÖF liegen. Messungen in Verdachtsräumen zeigen, dass z. B. bei Mängeln in der Bauausführung deutliche Abweichungen von diesen Werten zu erwarten sind. Ein Beispiel für einen solchen Fall wurde bereits in einer früheren Publikation zu dieser Studie vorgestellt [22].

Unter dem Aspekt der Ableitung und Anwendung von Referenzwerten ist die Einhaltung des zugehörigen Messverfahrens und der Messstrategie eine wesentliche Voraussetzung. Ferner ist die Vergleichbarkeit des betrachteten Innenraums mit den Referenzräumen in Bezug auf die Ausstattung und die Art der Nutzung zu beachten.

5 Zusammenfassung

Um einen Überblick über die Normalbelastung von VOC in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in NRW an 111 Schulen in 381 nicht verdächtigen Klassenräumen Raumluftkonzentrationsmessungen mittels Anreicherung an TENAX durchgeführt. Parallel kamen dabei an 100 Schulen und in 355 Klassenräumen zwei Messmethoden zum Einsatz, die grundsätzlich vergleichbar sind, jedoch in ihren Randbedingungen (Probenräger, Probenahmedauer, Kalibrierung und Auswertung) etwas unterschiedlich waren.

Der Vergleich der Ergebnisse aus beiden Auswertungsverfahren ergab, dass die Resultate vergleichbar sind. Das Verfahren Nr. 2 liefert in der Regel etwas höhere Ergebnisse, was dazu führte, dass der Summenwert der VOC (TVOC) etwas höher lag. Die Unterschiede bewegten sich jedoch zumeist in einem Bereich von deutlich unter 50 %, was bei spurenanalytischen Verfahren als gut vergleichbar angesehen werden kann.

Unabhängig von der eingesetzten Methode sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen sehr gut vergleichbar mit den Resultaten aus anderen Studien zu Schul- und Kindergartenräumen. Die im Rahmen dieser Studie erhaltenen Werte können somit als repräsentativ für nicht belastete Klassenräume angesehen werden. Als Ergebnis ist festzustellen, dass in Klassenräumen im Normalzustand in der Regel keine auffälligen VOC-Konzentrationen auftreten.

Literatur

- [1] Gesunde Luft in Schulen – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen. Bericht der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2013. www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Sonderschriften/S_63.pdf
- [2] Expositionsdatenbank „Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz“ – MEGA. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. www.dguv.de/ifa, Webcode d4806
- [3] 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.
- [4] VDI 4300 Blatt 1: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Meßstrategie. Berlin: Beuth 1995.
- [5] DIN EN ISO 16000-5: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Berlin: Beuth 2007.
- [6] VDI 4300 Blatt 6: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC) (zurückgezogen 2008-09). Berlin: Beuth 2000.
- [7] DIN ISO 16000-6: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf TENAX TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS/FID. Berlin: Beuth 2012.
- [8] DIN EN 1076: Exposition am Arbeitsplatz – Messung von Gasen und Dämpfen mit pumpenbetriebenen Probenahmegeräten – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth 2010.
- [9] Breuer, D.; Friedrich, C.; Moritz, A.: VOC (Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen (Kennzahl 8936). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 45. Lfg. X/10. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/8936
- [10] Ringversuch VOC 2011. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. www.dguv.de/dguv/medien/ifa/de/fac/ring/pdf/ergebnisse/2011_VOC11_d.pdf
- [11] Ringversuch VOC 2012. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). www.dguv.de/dguv/medien/ifa/de/fac/ring/pdf/ergebnisse/2012_VOC_d.pdf
- [12] Fromme, H.; Heitmann, D.; Dietrich, S. et al.: Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70 (2008), S. 88-97.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute. Springe-Erdagsen 2013. <http://agoef.de/agoef/>
- [16] Hofman, H.; Plieninger, P.: Bereitstellung einer Datenbank zum Vorkommen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft. Forschungsbericht 205 61 243. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute, im Auftrag des Umweltbundesamts. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3637.pdf
- [17] 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 Innerraumluft in Haushalten mit Kindern in Deutschland. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit 03/2010. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau 2010. www.uba.de/uba-info-medien/4011.html
- [18] Gesundheit und Umwelthygiene. Richtwerte für die Innenraumluft. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau 2013. www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm
- [19] 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.
- [20] von Hahn, N.; Van Gelder, R.; Breuer, D.; Hahn, J.-U.; Gabriel, S.; Kleine, H.: Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten. Gefahrstoffe – Reinhalt. 71 (2011) Nr. 7/8, S. 314-322.
- [21] Heinzow, B.; Mohr, S.; Mohr-Kriegshammer, K.; Janz, H.: Organische Schadstoffe in der Innenraumluft von Schulen und Kindergärten. VDI-Bericht 1122, S.269-281. Düsseldorf: VDI 1994.
- [22] Neumann, H.-D.: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497.