



Gesunde Luft in Schulen – Teil 1

VOC- und Aldehydkonzentrationen
in beschwerdefreien Klassenräumen

Prävention in NRW | 56

Gesunde Luft in Schulen – Teil 1
VOC- und Aldehydkonzentrationen in
beschwerdefreien Klassenräumen

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
1 Einleitung	8
2 Methode	10
2.1 Datenerhebung	10
2.2 Datenauswertung	12
3 Ergebnisse	13
3.1 Messorte, raumklimatische Verhältnisse und Lüftungsbedingungen	13
3.2 Vergleich der Auswerteverfahren	14
3.3 Ergebnisse der Abhängigkeit von den Randbedingungen	24
4 Diskussion	41
5 Zusammenfassung	48
6 Literaturverzeichnis	49
7 Danksagung	51
8 Notizen	52
Impressum	54

Kurzfassung

Im Rahmen des Projekts „Gesunde Luft in Schulen“ wurden durch die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen in 381 beschwerdefreien Klassenräumen von 111 Schulen Raumluftkonzentrationsmessungen durchgeführt. Ziel der Messung war es, einen Überblick über die Normalbelastung von VOC- und Aldehydbelastungen in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu erhalten. Die Bestimmung der Gehalte von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wurden nach Anreicherung an Tenax, thermischer Desorption und Bestimmung der Analyten am Gaschromatographen mit massenselektivem Detektor (MSD) bzw. Flammenionisation-Detektor (FID) in zwei unabhängigen Instituten durchgeführt, wobei in einem Labor sowohl die qualitative als auch die quantitative Auswertung mittels GC/MS erfolgte. Das zweite Labor setzte für die Quantifizierung zusätzlich einen FID ein. Die Bestimmung der kurzketigen Aldehyde erfolgte nach Anreicherung an DNPH und Messung an der HPLC mit UV-Detektor. 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, des Baujahrs, 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 Decamethylcyclopentasiloxan (D5) und Limonen. D5 wird insbesondere durch die Aufbewahrung von Straßenkleidungen wie Jacken und Mäntel in Klassenräume eingetragen. Der Vergleich der beiden Auswerteverfahren ergab, dass die Ergebnisse weitgehend vergleichbar sind. Nur der Summenwert der VOC (TVOC) und die Konzentration weniger Einzelstoffe sind unterschiedlich. Die ermittelten Mittel-, Median- und Perzentilwerte sind auch weitgehend mit den Ergebnissen aus anderen Studien vergleichbar.

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. Gesundheitsgefahren werden befürchtet.

Zur Beurteilung einer möglichen Gesundheitsgefährdung des Menschen beim Auftreten von Gefahrstoffen in seiner Atemluft dienen im Allgemeinen die Arbeitsplatzgrenzwerte gemäß TRGS 900 [1]. Diese Grenzwerte sind für Arbeitsplätze ausgelegt, an denen Tätigkeiten mit Gefahrstoffen durchgeführt werden. Wenngleich diese Arbeitsplatzgrenzwerte in der Regel toxikologisch abgeleitet sind, für gesunde Erwachsene gelten und auf eine 8-Stundenschicht bezogen sind, sind sie für die Beurteilung der Luftqualität in Klassenräumen von Schulen ungeeignet. Hier soll die Luft stattdessen entsprechend der Arbeitsstättenverordnung [2] in der Regel Außenluftqualität aufweisen. Aber selbst die Außenluftqualität ist in der Regel nicht oder nur schwer zu erreichen. Zur Beurteilung der Luftqualität werden in der Praxis daher anstelle der Außenluftqualität in der Regel statistisch abgeleitete Referenzwerte herangezogen. Diese stammen dabei häufig aber aus Bereichen, die eine andere Nutzung haben, was zu Verzerrungen in der Beurteilung führt. So sind z. B. Referenzwerte, die in Wohnungen oder Büros gewonnen wurden, zur Beurteilung der Luft in Klassenräumen nur bedingt geeignet.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden hat zur Beurteilung der Innenraumluftqualität im Jahre 2007 folgende Bewertungsrangfolge empfohlen [3]:

Zunächst sind die von der Arbeitsgruppe für einzelne Substanzen oder Substanzgruppen toxikologisch abgeleiteten Innenraumrichtwerte heranzuziehen, die für Personen jedes 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, können statistisch abgeleitete Referenzwerte zur Bewertung herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Unterschreitung der Richtwerte bei Unterschreitung von Referenzwerten keine Beurteilung der gesundheitlichen Gefährdung möglich ist. Umgekehrt kann aus einer Überschreitung dieser Werte nicht automatisch auf eine Gefährdung geschlossen werden. 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, wurden durch die Unfallkasse NRW und ihre Vorgängerinstitutionen im Zeitraum von 2003 bis 2009 umfangreiche Messungen unter anderem auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Aldehyde in zufällig ausgewählten, beschwerdefreien Klassenräumen durchgeführt. Die Probenahmen und Analysen der Proben im Leerzustand des Raumes erfolgten mit Verfahren zweier unterschiedlicher Laboratorien, was einen Vergleich von Auswerteverfahren ermöglicht. Mit einem der Messverfahren wurden zusätzlich Messungen unter verschiedenen Lüftungsbedingungen mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt. Mithilfe eines standardisierten Fragebogens wurden darüberhinaus Daten wie z. B. über die Belegungsstärke des Raumes, Schuljahrgang, Schulart, Baujahr, Lage sowie Bau- und Ausstattungsmerkmale der Schule dokumentiert. Im Jahr 2011 wurden die in der IFA-Expositionsdatenbank MEGA [4] dokumentierten Messdaten erstmalig statistisch ausgewertet, um aus ihnen Vorschläge für aktuelle Innenraum-arbeitsplatz-Referenzwerte für Klassenräume abzuleiten. Die Vorschläge für solche Referenzwerte auf dieser Datenbasis wurden zwischenzeitlich publiziert [5]. Der Vergleich der Messverfahren und die Auswertung der zusätzlich gewonnenen Daten werden hier vorgestellt.

2 Methode

2.1 Datenerhebung

Die angewendeten Messstrategien für Innenraumarbeitsplatzmessungen basieren auf der VDI-Richtlinienreihe 4300 „Messen von Innenraumlftverunreinigungen“ [6] und auf der Normenreihe DIN EN ISO 16000 „Innenraumlftverunreinigungen“ [8].

Vor der Messung werden die Klassenräume intensiv mindestens 15 Minuten lang gelüftet. Anschließend werden alle Türen und Fenster für einen Zeitraum von mindestens acht Stunden, in der Regel über Nacht, geschlossen. Die Probenahme erfolgt im Anschluss bei weiterhin geschlossenen Türen und Fenstern. Die Klassenräume sind dabei nicht belegt. Eine weitere Messung erfolgt nach Betreten der Schüler im ungelüfteten Zustand des Klassenraumes während des Unterrichts. Nach erfolgter Stoßlüftung nach der Schulstunde über geöffnete Fenster und Türen erfolgt eine weitere Messung mit Kipplüftung bei Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler.

Die Messungen erfolgten in den Jahren 2003 bis 2009 in Räumen für den allgemeinbildenden Unterricht, in 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. Der Messort liegt in der Regel auf der Mittelachse des Klassenraumes in Höhe der letzten Tischreihe (Abb. 1). Der Abstand zu den Wänden beträgt jeweils mindestens 1,5 m, die Höhe des Ansaugpunktes 1,2 m vom Fußboden in Kopfhöhe der Schüler.

Abb. 1: Messaufbau



Die Bestimmung der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wurden im Hygieneinstitut des Ruhrgebietes (Verfahren 1) sowie im Institut für Arbeitsschutz (IFA) und nach dem MGU-Standardverfahren [9, 10] (Verfahren 2) durchgeführt. Die Analytik der separat zu berücksichtigenden Aldehyde erfolgt ebenfalls im IFA. Die Messwertbestimmungen bei Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler erfolgen ausschließlich nach Verfahren 1. Die Probenahme der VOC und der Aldehyde erfolgt jeweils mit volumenstromgeregelten Probenahmepumpen.

Zur Bestimmung der Konzentrationen an flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft werden nach Verfahren 1 Thermodesorptionsröhrchen TENAX TA der Firma

Supelco beaufschlagt. Diese sind mit TENAX 60/80 als Adsorbens gefüllt. Die Probenahmezeit beträgt 20 min bei einem Luftvolumenstrom von 0,20 l/min. Die VOC werden von den Sorptionsröhrchen thermisch desorbiert. Die Trennung der einzelnen VOC erfolgt über eine unpolare Kapillarsäule RTX1 (Länge 60 m, Innendurchmesser 0,25 mm, Filmdicke 0,5 µm) in einem Gaschromatographen (GC) mit massenselektivem Detektor (MS). Im Chromatogramm werden die zwischen n-Hexan und n-Hexadecan aufgetretenen Verbindungen betrachtet. Anhand der Retentionszeiten und der Massenfragmente werden die Substanzen identifiziert. Zum Vergleich dienen die Massenspektren der reinen Verbindungen und/oder die aus kommerziell verfügbaren Massenspektrenbibliotheken. Die Kalibrierung des Verfahrens erfolgt mittels eines Kalibrierungsgemisches. Aus ausgewählten Einzelkomponenten (pro Gruppe 1-3) wird 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 2008-09) [7] bzw. DIN ISO 16000, Blatt 5 [8]. Standardmäßig werden somit zwischen 67 und 71 Einzelkomponenten analysiert. Die unterschiedlichen Zahlen resultieren aus während der Studiendauer neu hinzugekommenen Einzelkomponenten. Zusätzlich werden Substanzen mit relevanter Konzentration ausgewertet, die als Einzelverbindungen individuell quantifiziert, mittels Bibliothekenrecherche identifiziert und als Toluoläquivalent angegeben werden. Insgesamt kommen somit rund 70 weitere Substanzen mit in die Auswertung. Die so gewonnene Summe der quantifizierten Einzelkomponenten wird nach diesem Verfahren als TVOC (total volatile organic compounds) bezeichnet. Die analytische Bestimmungsgrenze für die Einzelstoffe beträgt bei diesem Verfahren 2 µg/m³. Bei dem Verfahren 2 werden Thermodesorptionsröhrchen ATD TENAX TA beaufschlagt. Die Probenahmezeit beträgt 30 min bei einem Luftvolumenstrom von 0,066 l/min. Die Analyse erfolgt nach thermischer Desorption qualitativ mittels Gaschromatographie und Massenspektrometrie (GC/MS) und quantitativ mit Flammen-ionisationsdetektion (FID). Der Bereich der gemessenen Stoffe ist in Anlehnung an die DIN ISO 16000-6 [11] definiert. Auch bei diesem Verfahren wird ein Stoff, der zwischen n-Hexan bis einschließlich n-Hexadecan auftritt, von einer unpolaren Säule Elite 5 MS (Länge 60 m, Innendurchmesser 0,25 mm, Filmdicke 1 µm) eluiert. Abweichend davon werden vom IFA zusätzlich Butanon und Ethylacetat bestimmt. Die Auswertung umfasst 47 Einzelkomponenten. Die Methode ist für diese einzelnen Stoffe nach DIN EN 1076 [12] vollständig validiert.

Um Unterschiede in der Empfindlichkeit bei der Detektion von vornherein möglichst auszuschließen, werden bei diesem Verfahren alle Einzelstoffe kalibriert. Sollten weitere Stoffe auftreten, werden diese basierend auf einer Toluolkalibrierung (Toluoläquivalent) und 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.

Die Probenahme von Formaldehyd und weiterer Aldehyde erfolgt mit dem Probenträger Waters Sep-Pak. Die Probenahmezeit beträgt 30 min bei einem Luftvolumenstrom von 0,666 l/min. Zur Bestimmung der Aldehyde werden die Kartuschen mit Acetonitril eluiert. Die qualitative und quantitative Bestimmung erfolgt mittels HPLC. Die in Tab. 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 und Acrylaldehyd betragen 20 µg/m³, die für Acetaldehyd, Butyraldehyd, Glutaraldehyd und Propionaldehyd 40 µg/m³ [10].

Zusätzlich werden mit Hilfe eines standardisierten Begleitbogens die Randbedingungen der Messung beschrieben. Erfasst wurden folgende Parameter:

- Schulart
- Schuljahr
- Raumgröße
- Anzahl der Schülerinnen und Schüler im Raum
- Gebäudeart (massiv, Pavillon oder Ständerbauweise)
- Baujahr (vor 1950, 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)
- 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 wurden die mit den beschriebenen Methoden erhobenen Messdaten statistisch ausgewertet. Die Auswertung der mit Verfahren 1 gewonnenen Werte erfolgte mit Microsoft Office Excel. Bestimmt wurden die arithmetischen Mittelwerte, Mediane, 90- und 95-Perzentilwerte. In der Situation „Grundbelastung“ wurden so 381 Klassenräume, in der Situation „ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern“ 367 Klassenräume und in der Situation „gelüftet mit Schülerinnen und Schülern“ 363 Klassenräume in 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.

Die mit Verfahren 2 gewonnenen Messdaten wurden mit Hilfe der Auswerteroutinen in der IFA-Expositionsdatenbank MEGA [4] statistisch ausgewertet (Tab. 1). Insgesamt wurden 353 Klassenräume in 100 Schulen untersucht, woraus 15.136 Analysen resultieren. Pro Einzelstoff konnten zwischen 220 und 353 Messwerte ausgewertet werden. Die unterschiedliche Zahl der ausgewerteten Messdaten pro Einzelstoff ist darauf zurückzuführen, dass die Zahl der auswertbaren Stoffe während der Messkampagne angestiegen ist.

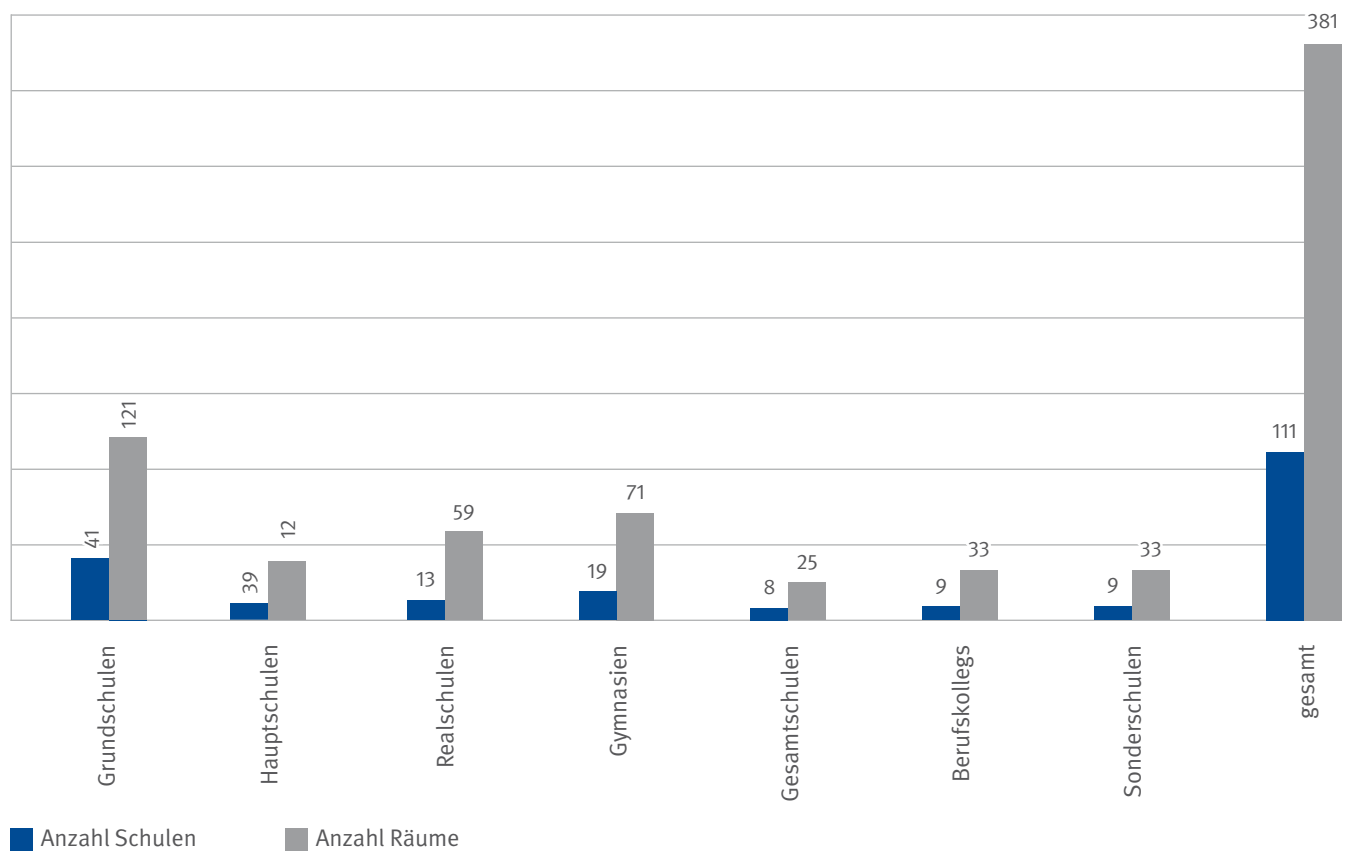
Durch die statistische Auswertung der Daten ist es möglich, Referenzwerte zu gewinnen. Entsprechend einer international anerkannten Konvention wird der 95-Perzentilwert eines hinreichend großen Datenkollektivs als Referenzwert bezeichnet [3]. Dabei wird ohne toxikologische Bewertung angenommen, dass der in den untersuchten Räumen angetroffene und nicht zu Erkrankungen und Beschwerden Anlass gebende „Normalzustand“ allgemein akzeptiert werden kann. Entgegen der international geltenden Konvention ziehen die Träger der gesetzlichen Unfallversicherungen im Sinne der Prävention zur Ableitung von Referenzwerten jedoch die niedrigeren 90-Perzentile heran [5, 15]. Stoffe, die unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze liegen, werden bei der Auswertung der Daten beider Verfahren jeweils mit der halben Bestimmungsgrenze berücksichtigt.

3 Ergebnisse

3.1 Messorte, raumklimatische Verhältnisse und Lüftungsbedingungen

In Abb. 2 ist die Anzahl der Schulen und Räume, in denen Messungen erfolgten, dargestellt. Die Verteilung entspricht in etwa der Schullandschaft in Nordrhein-Westfalen.

Abb. 2: Verteilung der an der Studie beteiligten Schulen und Räume



Das Raumvolumen betrug im Mittel 204 m^3 , als 95-Perzentil 277 m^3 . Die Klassenbelegungsstärke betrug minimal fünf Schülerinnen und Schüler in einer Sonderschule und maximal 35 Schülerinnen und Schüler in einer Realschule. Im Mittel waren die Klassen mit 23 Schülerinnen und Schülern belegt.

Die optimalen Raumtemperaturen lagen in der Grundbelastungssituation im Winterhalbjahr von November bis April zwischen $20,5^\circ\text{C}$ und $21,4^\circ\text{C}$ sowie im Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober zwischen $21,9^\circ\text{C}$ und $22,6^\circ\text{C}$. Die relative Luftfeuchtigkeit lag im Winterhalbjahr zwischen 38,5 und 46,7 Prozent und im Sommerhalbjahr zwischen 50 und 57 Prozent.

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 $1,8 \text{ m}^2$ und als 90-Perzentil $3,3 \text{ m}^2$, im Winterhalbjahr im Mittel 1 m^2 und als 90-Perzentil $1,8 \text{ m}^2$. Bei Stoßlüftung lag die geöffnete Fensterfläche im Mittel bei $3,1 \text{ m}^2$ und als 90-Perzentil bei $5,7 \text{ m}^2$ gemittelt über beide Halbjahre.

3.2 Vergleich der Auswerteverfahren

In Tab. 1 (S. 15-17) sind die Ergebnisse der mit den zwei Verfahren gewonnenen VOC-Messwerte dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Mehrzahl der Perzentilwerte der Einzelkomponenten beider Verfahren näherungsweise gut übereinstimmen. Abweichungen ergaben sich für die Summe der VOC (TVOC) und bei den Einzelstoffen für Phenol, Butan-1-ol, Ethylacetat, 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol, 2-Phenoxyethanol und Hexamethylcyclotrisiloxan. Die in Tab. 1 aufgelisteten Einzelkomponenten der Aldehyde werden nur für die Situation „Grundbelastung“ dargestellt, da Veränderungen durch den Eintrag von Schülerinnen und Schülern nicht zu erwarten sind. Formaldehyd wurde in 247 von 371 Räumen nachgewiesen. Das 90-Perzentil liegt bei $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, das 95-Perzentil bei $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ferner wurde Acetaldehyd in 56 von 334 Räumen nachgewiesen. Das 90-Perzentil beträgt $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, das 95-Perzentil $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die anderen Einzelkomponenten der Aldehyde sind nicht relevant.

Tab. 1: Vergleich der parallel durchgeführten VOC-Messverfahren

	Verf. 1 n gesamt	Verf. 1 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil	Verf. 2 n gesamt	Verf. 2 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil
TVOC	381	381	100	364	569	349	307	88	631	841
aliphatische Kohlen- wasserstoffgemische (C ₉ bis C ₁₆)	-	-	-	-	-	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	BG	7
n-Pentadecan	381	8	2,1	<BG	<BG	279	14	5	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

	Verf. 1 n gesamt	Verf. 1 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil	Verf. 2 n gesamt	Verf. 2 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil
Alkohole										
Butan-1-ol	381	86	22,6	7	11	319	179	56,1	25	36
2-Ethyl-1-hexanol	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	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										
Hexamethylcyclotri- siloxan (D3)	229	121	52,8	5	8	221	188	85,1	30	49
Octamethylcyclotet- rasiloxan (D4)	229	149	65,1	15	22	220	93	42,2	23	32
Decamethylcyclopent- rasiloxan (D5)	229	179	78,2	15	25	352	166	47,2	18	23

	Verf. 1 n gesamt	Verf. 1 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil	Verf. 2 n gesamt	Verf. 2 n>BG	n>BG* %	90- Perzentil	95- Perzentil
Aldehyde										
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	BG	BG
Glutaral (Glutardialdehyd)	-	-	-	-	-	325	0	0	BG	BG
Hexanal	381	207	54,3	22	25	342	182	53,2	22	37
Acrylaldehyd	-	-	-	-	-	325	0	0	BG	BG

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

Tab. 2 (S. 18-21) zeigt die Übersicht der nach Verfahren 1 gemessenen VOC in den Situationen Grund-belastung, 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. Die Tabelle zeigt einen leichten Anstieg der TVOC Konzentrationen 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. Die Summe der VOC (TVOC) ließ sich dadurch um rund 40 Prozent reduzieren. Auffälligste Werte sind 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).

Größte Veränderungen der Konzentrationen als 90-Perzentil bei Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern sind bei Limonen und Decamethylcyclopentasiloxan zu verzeichnen (Tab. 3, S. 22). Die am meisten nachgewiesenen Stoffe treten bis auf vier Einzelstoffe in allen drei Situationen auf. Jedoch unterscheiden sich die Werte der vier Stoffe, die nicht in allen drei Situationen gemessen wurden, nur unwesentlich von den Werten des Platzes 20 der Statistik. 15 der am meisten nachgewiesenen Einzelstoffe sind auch in der Liste der Anzahl der Stoffe mit den höchsten 90-Perzentilwerten vertreten (Tab. 4, S. 23). Die Konzentrationen der Stoffe am Ende der Tabelle liegen bereits nahe an der analytischen Bestimmungsgrenze.

Tab. 2: Übersicht über relevante VOC in den Situationen „Grundbelastung“, „mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftung“ und „mit Schülerinnen und Schülern nach Lüftungsintervention und Kipplüftung“

		Grundbelastung				ungelüftet mit Schüler/-innen				gelüftet mit Schüler/-innen			
		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/m³	12	1	1	3	41	1	3	5	26	1	1	3
Toluol	µg/m³	360	5	25	35	354	7	25	33	306	3	12	20
Ethylbenzol	µg/m³	198	2	6	10	210	2	6	10	108	1	3	5
m/p - Xylol	µg/m³	208	2	10	15	215	2	7	15	102	1	3	5
o - Xylol	µg/m³	136	1	5	5	141	1	5	5	52	1	2	3
n-Propylbenzol	µg/m³	36	1	1	3	31	1	1	3	13	1	1	1
1,2,4-Trimethylbenzol	µg/m³	92	1	3	5	86	1	4	5	37	1	1	3
1,3,5-Trimethylbenzol	µg/m³	81	1	3	5	74	1	3	5	27	1	1	2
2-Ethyltoluol	µg/m³	96	1	5	5	88	1	5	5	34	1	1	3
Styrol	µg/m³	115	1	5	8	117	1	5	6	38	1	2	3
Naphthalin	µg/m³	29	1	1	3	25	1	1	3	10	1	1	1
Phenol	µg/m³	49	0	2	3	48	0	2	3	32	0	0	3
4-Phenyl-Cyclohexen	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Aliphatische Kohlenwasserstoffe													
n-Hexan	µg/m³	61	1	5	12	56	1	5	11	40	1	2	5
n-Heptan	µg/m³	90	1	10	15	89	1	10	16	70	1	5	14
n-Octan	µg/m³	7	1	1	1	8	1	1	1	5	1	1	1
n-Nonan	µg/m³	22	1	1	2	13	1	1	1	6	1	1	1
n-Decan	µg/m³	125	1	5	5	128	1	5	6	56	1	2	3
n-Undecan	µg/m³	185	1	6	10	184	1	5	10	65	1	3	5
n-Dodecan	µg/m³	49	1	3	5	49	1	3	5	23	1	1	2

		Grundbelastung				ungelüftet mit Schüler/-innen				gelüftet mit Schüler/-innen			
		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
Aliphatische Kohlenwasserstoffe													
n-Tridecan	µg/m³	6	1	1	1	5	1	1	1	6	1	1	1
n-Tetradecan	µg/m³	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1
n-Pentadecan	µg/m³	8	1	1	1	7	1	1	1	3	1	1	1
n-Hexadecan	µg/m³	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
2-Methylpentan	µg/m³	32	1	1	4	30	1	1	4	30	1	1	4
1-Octen	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1-Decen	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
2,2,4,4,6-Pentamethylheptan	µg/m³	35	0	0	5	36	0	0	5	12	0	0	0
Cycloalkane													
Methylcyclopentan	µg/m³	21	1	1	2	24	1	1	3	27	1	1	3
Cyclohexan	µg/m³	21	1	1	2	18	1	1	1	18	1	1	1
Methylcyclohexan	µg/m³	21	1	1	2	26	1	1	3	23	1	1	3
Terpene													
3-Caren	µg/m³	62	1	8	15	61	1	6	20	24	1	1	4
α-Pinen	µg/m³	85	1	22	45	100	1	25	45	48	1	3	12
β-Pinen	µg/m³	62	1	5	15	77	1	6	15	28	1	1	3
Limonen	µg/m³	230	4	35	45	291	10	45	74	200	2	20	35
Longifolen	µg/m³	43	0	3	5	35	0	0	5	13	0	0	0
Alkohole													
2-Propanol	µg/m³	64	1	5	10	63	1	5	10	39	1	2	5
1-Butanol	µg/m³	86	1	7	11	76	1	6	12	38	1	2	4
2-Ethyl-1-hexanol	µg/m³	188	1	15	21	178	1	15	26	96	1	5	14

		Grundbelastung				ungelüftet mit Schüler/-innen				gelüftet mit Schüler/-innen			
		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
Glykole / Glykolether													
2-Methoxyethanol	µg/m³	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
2-Ethoxyethanol	µg/m³	6	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1
2-Butoxyethanol	µg/m³	128	1	15	25	126	1	15	25	60	1	4	6
1-Methoxy-2-propanol	µg/m³	32	1	1	4	43	1	2	7	25	1	1	3
2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	µg/m³	145	1	15	25	156	1	15	25	97	1	6	12
2-(2-Ethoxyethoxy)ethanol	µg/m³	56	0	5	20	52	0	5	18	4	0	0	0
2-Phenoxyethanol	µg/m³	56	0	3	10	56	0	4	9	36	0	1	4
Aldehyde													
Butanal	µg/m³	9	1	1	1	8	1	1	1	0	1	1	1
Pentanal	µg/m³	49	1	3	4	53	1	3	4	14	1	1	1
Hexanal	µg/m³	207	4	22	25	227	5	20	29	106	1	5	10
Nonanal	µg/m³	65	1	4	7	69	1	5	9	43	1	2	4
Benzaldehyd	µg/m³	182	1	12	24	179	1	12	21	108	1	4	5
Ketone													
Methylethylketon	µg/m³	85	1	5	10	81	1	5	9	31	1	1	3
Methylisobutylketon	µg/m³	7	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1	1
Cyclohexanon	µg/m³	45	1	3	5	38	1	2	6	13	1	1	1
Acetophenon	µg/m³	69	1	3	5	64	1	4	5	34	1	1	2
Halogenkohlenwasserstoffe													
Trichlorethen	µg/m³	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1
Tetrachlorethen	µg/m³	17	1	1	1	22	1	1	3	5	1	1	1
1,1,1-Trichlorethan	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1,4-Dichlorbenzol	µg/m³	3	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

		Grundbelastung				ungelüftet mit Schüler/-innen				gelüftet mit Schüler/-innen			
		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
Säuren													
Hexansäure	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Ester													
Ethylacetat	µg/m³	86	1	3	5	101	1	5	8	42	1	2	3
Butylacetat	µg/m³	100	1	5	8	141	1	5	7	55	1	2	3
Isopropylacetat	µg/m³	9	1	1	1	6	1	1	1	4	1	1	1
2-Ethoxyethylacetat	µg/m³	3	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1
TXIB (Texanolisobutyrat)	µg/m³	4	1	1	1	8	1	1	1	7	1	1	1
Furane													
2-Pentylfuran	µg/m³	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
THF (Tetrahydrofuran)	µg/m³	13	1	1	1	6	1	1	1	3	1	1	1
Siloxane													
Decamethylcyclopentasiloxan	µg/m³	179	1	15	25	182	1	32	55	167	1	21	29
Dodecamethylcyclohexasiloxan	µg/m³	143	1	8	10	149	0	10	15	132	0	5	10
Hexamethylcyclotrisiloxan	µg/m³	121	0	5	8	118	0	5	6	71	0	3	3
Octamethylcyclotetrasiloxan	µg/m³	149	1	15	22	143	0	15	20	136	0	8	12
Sonstige													
Aceton	µg/m³	52	0	10	25	58	0	15	25	40	0	3	5
Summenwerte													
TVOC (VDI + sonstige)	µg/m³	381	148	364	569	367	163	382	522	364	93	222	305
TVOC (Toluoläquivalent)	µg/m³	380	62	227	355	367	70	244	314	364	16	107	190

Tab. 3: 20 am häufigsten gemessenen Einzelstoffe nach Anzahl der Nachweise gemäß Verfahren 1

Nr.	Grundwerte			ungelüftet mit Schüler/-innen			gelüftet mit Schüler/-innen		
		90-Perzentil µg/m³	n>BG		90-Perzentil µg/m³	n>BG		90-Perzentil µg/m³	n>BG
	TVOC	364	381	TVOC	382	367	TVOC	222	364
1	Toluol	25	360	Toluol	25	354	Toluol	12	306
2	Limonen	35	230	Limonen	45	291	Limonen	20	200
3	m/p-Xylol	10	208	Hexanal	20	227	Decamethylcyclopentasiloxan	21	167
4	Hexanal	22	207	m/p-Xylol	7	215	Octamethylcyclotetrasiloxan	8	136
5	Ethylbenzol	6	198	Ethylbenzol	6	210	Dodecamethylcyclohexasiloxan	5	132
6	2-Ethyl-1-hexanol	15	188	n-Undecan	5	184	Benzaldehyd	4	108
7	n-Undecan	6	185	Decamethylcyclopentasiloxan	32	182	Ethylbenzol	3	108
8	Benzaldehyd	12	182	Benzaldehyd	12	179	Hexanal	5	106
9	Decamethylcyclopentasiloxan	15	179	2-Ethyl-1-hexanol	15	178	m/p-Xylol	3	102
10	Octamethylcyclotetrasiloxan	15	149	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	15	156	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	6	97
11	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	15	145	Dodecamethylcyclohexasiloxan	10	149	2-Ethyl-1-hexanol	5	96
12	Dodecamethylcyclohexasiloxan	8	143	Octamethylcyclotetrasiloxan	15	143	Hexamethylcyclotrisiloxan	3	72
13	o-Xylol	5	136	o-Xylol	5	141	n-Heptan	5	70
14	2-Butoxyethanol	15	128	Butylacetat	5	141	n-Undecan	3	65
15	n-Decan	5	125	n-Decan	5	128	2-Butoxyethanol	4	60
16	Hexamethylcyclotrisiloxan	5	121	2-Butoxyethanol	15	126	n-Decan	2	56
17	Styrol	5	115	Hexamethylcyclotrisiloxan	5	118	Butylacetat	2	55
18	Butylacetat	5	100	Styrol	5	117	o-Xylol	2	52
19	2-Ethyltoluol	5	96	Ethylacetat	5	101	α-Pinen	3	48
20	1, 2, 4-Trimethylbenzol	3	92	α-Pinen	25	100	Nonanal	2	43

Tab. 4: 20 höchste gemessene Einzelstoffe sortiert nach 90-Perzentilwerten gemäß Verfahren 1

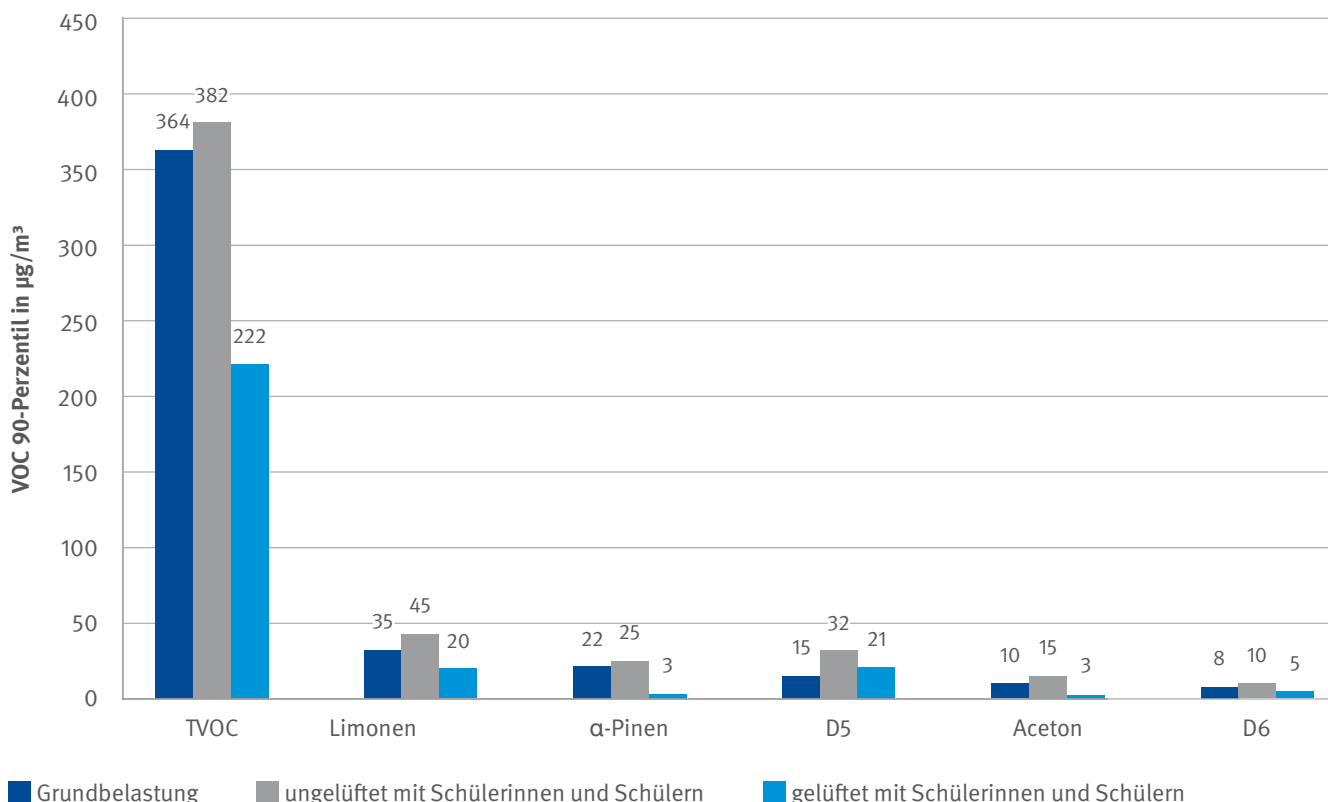
Nr.	Grundwerte			ungelüftet mit Schüler/-innen			gelüftet mit Schüler/-innen		
		90-Perzentil µg/m³	n>BG		90-Perzentil µg/m³	n>BG		90-Perzentil µg/m³	n>BG
	TVOC	364	381	TVOC	382	367	TVOC	222	364
1	Limonen	35	230	Limonen	45	291	Decamethylcyclopentasiloxan	21	167
2	Toluol	25	360	Decamethylcyclopentasiloxan	32	182	Limonen	20	200
3	α-Pinen	22	85	Toluol	25	354	Toluol	12	306
4	Hexanal	22	207	α-Pinen	25	100	Octamethylcyclotetrasiloxan	8	136
5	2-Ethyl-1-hexanol	15	188	Hexanal	20	227	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	6	97
6	2-Butoxyethanol	15	128	2-Ethyl-1-hexanol	15	178	n-Heptan	5	70
7	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	15	145	2-Butoxyethanol	15	126	2-Ethyl-1-hexanol	5	96
8	Decamethylcyclopentasiloxan	15	179	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	15	156	Hexanal	5	106
9	Octamethylcyclotetrasiloxan	15	149	Aceton	15	58	Dodecamethylcyclohexasiloxan	5	132
10	Benzaldehyd	12	182	Octamethylcyclotetrasiloxan	15	143	2-Butoxyethanol	4	60
11	m/p-Xylol	10	208	Benzaldehyd	12	179	Benzaldehyd	4	108
12	n-Heptan	10	90	n-Heptan	10	89	Ethylbenzol	3	108
13	Aceton	10	52	Dodecamethylcyclohexasiloxan	10	149	m/p-Xylol	3	102
14	3-Caren	8	62	m/p-Xylol	7	215	n-Undecan	3	65
15	Dodecamethylcyclohexasiloxan	8	143	β-Pinen	6	77	α-Pinen	3	48
16	1-Butanol	7	86	Ethylbenzol	6	210	Aceton	3	40
17	Ethylbenzol	6	198	3-Caren	6	61	Hexamethylcyclotrisiloxan	3	72
18	n-Undecan	6	185	1-Butanol	6	76	o-Xylol	2	52
19	o-Xylol	5	136	o-Xylol	5	141	Styrol	2	38
20	2-Ethyltoluol	5	96	2-Ethyltoluol	5	88	n-Hexan	2	40

3.3 Ergebnisse in Abhängigkeit von den Randbedingungen

Die im Folgenden dargestellten Beobachtungen beruhen ausschließlich auf den nach Verfahren 1 gewonnenen Messwerten, n gibt jeweils die Zahl der in die Statistik eingegangenen Messungen an.

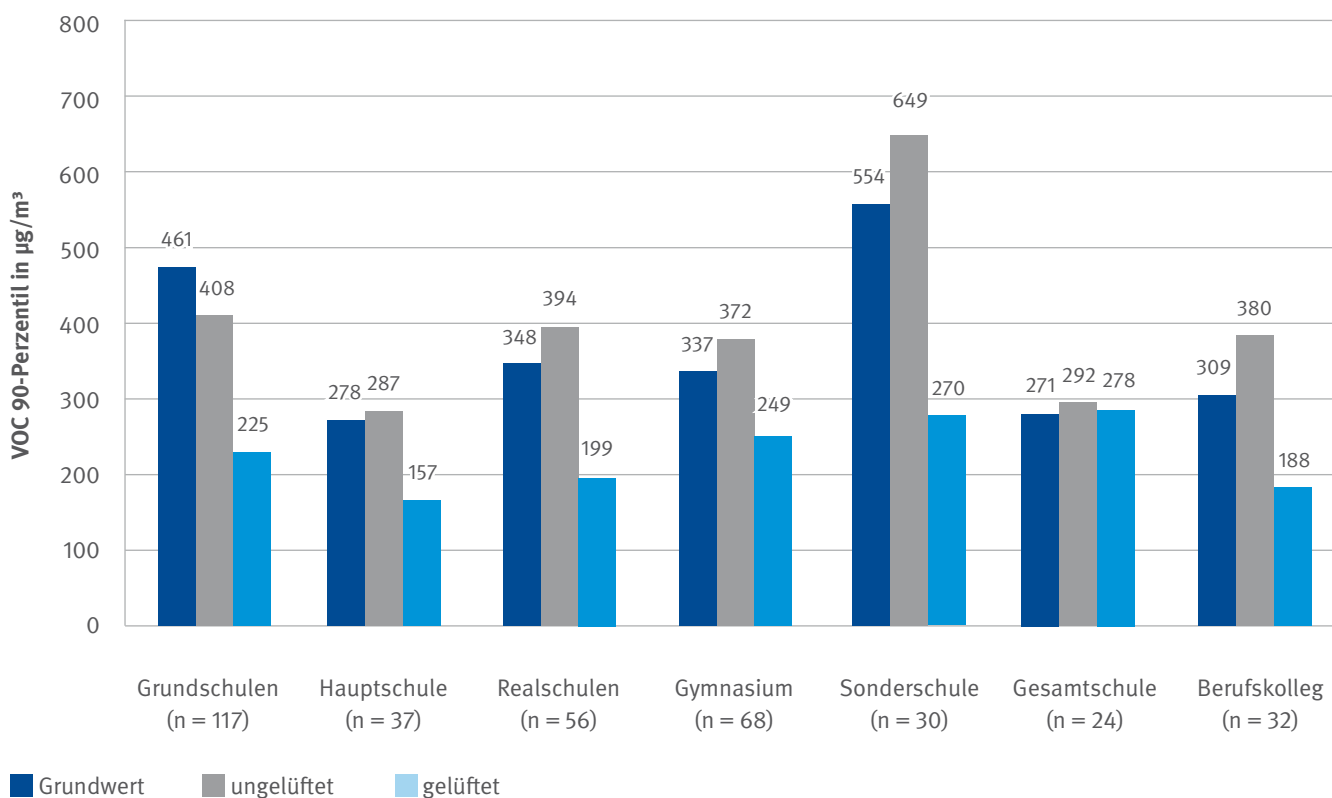
Abb. 3 zeigt die fünf Stoffe mit den höchsten Differenzen zwischen den Situationen „Grundbelastung“ und „ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern“ als 90-Perzentil. Demnach stieg der Summenwert der VOC (TVOC) während der 20-minütigen Probenahme nach Beginn des Unterrichtes um $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler. Am größten ist der Konzentrationsunterschied für Decamethylcyclopentasiloxan (D5) mit $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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.

Abb. 3: Fünf höchste TVOC-Differenzen zwischen den Situationen ungelüftet Grundbelastung und ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern sortiert nach 90-Perzentilwerten



Die höchste Grundbelastung als 90-Perzentil TVOC ist in Sonderschulen zu verzeichnen, gefolgt von den Grundschulen, Realschulen und Gymnasien (Abb. 4).

Abb. 4: 90-Perzentil von der TVOC sortiert nach Schularten



Die höchste Differenz zwischen den Situationen „Grundbelastung“ und „ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern“ ergibt sich in Sonderschulen, die geringste in Hauptschulen. In Grundschulen ist die Differenz sogar negativ. Dies ist auf gelegentlich zu lange Lüftungsphasen durch geöffnete Türen beim Betreten des Raumes durch die Schülerinnen und Schüler zurückzuführen. Auch die Mediane und arithmetischen Mittelwerte der TVOC-Grundbelastung sind in Grund- und Sonderschulen am höchsten (Abb. 5 und 6, S.26). Die geringste TVOC-Differenz zwischen der Grundbelastung und der Situation „ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern“ ist für die Sonderschulen zu erkennen. Hier sind die Schülerzahlen jedoch auch am geringsten. Ferner konnte in Sonderschulen das vorgegebene Lüftungsschema nicht immer realisiert werden, da sich der Unterricht hier häufig nicht an einem starren Unterrichtsstundenschema orientiert. Nach Lüftungsintervention sind die Mediane und arithmetischen Mittelwerte der TVOC jedoch für alle Schulformen in etwa vergleichbar.

Abb. 5: Median von TVOC sortiert nach Schularten

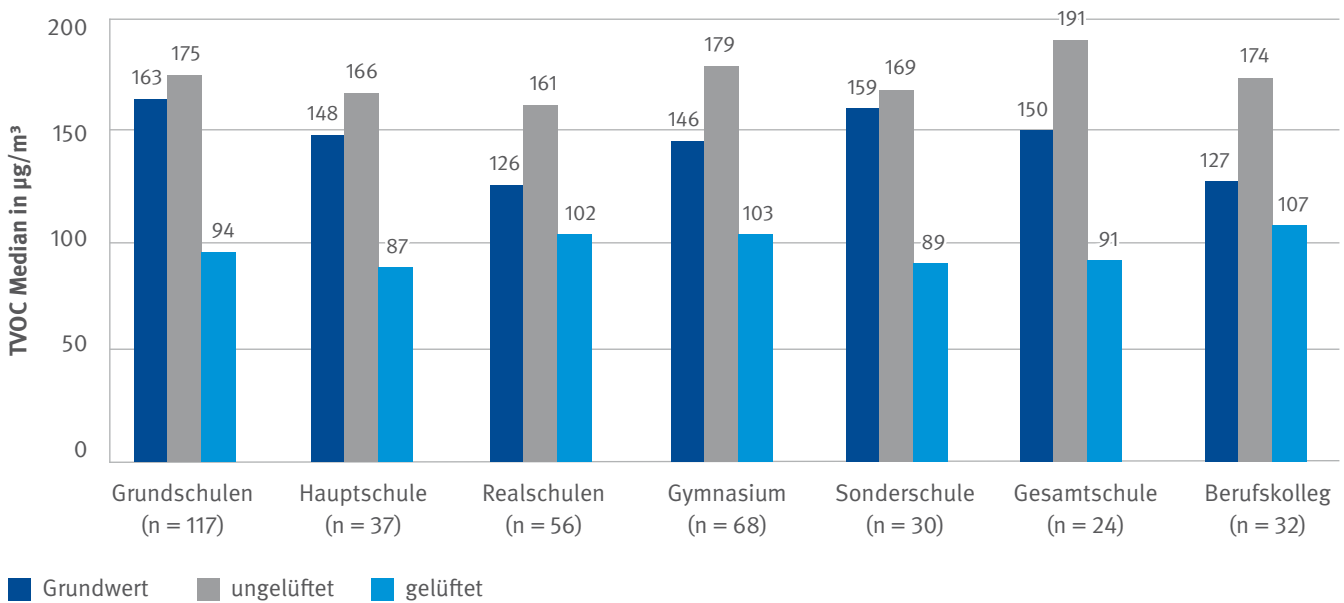
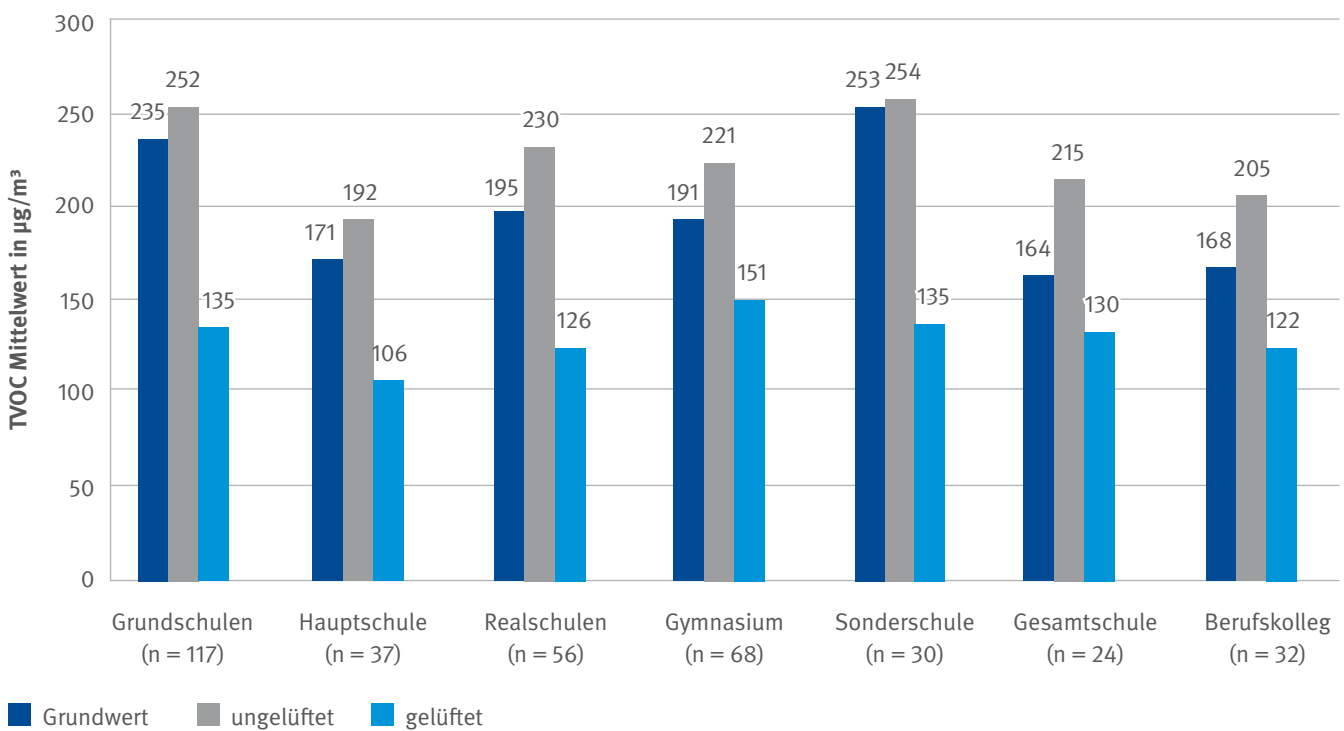
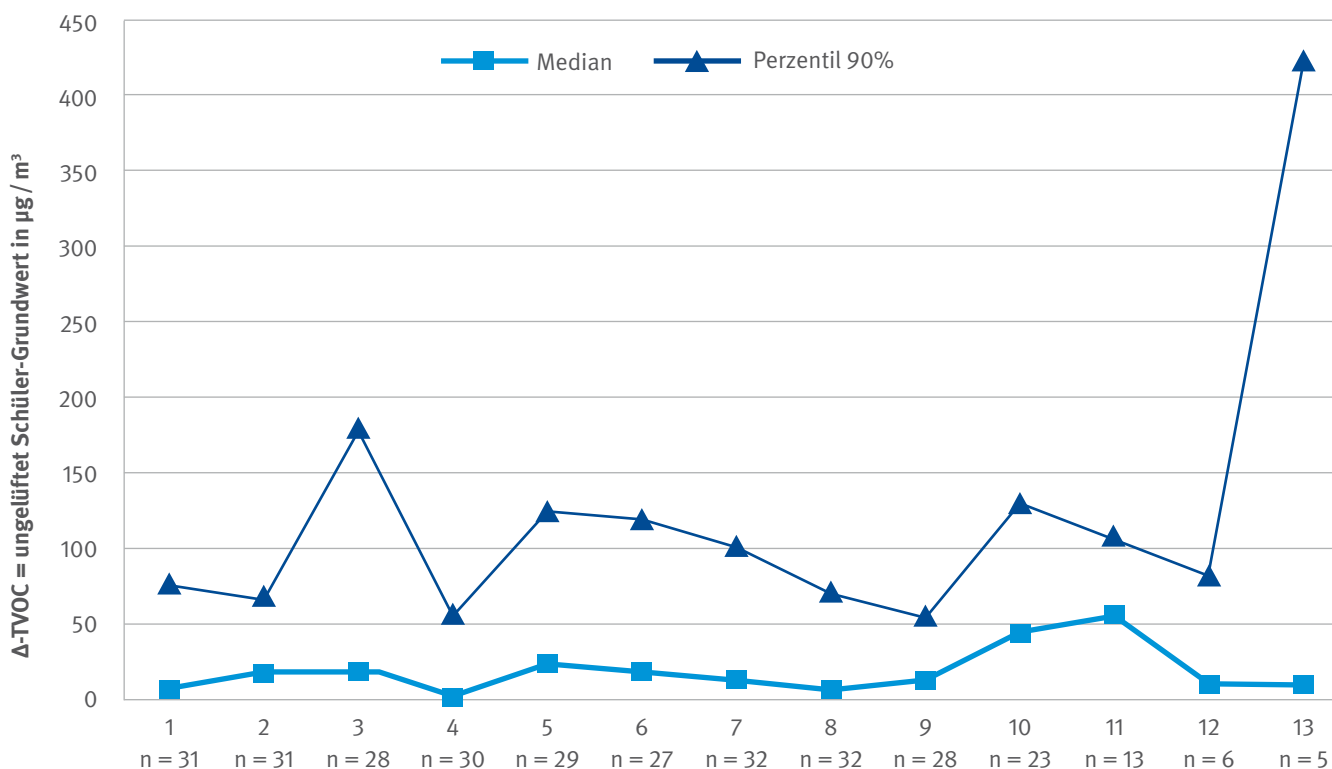


Abb. 6: Median von TVOC sortiert nach Schularten



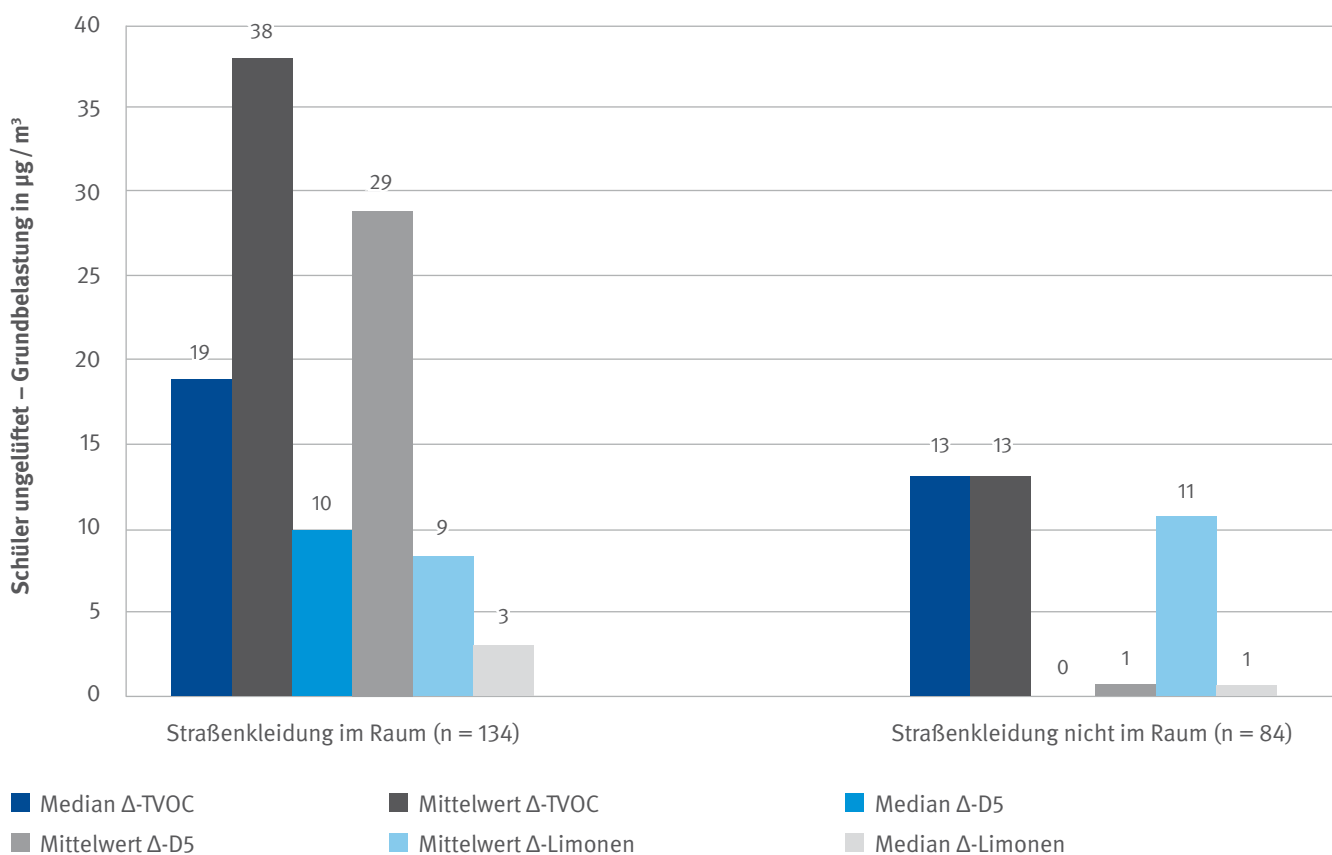
Die höchsten Einträge von VOC durch Schülerinnen und Schüler sind als Median in den Jahrgangsstufen zehn und elf zu verzeichnen (Abb. 7). Der hohe Wert als 90-Perzentil in der Jahrgangsstufe 13 im Vergleich zu den anderen Stufen ist auf die hohe VOC-Zunahme in einer Klasse zurückzuführen. Es handelt sich um einen Raum mit einem Raumvolumen von 164 m³ mit einer Klassenstärke von 19 Schülerinnen und Schülern in der Stunde ohne Lüftung und 28 Schülerinnen und Schülern in der Stunde mit Lüftung. Der D5-Anstieg in der Stunde ohne Lüftung beträgt 620 µg/m³, der D 6-Anstieg 68 µg/m³. Nach Stoßlüftung sanken die Konzentrationen in der Stunde mit Kipplüftung auf 393 µg/m³ für TVOC, 250 µg/m³ für D5 und 27 µg/m³ für D6. Mäntel und Jacken wurden im Raum aufbewahrt.

Abb. 7: TVOC-Differenz zwischen der Situation Grundbelastung und der Situation ungelüftet mit Schülerinnen und Schülern als Median und 90-Perzentil sortiert nach Schuljahrgängen



Grundsätzlich scheint die Aufbewahrung von Straßenkleidung wie Jacken oder Mäntel in den Klassenräumen eine zusätzliche Quelle von VOC zu sein (Abb. 8). Die TVOC-Konzentration steigt im Vergleich zur Grundbelastung im Mittel um 25 µg/m³ während der 20-minütigen Probenahme nach Unterrichtsbeginn. Auffällig ist hier insbesondere die Konzentration von D5, die in Räumen mit Aufbewahrung von Straßenkleidung im Vergleich zur Grundbelastung deutlich ansteigt. Die weiteren Einzelstoffe sind diesbezüglich dagegen unauffällig.

Abb. 8: VOC-Eintrag durch die Aufbewahrung von Straßenkleidung in Klassenräumen



Hinsichtlich der Lage der Schule (Abb. 9 und 10) zeigen sich die höchsten TVOC-Median- und Mittelwerte nach Lüftung im Bereich der Innenstadt und an vielbefahrenen Straßen, wobei diese Lagen häufig doppelt genannt sind. Gravierende Unterschiede sind insgesamt jedoch nicht zu verzeichnen. Die Konzentrationen für die Lage „Stadttrand“ sind aufgrund der geringen Fallzahl nicht repräsentativ. Die höchste TVOC-Differenz nach Lüftung ist im Mittel im Wohn- und Mischgebiet erkennbar, die schlechteste im Bereich der Innenstadt.

Abb. 9: Medianwerte für TVOC sortiert nach Lage der Schule

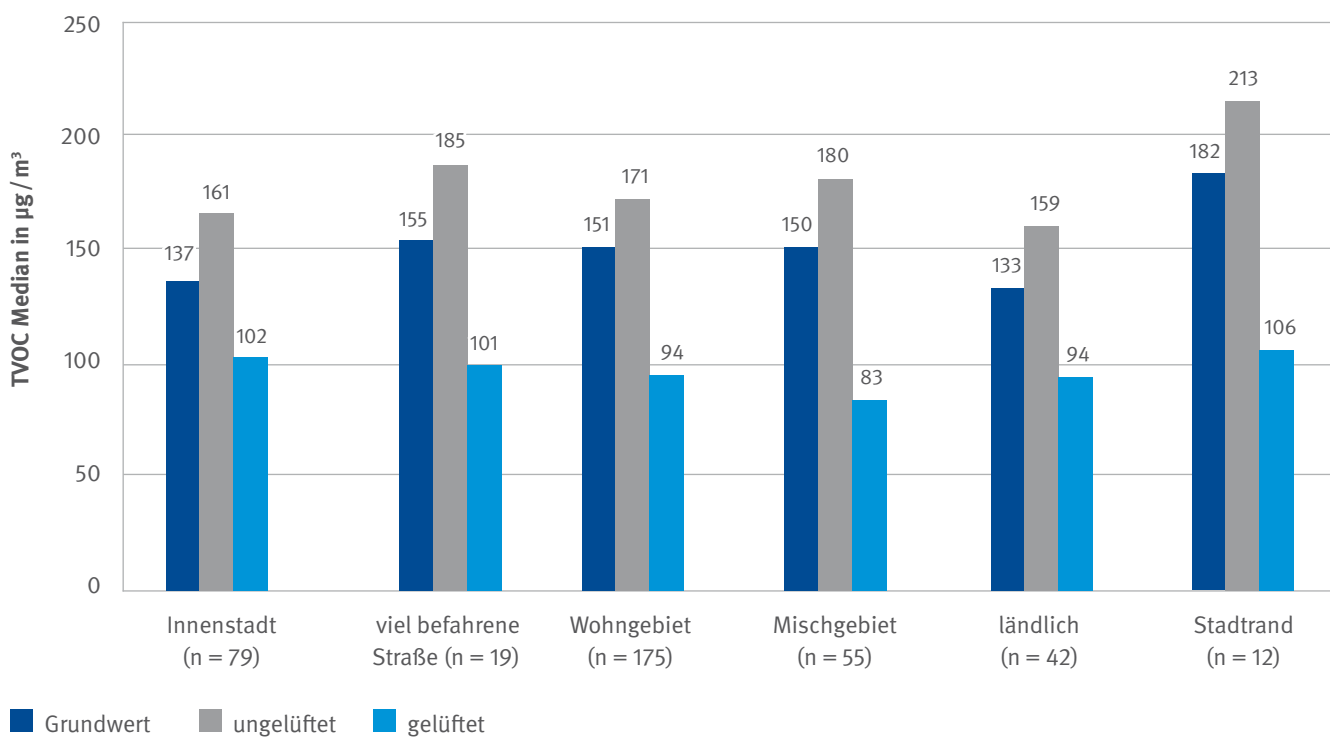
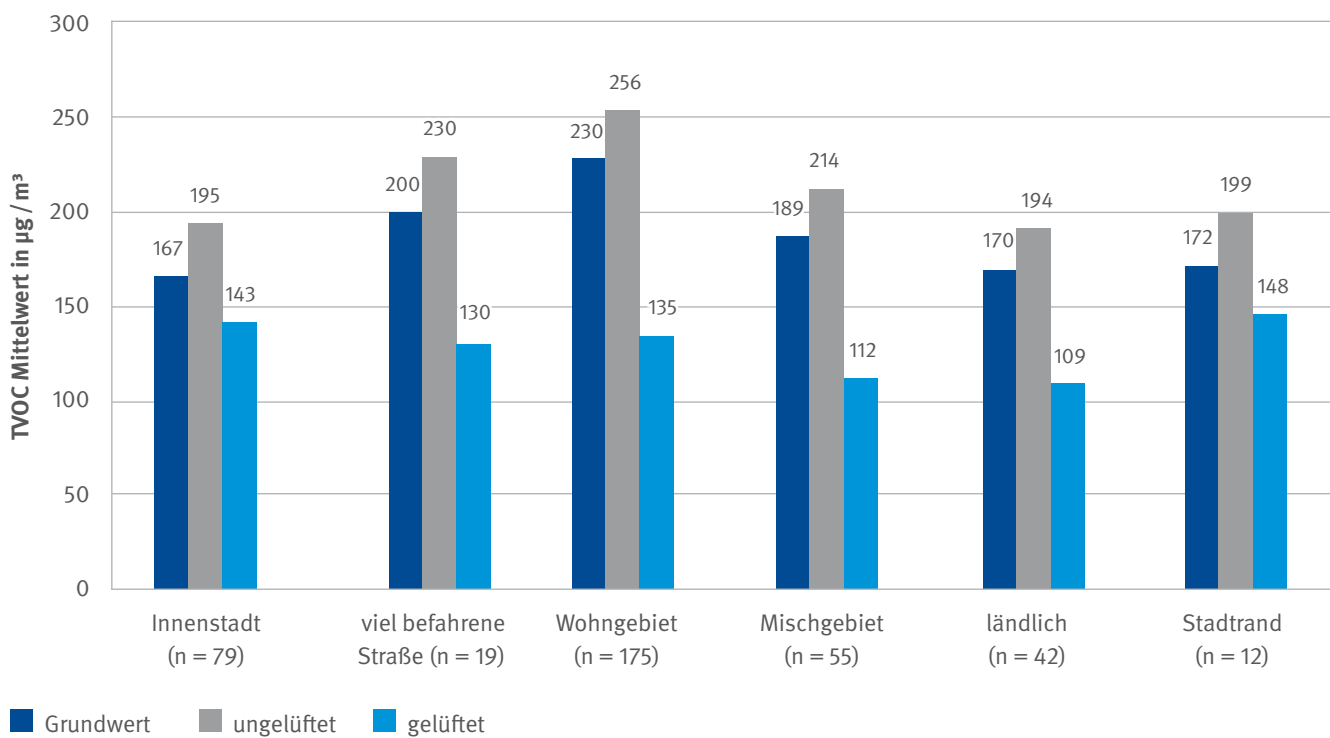


Abb. 10: TVOC-Mittelwerte sortiert nach Lage der Schule



In den Abb. 11 bis 13 sind TVOC- und Einzelstoffkonzentrationen in Abhängigkeit vom Baujahr dargestellt. Demnach sind die meisten der an der Studie beteiligten Schulen im Zeitraum von 1950 bis 1985 entstanden. Median und Mittelwert von TVOC sind für Schulen bis zum Baujahr 1985 in etwa gleich. Ein leichter Anstieg ergibt sich für die Schulen der Baujahre nach 1985 mit den höchsten Werten für Schulen, die in den letzten zwei Jahren gebaut worden sind. Für Toluol erkennt man keine gravierenden Unterschiede. Es zeigt sich lediglich eine leicht steigende Tendenz in Abhängigkeit vom Baujahr. Auch die Werte für 2-Ethyl-1-Hexanol unterscheiden sich kaum. Der Medianwert liegt im Bereich der analytischen Bestimmungsgrenze. Limonen ist in Schulen relevant, die nach 1985 gebaut wurden, hier insbesondere in den letzten zwei Jahren. Die Spannweite der Einzelwerte ist erheblich. Vier Einzelwerte in der Größenordnung zwischen 285 und 320 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bewirken hier den deutlichen Unterschied zwischen Median und Mittelwert, was auch Einfluss auf den Unterschied zwischen Median und Mittelwert bei den TVOC hat. Drei der vier Räume sind mit Linoleum-Fußbodenoberbelag ausgestattet. Für Hexanal ist ein deutlicher Anstieg der Konzentrationen in Schulen erkennbar, die nach 1985 und insbesondere in den letzten zwei Jahren erbaut wurden. Auch für Formaldehyd sind keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Die geringsten Konzentrationen sind in den Schulen bis Baujahr 1950 zu verzeichnen, die höchsten mit Baujahr in den letzten zwei Jahren. Die Konzentration von D5 steigt in Abhängigkeit von den Baujahren nur leicht an.

Abb. 11: Konzentrationen von TVOC in Abhängigkeit vom Baujahr als Median und Mittelwert

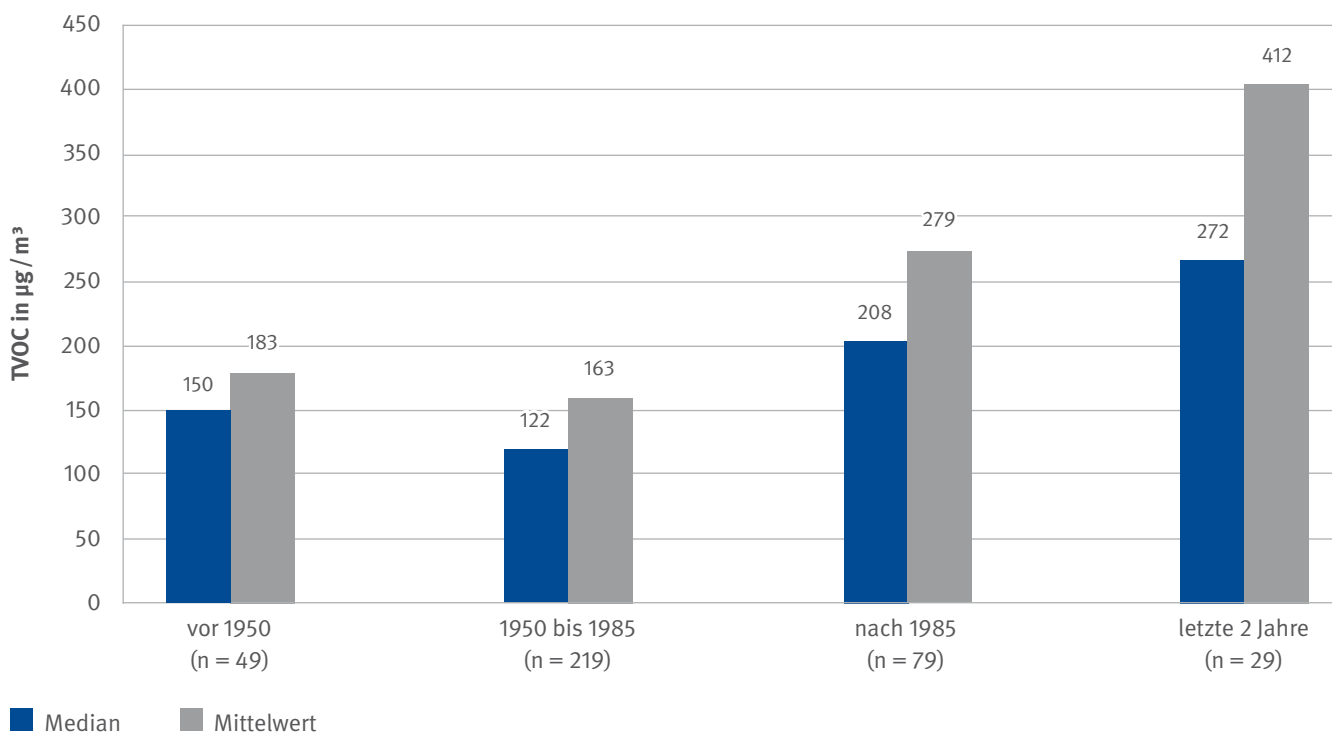
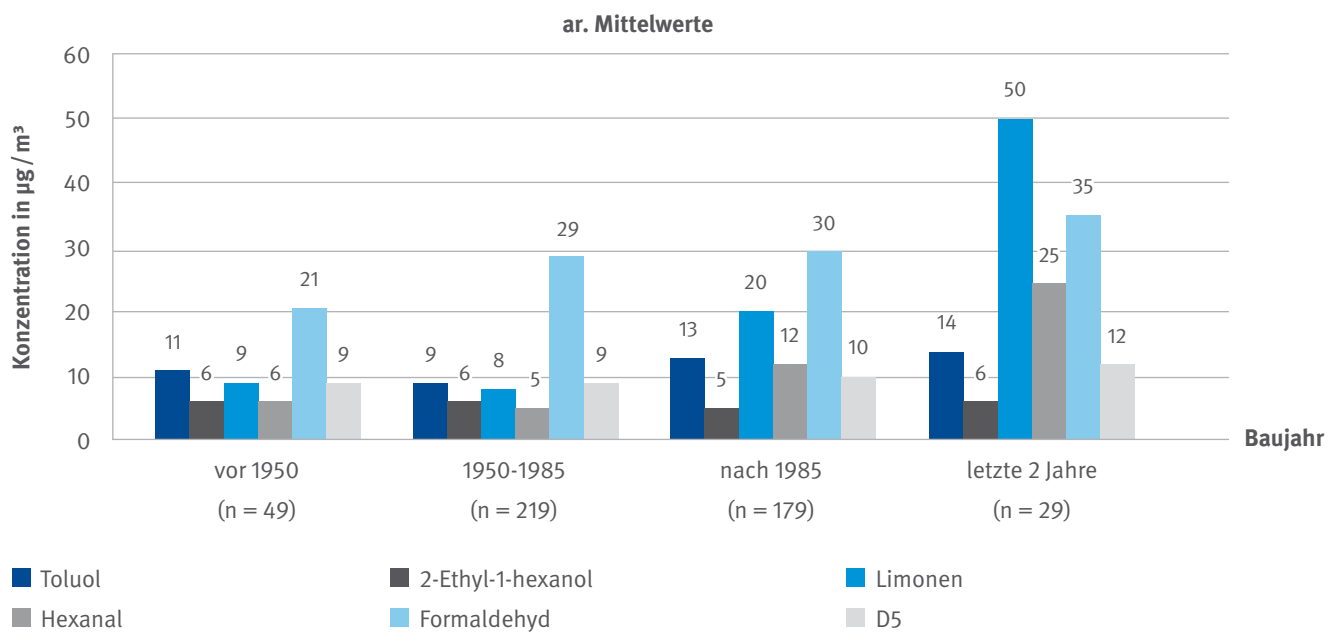
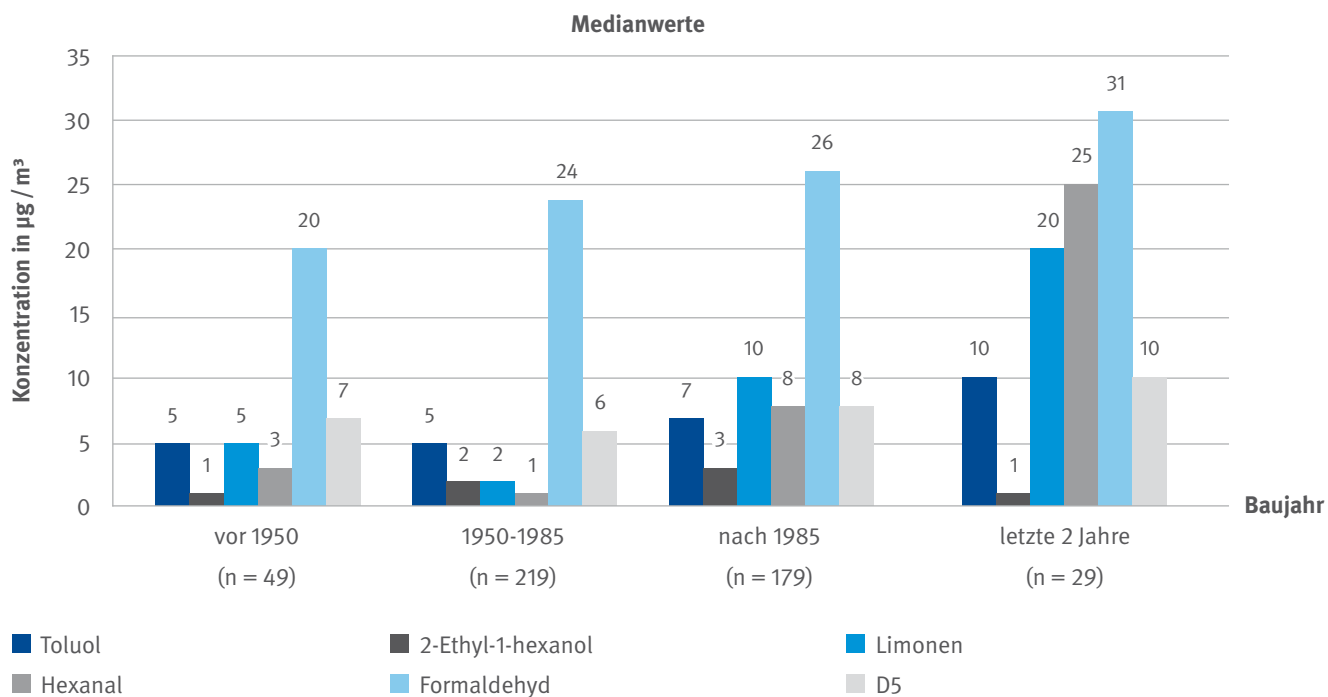
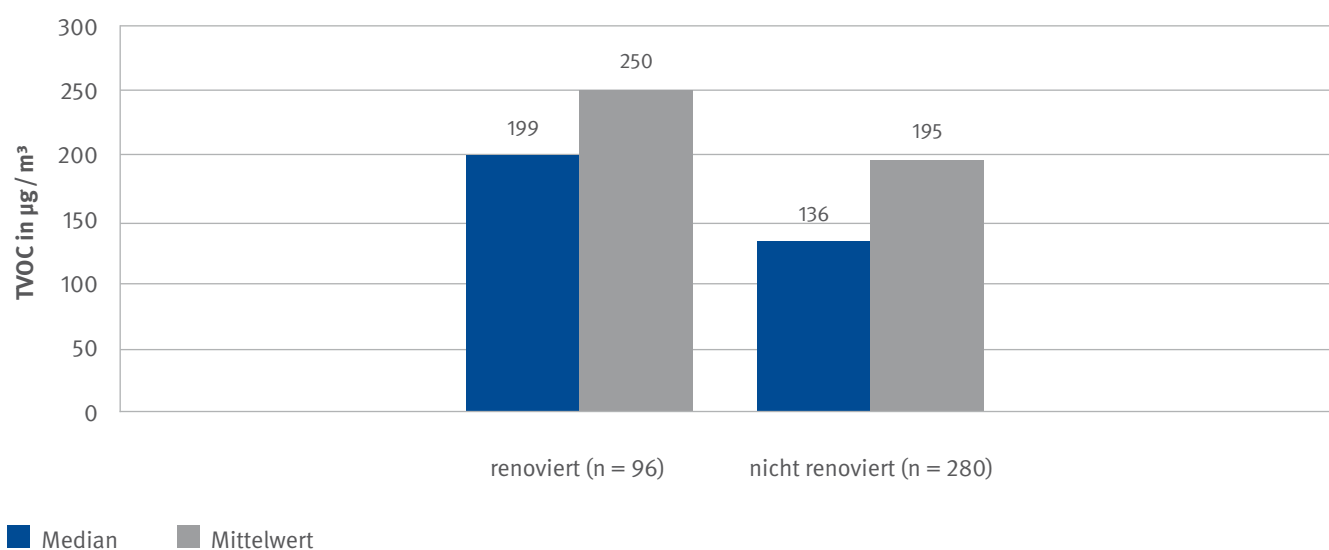


Abb. 12 und 13: Konzentrationen ausgewählter Einzelstoffe in Abhängigkeit vom Baujahr als Median und Mittelwert



Laut Abb. 14 sind 96 der an der Studie beteiligten Räume in den letzten zwei Jahren vor der Messung renoviert worden. Insgesamt ist die TVOC-Konzentration in renovierten Räumen deutlich höher als in nicht renovierten Räumen. Die Konzentrationsunterschiede für TVOC betragen $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Median und $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Mittelwert.

Abb. 14: TVOC-Konzentrationen in renovierten und nicht renovierten Räumen



Auch der Vergleich einzelner VOC zeigt bis auf α -Pinen eine leichte Erhöhung in renovierten Räumen im Vergleich zu nicht renovierten Räumen (Abb. 15). Vergleichbar sind dagegen die Median- und Mittelwerte von D5 in renovierten und nicht renovierten Räumen (Abb. 16). Die Konzentration von Formaldehyd ist in renovierten Räumen im Mittel leicht höher als in nicht renovierten Räumen (Abb. 17).

Abb. 15: Konzentration der nach 90-Perzentil sortierten höchsten VOC-Grundbelastungen in renovierten und nicht renovierten Räumen

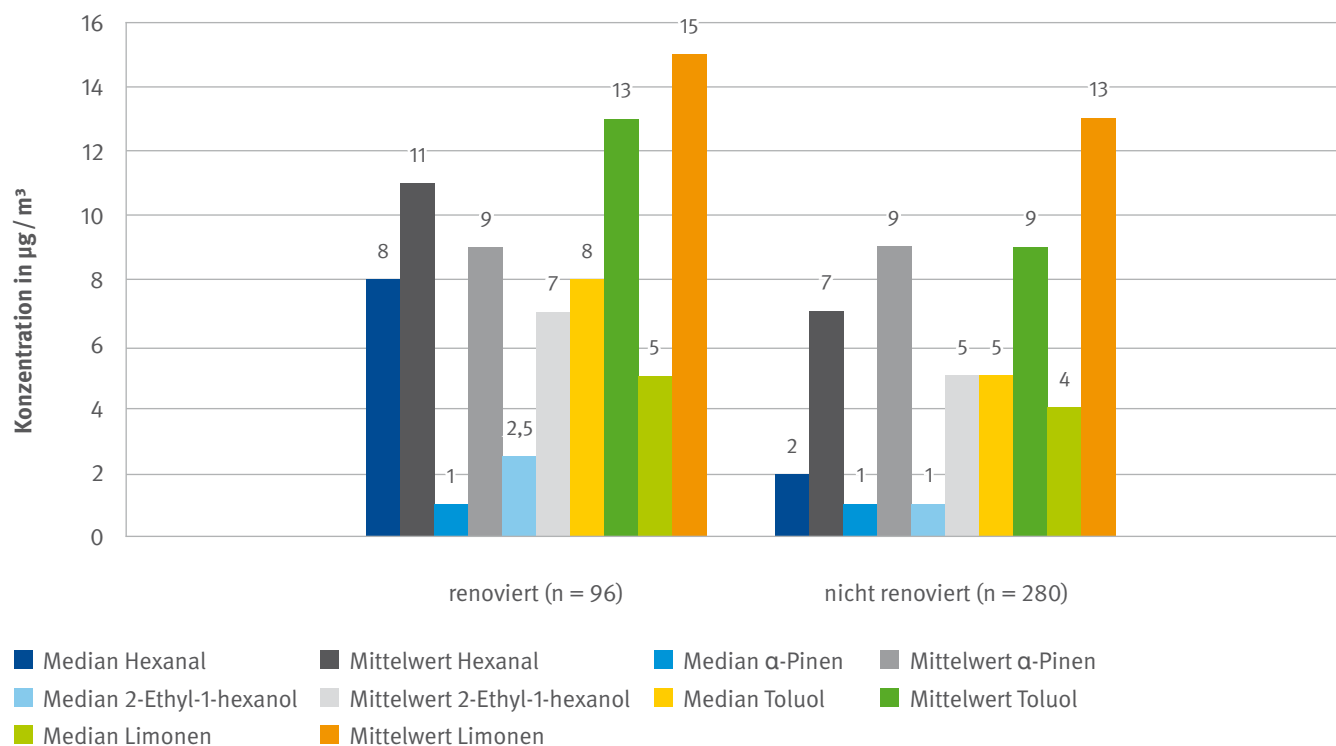
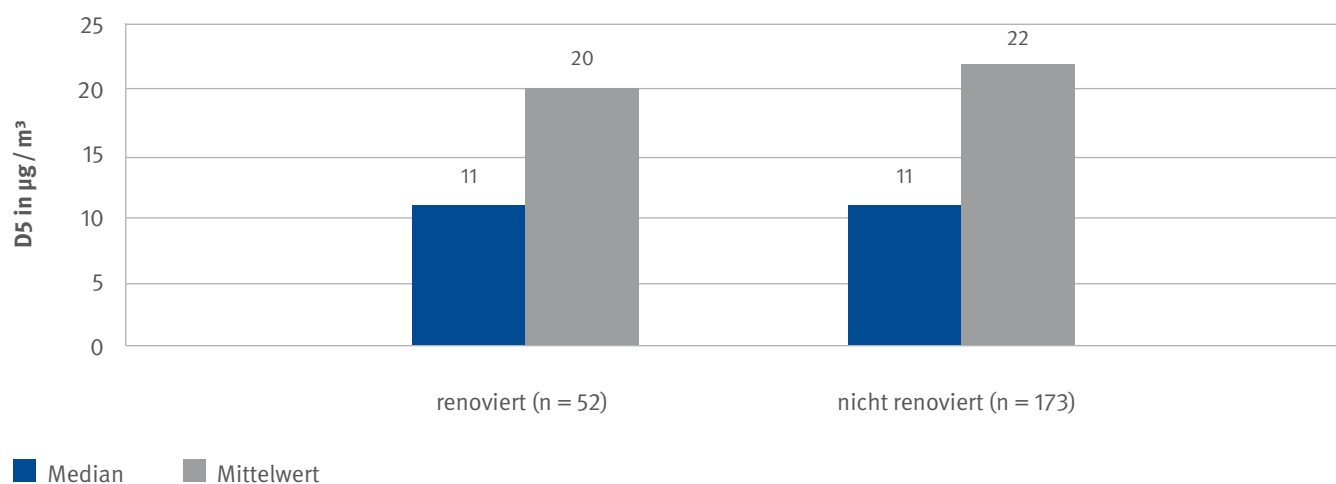


Abb. 16: Konzentration von D5 in renovierten und nicht renovierten Räumen



Unter Berücksichtigung der Bauweise können 332 Räume in Gebäuden mit massiver Bauweise und 41 Räume in Gebäuden mit Pavillon- oder Ständerbauweise verglichen werden (Abb. 18). Berücksichtigt sind hier die Werte von TVOC, Limonen und Formaldehyd. Die TVOC-Mittelwerte sind annähernd gleich bei etwas geringeren Medianwerten im Pavillon bzw. in Ständerbauweise. Die Werte für Limonen und Formaldehyd sind im Pavillon und in Ständerbauweise etwas höher im Vergleich zur massiven Bauweise, jedoch zeigen sich keine großen Unterschiede.

Abb. 17: Konzentration von Formaldehyd in renovierten und nicht renovierten Räumen

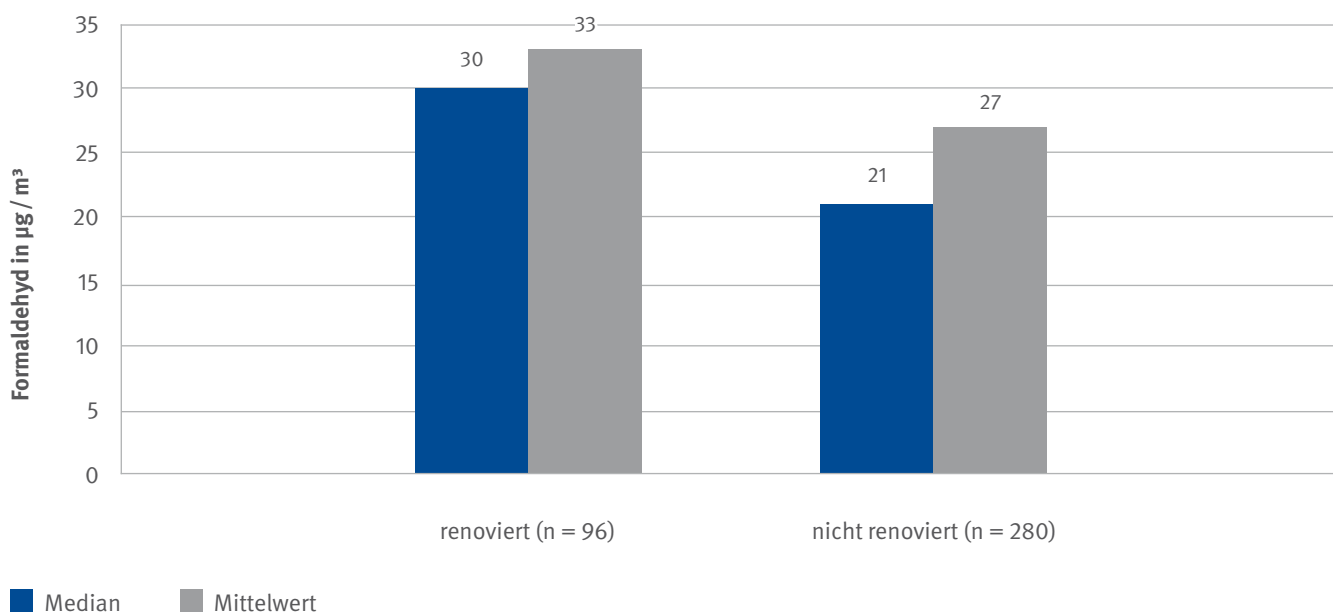


Abb. 18: Konzentration von TVOC, Limonen und Formaldehyd in Abhängigkeit von der Bauweise

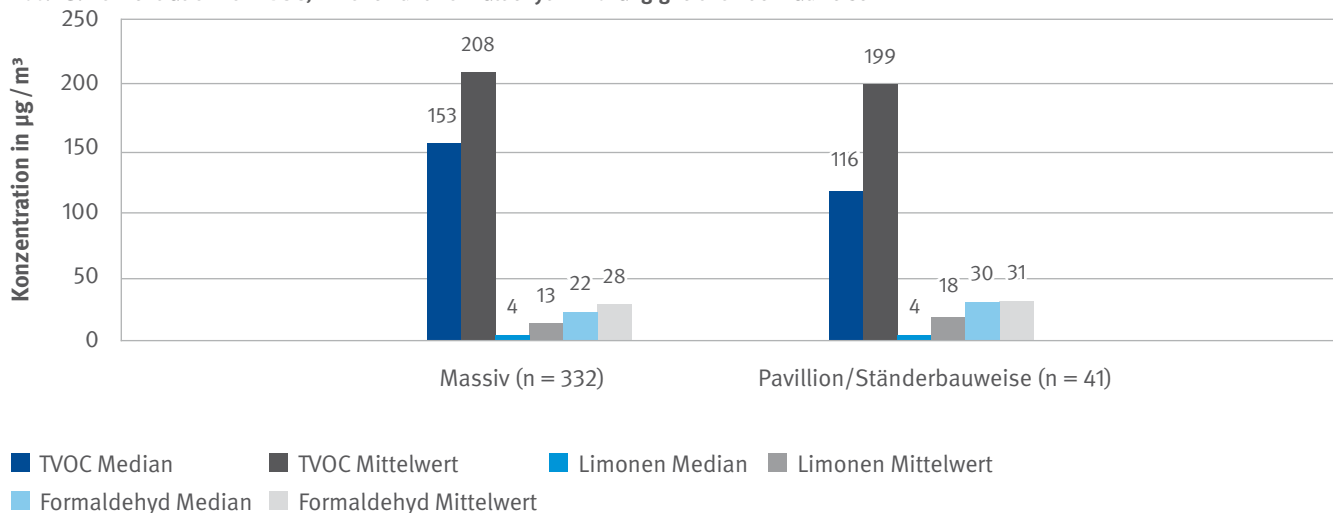
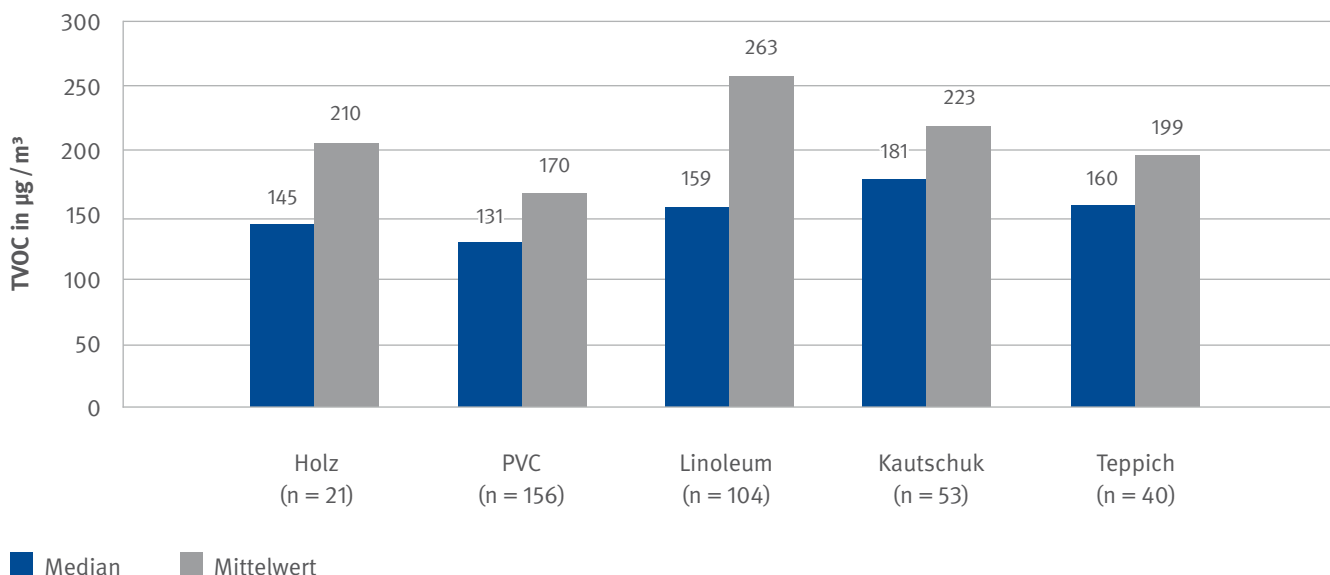


Abb. 19: Konzentrationen von TVOC in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag



Laut der Darstellung in Abb. 19 ist PVC der in den untersuchten Schulräumen am meisten verwendete Fußbodenbelag, gefolgt von Linoleum, Kautschuk, Teppich und Holz. Höchste TVOC-Mittelwerte ergeben sich bei Linoleum und im Median bei Kautschuk. Die geringsten TVOC-Konzentrationen sind bei PVC-Oberbelag zu verzeichnen. Dies gilt auch für die Einzelstoffkonzentrationen, die in etwa gleichauf mit Holzfußböden liegen (Abb. 20 und 21). Die Abweichungen der Medianwerte von den Mittelwerten bei Linoleumböden verdeutlichen jedoch, dass, wie bereits beschrieben, bei diesem Fußbodenoberbelag in Einzelfällen höhere Messwerte ermittelt wurden (Abb. 20 und 21). Der im Vergleich zum Medianwert hohe arithmetische Mittelwert bei Kautschukböden für Benzaldehyd ist wohl einer fehlerhaften Verlegung des Belags in einem Klassenraum geschuldet.

Die Konzentrationen von Formaldehyd unterscheiden sich in den Räumen unter dem Aspekt des Fußbodenbelags nur unwesentlich. Die vergleichsweise niedrigeren Werte bei Holzfußböden 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 (Abb. 22). Für Acetaldehyd war bei allen Fußbodenbelägen kein arithmetischer Mittelwert bestimmbar. Die Medianwerte für Linoleumböden ($n = 104$) und Kautschukböden ($n = 53$) in Höhe von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden jeweils durch die halbe analytische Nachweisgrenze bestimmt. Die Maximalwerte betrugen $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Bereich bzw. leicht über dem 95-Perzentilwert dieser Studie.

Abb. 20 und 21: Konzentrationen von ausgewählten VOC in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag

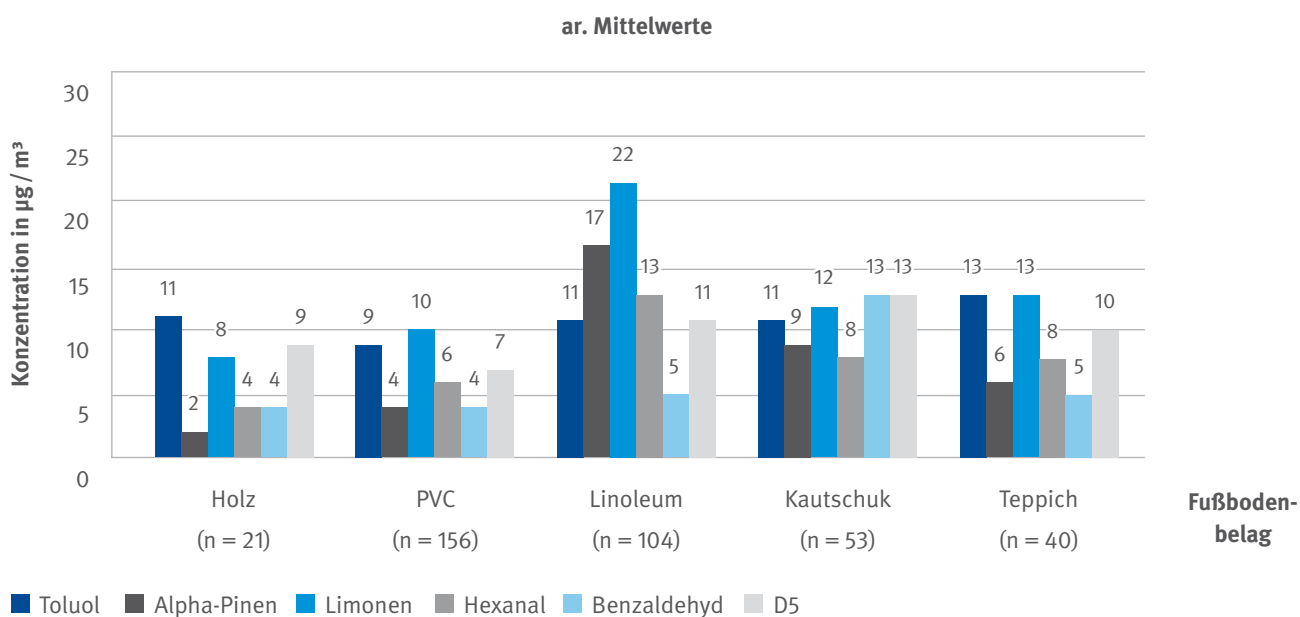
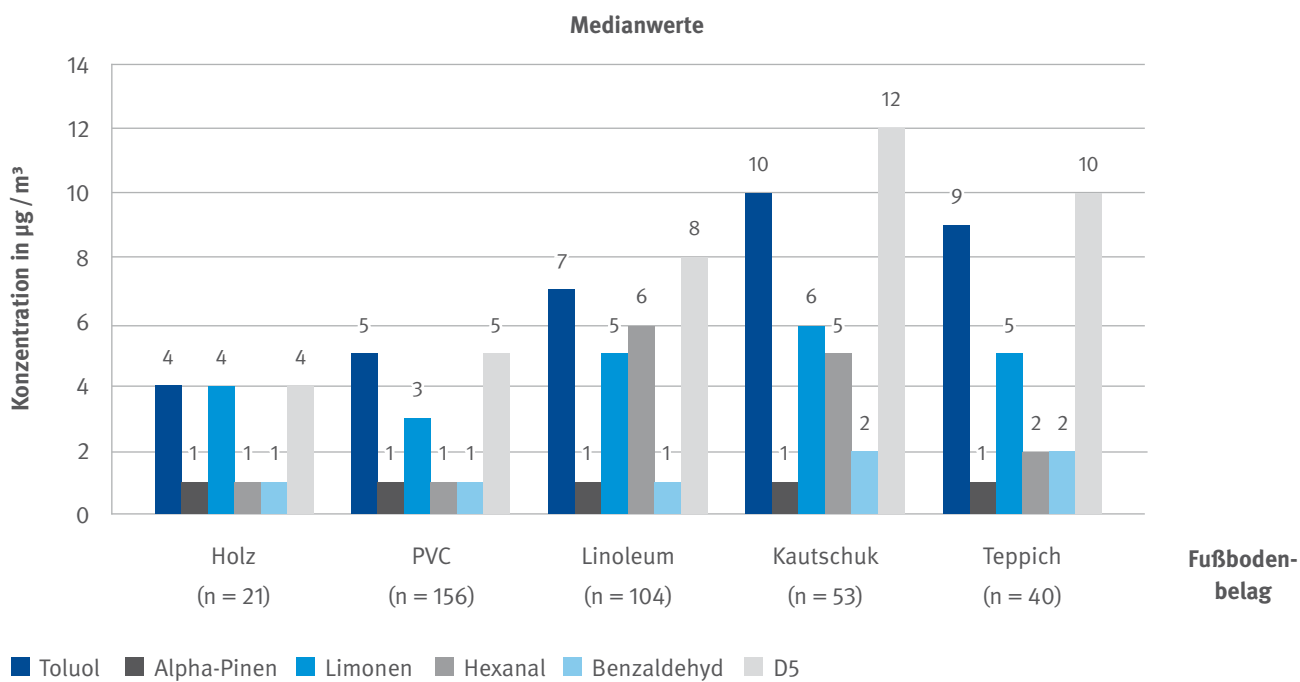
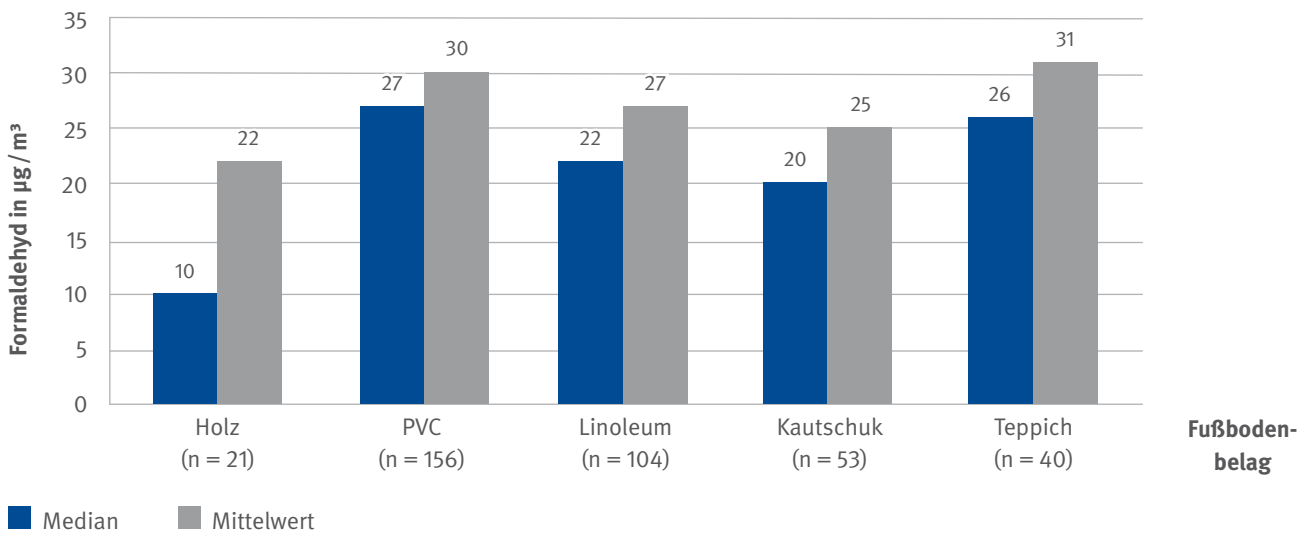
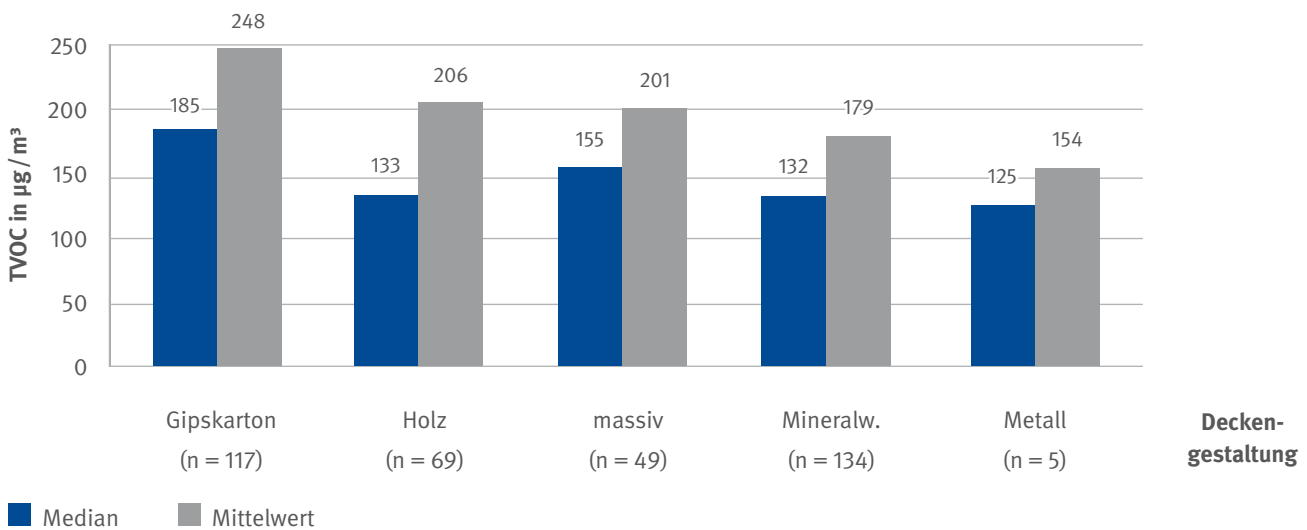


Abb. 22: Konzentrationen von Formaldehyd in Abhängigkeit vom Fußbodenbelag



Akustikdecken mit Mineralwollplatten oder Mineralwollhinterlegung sind in den Klassenräumen am häufigsten anzutreffen, gefolgt von Decken mit Gipskartonverkleidung (Abb. 23). 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 die Metalldecken in der Regel mit Mineralwolle hinterlegt sind, sind sie den Akustikdecken zuzuordnen.

Abb. 23: TVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Deckengestaltung



Diese Mineralwollplatten weisen ebenfalls deutlich niedrigere TVOC-Werte auf als die Gipskartondecken. Die höchsten Limonenkonzentrationen sind in Räumen mit Holzdecken zu verzeichnen (Abb. 24 und 25). Hier ist im Mittel auch die Formaldehydkonzentration am höchsten (Abb. 26). Ansonsten sind die Einzelstoffkonzentrationen hinsichtlich der Deckengestaltung in etwa vergleichbar.

Abb. 24 und 25: Konzentrationen ausgewählter VOC in Abhängigkeit von der Deckengestaltung

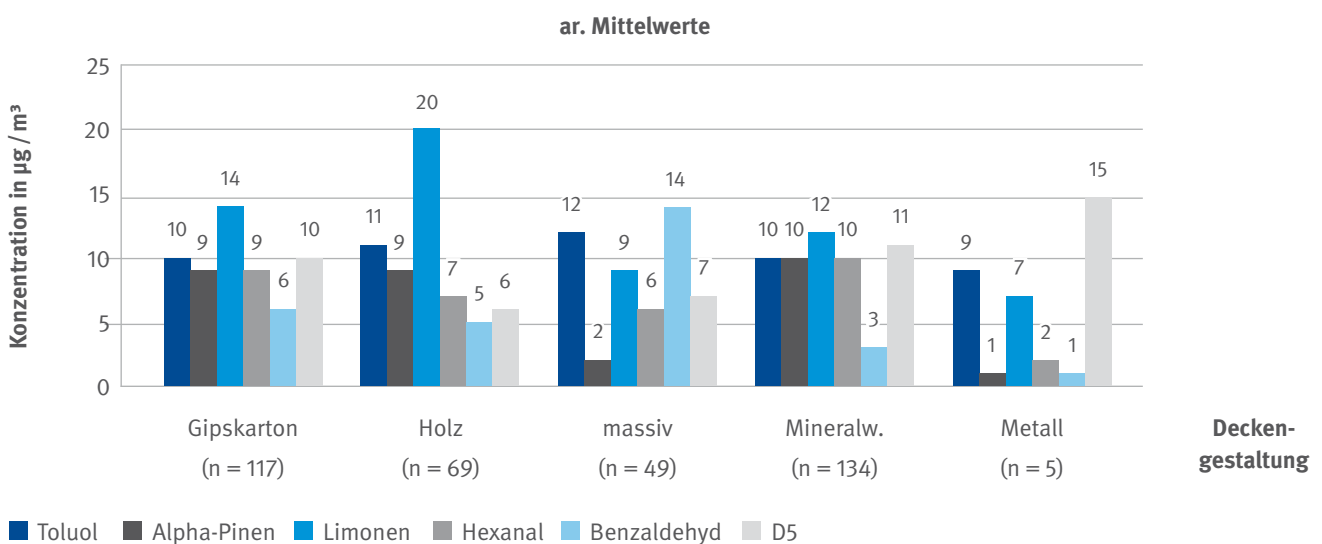
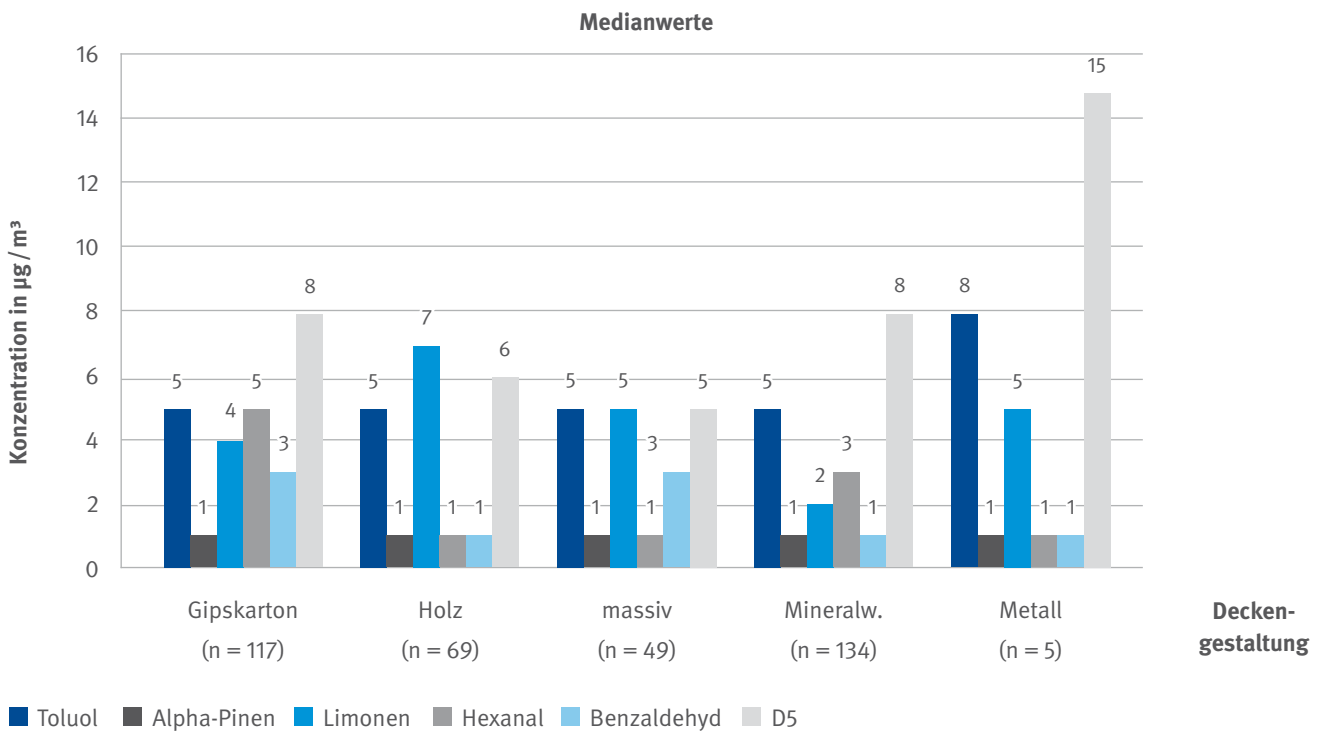
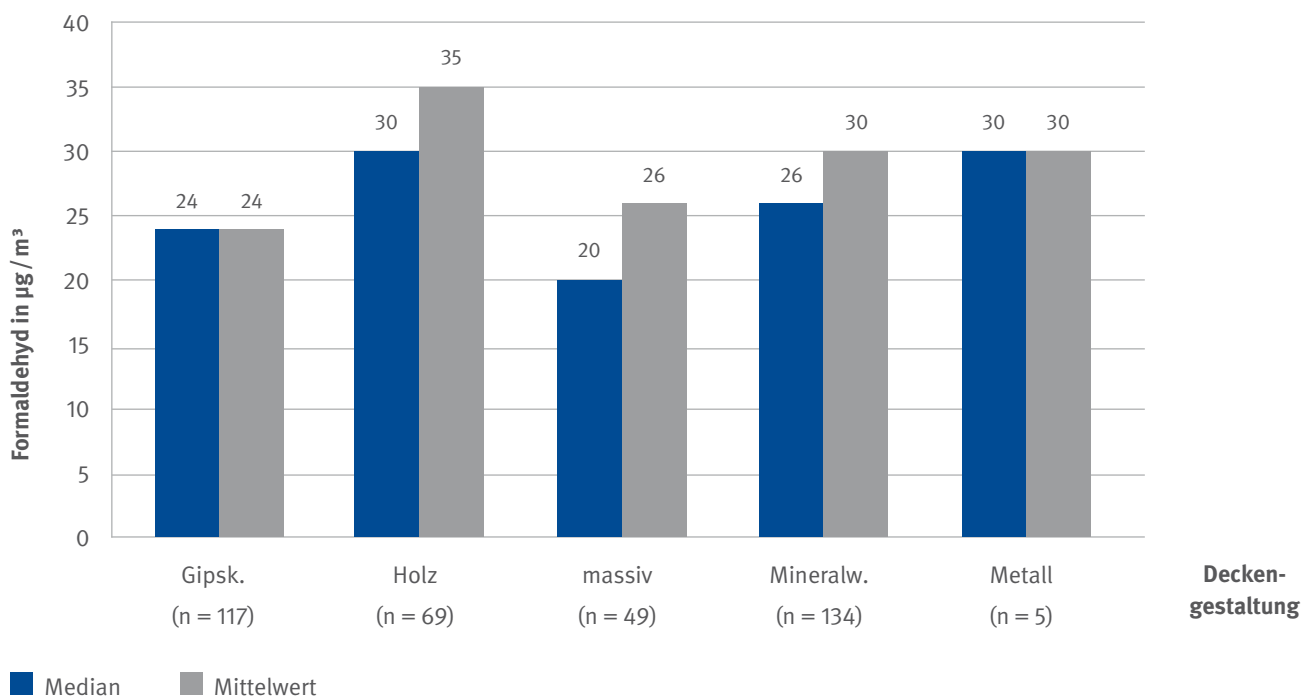


Abb. 26: Konzentration von Formaldehyd in Abhängigkeit von der Deckengestaltung



4 Diskussion

Wie der Ergebnisteil zeigt, sind die Perzentilwerte der untersuchten Einzelkomponenten annähernd vergleichbar. Es ist jedoch festzustellen, dass mit dem Verfahren 2 in der Regel höhere Werte ermittelt wurden. Die Unterschiede bewegen sich jedoch zumeist in einem Bereich von unter 50 Prozent. Wie die Ergebnisse von Ringversuchen zeigen, sind im vorliegenden Bereich der Spurenanalytik Abweichungen von 50 Prozent jedoch nicht ungewöhnlich [13, 14].

Die Zahl der in leicht erhöhter Konzentration nachgewiesenen Stoffe ist insgesamt überschaubar. Für deren Auftreten sind folgende Quellen maßgeblich:

Die ermittelten Alkane wie n-Heptan und n-Undecan kommen als Lösungsmittel in Farben, Lacken und anderen Beschichtungsmitteln sowie in Bodenpflegemitteln vor und sind Nebenbestandteile von Wasserlacken [16, 17].

Bei den Aromaten wurde insbesondere Toluol in höherer Zahl und höherer Konzentration nachgewiesen. Darüber hinaus sind noch Xylole und Styrol zu erwähnen. Toluol ist ebenfalls ein Lösungsmittel in Farben, Lacken, Klebstoffen, Möbelpflegemitteln und kommt ferner in Gummi vor [16, 18].

Die Glykolethether und -ester wie 2-Butoxyethanol und 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol werden als Verdünnungsmittel in Farben bzw. in Mitteln der Oberflächenreinigung verwendet. 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol und 2-Butoxyethanol kommen ferner bei der Herstellung von Weichmachern zum Einsatz, letztere Substanz ist ferner ein Fixativ für Parfüms [16].

Auch die nachgewiesenen Alkohole Butan-1-ol und 2-Ethylhexan-1-ol sind Lösungsmittel in Lacken, Farben und Gummi. Letzterer Alkohol ist ferner ein Dispergiermittel für Pigmente und Weichmacher [16].

Bei den Terpenen ist insbesondere Limonen auffällig. Es kommt in Lacken und Lasuren, in Reinigungs- und Pflegemitteln sowie als Duftstoff im Kosmetikbereich vor. Ferner ist es in Alkydharzlacken und Bohnerwachsen enthalten. Das Racemat (Dipenten) kommt unter anderem auch in Ölen von Nadelhölzern vor [16, 19]. Das seltener und in geringerer Konzentration nachgewiesene α -Pinen ist unter anderem ein flüchtiger Bestandteil des Harzöls von Nadelhölzern wie Fichte und Tanne. Es ist ferner Bestandteil von Bio-lacken und terpenhaltigen Klebern sowie Hauptkomponente von Terpentinöl. Ferner wird es als Lösungsmittel in Oberflächenbehandlungs- und Reinigungsmitteln sowie in Klebern verwendet und ist auch ein Duftzusatz in Kosmetika [16, 20].

Die Siloxane D3 bis D6 sind in zahlreichen Produkten des täglichen Lebens wie Haar- und Körperpflegemitteln, Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmitteln enthalten. Ferner sind sie Bestandteil von Fugendichtungsmassen, Farben und Lacken sowie auch von Textilien. Insbesondere D5 ist in vielen Haushaltsprodukten und insbesondere in Körperpflegemitteln enthalten [16, 21].

Quellen von Aldehyden sind Linoleum, Alkydharzlacke, Leinölfirnis und andere trocknende Öle sowie Bodenbeläge aus PVC. Sie sind auch in Parfüms enthalten. Hexanal ist in natürlichem Holz und Alkydharzprodukten enthalten und tritt ferner durch Fettsäureaufbau in Harzen und Ölen auf. Daher ist es insbesondere in Linoleumbelägen und in Naturölprodukten (vor allem auf Leinölbasis) und Klebern enthalten. Formaldehyd ist ein Hilfsmittel zum Beispiel in der Textil-, Leder und Holzindustrie. Es wird über-

wiegend zur Herstellung von Harnstoffharzen (Klebstoffe in Spanplatten), Phenolen und Melamin verwendet. Wasserfreier, reiner Formaldehyd dient ferner bei der Herstellung thermoplastischer Kunststoffe [16].

In Tabelle 5 sind die 95-Perzentilwerte der TVOC und ausgewählter Einzelstoffe der einzelnen Studien sowie die 90-Perzentilwerte (Auffälligkeitswerte) aus dem Datenpool der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) [22, 23] und die Richtwerte I des Umweltbundesamtes (UBA) [24], soweit vorhanden, gegenübergestellt.

Der Richtwert I (RW I – Vorsorgerichtwert) des Umweltbundesamtes beschreibt die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, 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 [24].

Die Werte der AGÖF [22] beruhen auf einem umfangreichen Datenpool von Messwerten aus den Jahren 2002 bis 2006. Die Daten stammen aus anlassbezogenen Messungen aus unterschiedlichen Bereichen, sodass auch erhöhte Werte in der Statistik enthalten sein werden.

Ein unmittelbarer Vergleichswert für Klassenräume kann somit daraus nicht abgeleitet werden. Messverfahren, Analytik und Verfahren bei der Datenauswertung sind jedoch weitgehend mit den hier angewandten vergleichbar.

In Bayern wurden im Winter der Jahre 2004 und 2005 90 Klassenräume und davon im Sommer 2005 nochmals 76 Klassenräume auf ihre VOC-Gehalte überprüft. Die Probenahme erfolgte während der Unterrichtszeit [25]. In Berlin wurden im Winter der Jahre 2002 und 2003 39 Schulen [26] sowie in Schleswig-Holstein in den Jahren 2005 bis 2007 209 Schul- und 76 Kindergartenräume in 105 Gebäuden untersucht [27]. Da die Kindergartenräume häufiger als in Schulen mit Holzelementen ausgestattet sind, seien dort auch etwas unterschiedliche VOC-Profile und -Konzentrationen zu erwarten. Eine Differenzierung der Räumlichkeiten erfolgt jedoch nicht.

Im Rahmen des Kinder-Umwelt-Survey (KUS) des Umweltbundesamtes [28] wurden im Zeitraum von 2003 bis 2006 die Schadstoffbelastungen der 3- bis 14-jährigen Kinder in Deutschland auf repräsentativer Basis erfasst. Die Untersuchung erfolgte in 150 Orten, wobei 555 VOC- und 586- Aldehydproben gewonnen werden konnten. Die Probenahme fand in dem Raum statt, in dem sich das Kind im Allgemeinen während der 24 Stunden eines Tages am längsten aufhält. Zu rund 95 Prozent war dies das Kinderzimmer.

Die Messverfahren für VOC und Aldehyde der Studie aus Bayern [25] sind mit dieser Studie vergleichbar. Auch die Probenahmebedingungen entsprechen sich weitgehend. Der Probenahmeort befand sich auch an der hinteren Wand, jedoch näher zur Wand und zum Fußboden. In Schleswig-Holstein erfolgte die Probenahme aktiv durch Adsorption an Aktivkohle (Probenahmeröhrchen Typ NIOSH) bei einer Probenahmezeit von 300 Minuten. Die Luftprobe sollte etwa in Raummitte in 1 bis 1,5 m Höhe entnommen werden.

Die Probenahme im Rahmen des KUS erfolgte mit drei Passivsammlertypen (Perkin Elmer Tenax-Röhrchen, 3M OVM-3500 und SKC UMEx-100), die über eine Woche eingesetzt wurden. Damit konnten Wochenmittelwerte unter realen Bedingungen der Raumnutzung bestimmt werden. Die chemischen Analysen erfolgten mittels Gaschromatographie (Detektion der VOC mittels FID oder Massenspektrometer) und HPLC (Detektion der umgesetzten Aldehyd-Hydrazone mittels Diodenarray-Detektor). Die Bestimmungsgrenze für die VOC betrug $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Trotz der Einschränkung unterschiedlicher Probenahmebedingungen und analytischer Vorgehensweise sowie eines nicht identischem Substanzspektrums können die Studien miteinander verglichen werden (Tabelle 5).

Die 95-Perzentilwerte für TVOC der Ergebnisse aus Bayern im Sommer wie im Winter liegen in etwa in der Mitte der hier verglichenen Verfahren 1 und Verfahren 2, die Werte aus Schleswig Holstein und die des KUS liegen darüber. Hier werden auch der TVOC-Leitwert des Umweltbundesamtes [29] leicht überschritten. Der Auffälligkeitswert der AGÖF wird jedoch in allen Studien bei weitem nicht erreicht.

Tab. 5: Vergleich von 95-Perzentilwerten ausgewählter VOC und Aldehyde aus verschiedenen Studien sowie 90-Perzentilwerten (Auffälligkeitswerte) der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) und dem Richtwert I (RW I) des Umweltbundesamtes (UBA) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (* Richtwert des ehemaligen Bundesgesundheitsamtes (BGA), **gesättigte azyklische aliphatische C_4 - C_{11} -Aldehyde)

VOC und Aldehyde	UK NRW Verfahren 1 2003-2009 n = 381	UK NRW Verfahren 2 2003-2009 n = 349	Bayern [25]		Berlin [26] 2002-2003 n = 39	Schleswig-Holstein [27] 2005-2007 n = 285	KUS UBA [28] 2003-2006 n = 555	AGÖF [22] 2007	RW I UBA
			Winter 2004 n = 90	Sommer 2005 n = 75					
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	-
a-Pinen	45	33	10	8,7	14,8	71	67,6	93,0	200
Limonen	45	34	36,9	14,0	153	51	103	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 **
Formaldehyd	-	70	31,0	31,0	36,4	-	47,4	84,5	120 *
Acetaldehyd	-	60	17,1	27,0	15,0	-	50,3	72,2	-
Benzaldehyd	24	-	-	4,7	5,7	9	6,6	10	20

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 ermittelten, in Schleswig-Holstein ist der Wert etwa halb so hoch. Die Winterwerte in Bayern und der Wert des KUS sind allerdings mit den hier ermittelten annähernd vergleichbar. Der jeweilige Richtwert I des UBA ist in allen Studien zumeist 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 Prozent als 90-Perzentilwert und 39 Prozent als 95-Perzentilwert gesunken ist [15].

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 [27]. Die Veränderung lässt sich durch einen Vergleich der Ergebnisse mit Ihrer Referenzwertstudie aus den Jahren von 1990 bis 1993 belegen [30].

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 [27] sowie im Rahmen des KUS in Räumen mit Vollholzmöbeln [28]. Eine vergleichbare Tendenz zeigt sich in dieser Studie in Räumen mit Holzdecken.

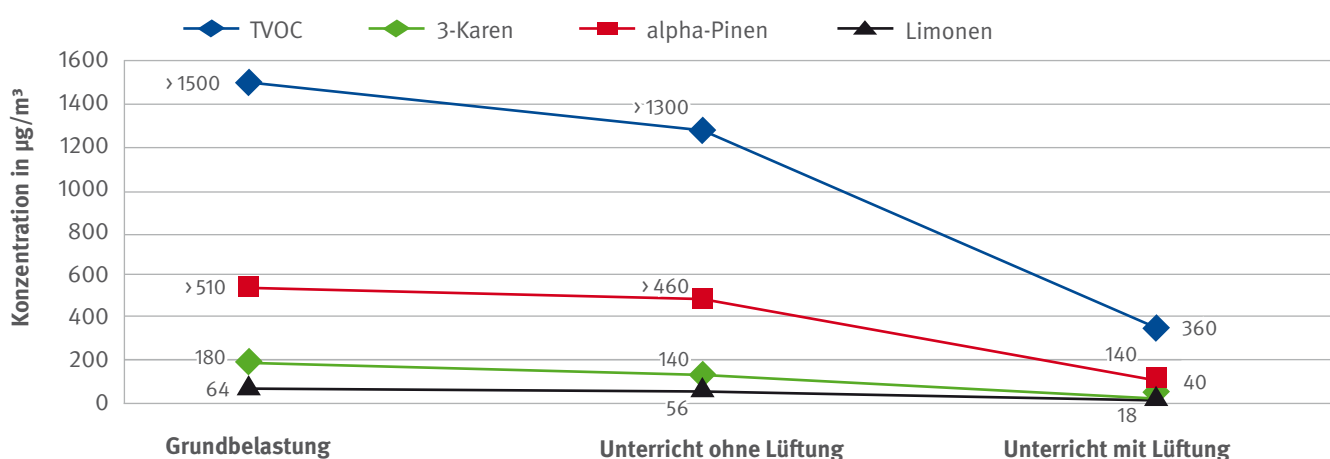
In Bayern ist die D5-Konzentration vergleichsweise hoch [25]. Hierbei ist allerdings festzuhalten, dass die Messungen bei Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern erfolgten, wobei nicht angegeben ist, wie lange sich die Schülerinnen und Schüler bereits in der Klasse aufhielten. In der hier dargestellten Studie erfolgten die Messungen nur während 20 Minuten nach Eintreten der Schülerinnen und Schüler.

Die 95-Perzentilwerte der Aldehyde dieser Studie sind sämtlich höher als die der anderen Studien. Bis auf Benzaldehyd werden die Auffälligkeitswerte der AGÖF und die Richtwerte I des UBA jedoch nicht erreicht. Unter dem Aspekt des Vergleichs der Einzelstoffe mit größeren Abweichungen zwischen den hier beschriebenen Verfahren 1 und 2 ist anzumerken, dass im KUS und in Schleswig-Holstein die 95-Perzentilwerte für Butan-1-ol dem Wert des hier angewendeten Verfahrens 1 nahekommt, der des Verfahrens 2 eher dem Auffälligkeitswert der AGÖF. Für 2-Phenoxyethanol liegen die entsprechenden Werte aller Schulstudien über dem des KUS und der AGÖF. Die Werte aus Bayern entsprechen dabei dem des Verfahrens 2, die aus Schleswig-Holstein und des KUS eher dem des Verfahrens 1. Die Werte für Ethylacetat liegen dagegen deutlich unter denen des KUS und der AGÖF. Insgesamt ist also auch beim Vergleich der Werte der einzelnen Studien eine deutliche Streuung zu beobachten.

Ferner ist festzustellen, dass die Werte der hier mit beiden Verfahren ermittelten Einzelkomponenten dieser Studie deutlich unter den Richtwerten des Umweltbundesamtes liegen und auch unter den empfohlenen Orientierungswerten für flüchtige organische Verbindungen der Raumlufthilf der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF). Bei fehlerhaften Bauausführungen sind deutliche Abweichungen von diesen Werten zu erwarten, wie das Beispiel für eine fehlerhafte Verlegung eines Fußbodens in Abb. 27 zeigt [31].

Auch der in Deutschland gültige Innenraumrichtwert für Formaldehyd in Höhe von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [32] sowie der Empfehlungswert der WHO in Höhe von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [33] werden ebenfalls nicht tangiert.

Abb. 27: Raumlufthilfkonzentrationen bei fehlerhafter Verlegung eines Fußbodens



Bei Betrachtung der Einzelfaktoren sind folgende Feststellungen zu treffen: Durch die Anwesenheit der Schülerinnen und Schüler ergibt sich ein Anstieg der VOC, der bei D5 als 90-Perzentil $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Limonen $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ beträgt. Der Anstieg ist durch das Vorkommen der Substanz in Textilien, Körperpflegemitteln und Parfüms zu begründen.

Ein Anstieg von TVOC ergibt sich auch durch den Eintrag von Straßenkleidung wie Mäntel und Jacken in die Klassenräume. Eine Hauptkomponente ist hierbei D5. Als Bestandteil von Textilien, Wasch- und Reinigungsmitteln ist dieser Anstieg allerdings plausibel. Unter dem Aspekt der Minimierung von VOC-Konzentrationen in Klassenräumen ist die Aufbewahrung von Straßenkleidung in Klassenräumen somit nicht zu empfehlen.

Der Eintrag von VOC in die Klassenräume ist im Median in den Jahrgangstufen zehn und elf am höchsten. In einem Einzelfall wurde in der Jahrgangsstufe 13 eine sehr hohe Differenz ermittelt, die insbesondere durch einen hohen D5-Anstieg verursacht wurde. Der Klassenraum war relativ klein bei einer recht hohen Schülerzahl. Neben dem Eintrag durch Körperpflegemittel und Parfüms kommt hier auch die Aufbewahrung von Mänteln und Jacken im Raum zum Tragen.

Unter Betrachtung der Schularten weisen die Grund- und Sonderschulen die höchsten Summenwerte für VOC in der Grundbelastung auf. Grund- und Sonderschulen unterscheiden sich von den anderen Schularten dadurch, dass hier 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 tendentiell einen leichten Anstieg unter Berücksichtigung der Baujahre. Analog zu den Baujahren zeigt sich, dass auch die VOC Konzentrationen in renovierten Räumen höher ist als in nicht renovierten. Auch im Rahmen des KUS 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 zeigen Räume mit Linoleum- und Kautschukbelag die höchsten TVOC-Werte als Median und Mittelwert. 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 Formaldehyd-Konzentration ist gleichmäßig verteilt über alle Fußbodenarten, mit den geringsten Werten bei Holz. Hierbei handelt es sich überwiegend um Massiv-Holzböden in Gebäuden älterer Baujahre, bei denen keinen nennenswerten Formaldehydemissionen mehr zu erwarten sind. Empfehlungen für die Fußbodengestaltung lassen sich aufgrund der geringen Konzentrationsunterschiede daraus jedoch nicht ableiten.

In Schleswig-Holstein 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 [27]. Im KUS waren in Räumen mit Linoleumböden die mittleren Gehalte an Acetaldehyd signifikant höher [28], 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 haben die Limonen- und Formaldehydkonzentrationen die höchsten Werte. 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.

Abschließend ist festzustellen, dass durch geeignete Lüftungsmaßnahmen die VOC-Konzentrationen in Klassenräumen deutlich gesenkt werden können. Unter dem Aspekt der Ableitung und Anwendung von Referenzwerten ist die Einhaltung des zugehörigen Messverfahrens und der Messstrategie eine wesentliche Voraussetzung. Desweiteren ist die Vergleichbarkeit des betrachteten Innenraums mit den Referenzräumen in Bezug auf die Ausstattung und die Nutzung zu beachten.

5 Zusammenfassung

Um einen Überblick über die Normalbelastung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und Aldehydbelastungen in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in Nordrhein-Westfalen in 381 nicht verdächtigen Klassenräumen von 111 Schulen Raumluftkonzentrationsmessungen mittels Anreicherung an TENAX bzw. DNPH 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. Der Vergleich der Ergebnisse aus beiden Auswerteverfahren ergab, dass der Summenwert der VOC (TVOC) und die Konzentration einiger Einzelstoffe unterschiedlich sind. Die Unterschiede bewegen sich jedoch zumeist in einem Bereich von unter 50 Prozent. Dieses liegt im vorliegenden Bereich der Spurenanalytik jedoch innerhalb der Spannweite der Ergebnisse von Ringversuchen.

Insgesamt liegen nur wenige der rund 140 untersuchten VOC und Aldehyde oberhalb der analytischen Bestimmungsgrenze. Die ermittelten Mittel-, Median- und Perzentilwerte sind dabei weitgehend mit den Ergebnissen aus anderen Studien und Auffälligkeitswerten der AGÖF vergleichbar. Auch die vorhandenen Richtwerte I des Umweltbundesamtes 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 Lebens wie Haar- und Körperpflegemitteln, Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmittel sowie Textilien. D5 wird daher 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 in Klassenräumen. Nach Lüftungsmaßnahmen sind die VOC-Konzentrationen 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 errichtet wurden. Höchste Werte waren hier für Klassenräume mit Baujahren in den letzten zwei Jahren zu nennen. Höhere VOC-Werte wurden auch in Räumen ermittelt, 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 hatten 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 in dieser Studie dagegen leicht erhöht.

Abschließend ist festzustellen, dass unter dem Aspekt der Ableitung und Anwendung von Referenzwerten zur Beurteilung von VOC-Belastungen in Räumen die Einhaltung des zugehörigen Messverfahrens und der Messstrategie eine wesentliche Voraussetzung ist. Weiterhin ist die Vergleichbarkeit betrachteten Innenraums mit den Referenzräumen in Bezug auf die Ausstattung und Nutzung zu beachten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 900: Arbeitsplatzgrenzwerte (1/20063). BArBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBL. (2011) Nr. 10, S. 193-194
- [2] Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV). BGBl. (2004) Nr. 4, S. 2179-2189; zul. geänd. BGBl. I (2010) Nr. 38, S. 960-967
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Weber, M.; von Hahn, N.; Kopisch, D.; Breuer, D.; Hahn, J.-U.; Vorschläge zur Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 72 (2012) Nr. 7/8 – , S. 291-298
- [6] VDI 4300 Blatt 1: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Meßstrategie. Berlin: Beuth 1995
- [7] VDI 4300 Blatt 6: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC), (zurückgezogen 2008-09). Berlin, Beuth 2000
- [8] DIN EN ISO 16000 -5: Innenraumluftverunreinigungen- Probenahme-strategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Berlin, Beuth 2007
- [9] Breuer, D.; Friedrich, C.; Moritz, A.: VOC (Volatile Organic Compounds), flüchtige organische Verbindungen (Kennzahl 8936). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffe. 45. Lfg. X/10. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989
- [10] H. Assenmacher-Maiworm, J.-U. Hahn: Aldehyde (Kennzahl 6045). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffe. 39. Lfg. XI/07: Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/6045
- [11] 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 2004
- [12] DIN EN 1076: Exposition am Arbeitsplatz – Messung von Gasen und Dämpfen mit pumpenbetriebenen Probenahmegeräten – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin, Beuth 2010
- [13] IFA Ringversuch 2011: www.dguv.de/ifa/de/fac/ring/pdf/ergebnisse/2011_VOC11_d.pdf
- [14] IFA Ringversuch 2012: www.dguv.de/ifa/de/fac/ring/pdf/ergebnisse/2012_VOC_d.pdf
- [15] von Hahn, N.; van Gelder, R.; Breuer, D.; Hahn, J.-U.; Gabriel, S.; Kleine, H.: Ableitung von Innenraumarbeitsplatz-Referenzwerten. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 71 (2011) Nr. 7/8 – Juli August, S. 314-322
- [16] Report: Innenraumarbeitsplätze – Vorgehensempfehlung für die Ermittlungen zum Arbeitsumfeld. Hrsg.: DGUV, Berlin (2013), in Vorbereitung
- [17] Sagunski, H.; Mangelsdorf, I.: Richtwerte für die Innenraumluft: Aromatenarme Kohlenwasserstoffgemische (C9 – C14). Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 48 (2005) Nr. 7, S. 803-812
- [18] Sagunski, H.: Richtwerte für die Innenraumluft: Toluol. Bundesgesundheitsbl (1996) Nr. 11, S. 416-421
- [19] Richtwerte für monocyclische Monoterpene (Leitsubstanz d-Limonen) in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 53 (2010) Nr. 11, S. 1206-1215
- [20] Sagunski, H.; Heinzow, B.: Richtwerte für die Innenraumluft: Bicyclische Terpene (Leitsubstanz α -Pinen). Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 46 (2003) Nr. 4, S. 346-352

- [21] Richtwerte für zyklische Dimethylsiloxane in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 54 (2011) Nr. 3, S. 388-398
- [22] AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft. Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V., Springe-Eidagsen. Fassung 10.10.2008; www.agoef.de
- [23] Hofmann, H.; Plieninger, P.: (2008) Bereitstellung einer Datenbank zum Vorkommen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft. Forschungsbericht 205 61 243. Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) e.V., im Auftrag des Umweltbundesamts, www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3637.pdf
- [24] Gesundheit und Umwelthygiene. Richtwerte für die Innenraumluft. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2013. www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm
- [25] 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
- [26] Lahrz, T; Piloty, M; Oddoy, A; Fromme, H: Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Untersuchungen zur Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Bericht des Instituts für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen (ILAT), Fachbereich Umwelt und Gesundheitsschutz, Berlin (2003)
- [27] 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
- [28] 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, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau/Berlin (2010) www.uba.de/uba-info-medien/4011.html
- [29] 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
- [30] Heinzow, B.; Mohr, S.; Mohr-Kriegshammer, K.; Janz, H.: Organische Schadstoffe in der Innenraumluft von Schulen und Kindergärten. VDI-Bericht 1122, S.269-281. VDI-Verlag, Berlin 1994
- [31] Neumann, H.-D.: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497
- [32] Krebs erzeugende Wirkung von Formaldehyd – Änderung des Richtwertes für die Innenraumluft von 0,1 ppm nicht erforderlich. Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 49 (2006) S. 1169
- [33] WHO Air Quality Guidelines for Europe. 2. Aufl. Hrsg.: Weltgesundheitsorganisation, Genf 2001

7 Danksagung

Wir möchten an dieser Stelle allen Beteiligten, die an dieser Studie teilgenommen haben, unseren herzlichen Dank aussprechen. Unserer 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 Nordrhein-Westfalen 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 Durchführung der Datenauswertung.

Dr. Heinz-Dieter Neumann
Martin Buxtrup
Susanne Benitez
Dr. Dietmar Breuer
Dr. Jens-Uwe Hahn

Impressum

Herausgeber

Unfallkasse Nordrhein-Westfalen
Sankt-Franziskus-Straße 146
40470 Düsseldorf
Telefon 0211 9024-0
E-Mail info@unfallkasse-nrw.de
Internet www.unfallkasse-nrw.de

Autoren

Dr. Heinz-Dieter Neumann, Unfallkasse Nordrhein-Westfalen
Martin Buxtrup, Unfallkasse Nordrhein-Westfalen
Susanne Benitez, Hygieneinstitut des Ruhrgebiets
Dr. Dietmar Breuer, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung
Dr. Jens-Uwe Hahn, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung

Redaktion

Karin Winkes-Glüssenkamp

Gestaltung

saga werbeagentur GmbH, Münster

Druck

Düssel-Druck, Düsseldorf

Bildnachweis

Titelbild:
Unfallkasse Nordrhein-Westfalen
shutterstock.com
istockphoto.com

2. durchgesehene Auflage Juni 2014

1000 Stück

Bestellnummer

PIN 56

Sankt-Franziskus-Str. 146
40470 Düsseldorf
Telefon 0211 9024-0
Telefax 0211 9024-355