

Zeitliche und räumliche Schwankungen der Formaldehyd- konzentration in Klassenräumen

**Temporal and spatial fluctuations of formaldehyde concentration
in classrooms**

Die Formaldehydkonzentration in Klassenräumen kann jahreszeitlich bedingt stark schwanken. Ein an einem zentralen Punkt im Klassenraum gemessener Formaldehydwert muss nicht immer für den ganzen Raum gelten. Durch Verwenden von Passivsammlern kann die räumliche Verteilung der Formaldehydkonzentration auch ohne großen Mehraufwand an mehreren Stellen innerhalb eines Klassenraums gemessen werden. Aufgrund der Raumnutzung während des Schulbetriebs unter der Woche können die Werte im Vergleich zu einer Nichtnutzung am Wochenende stark abweichen.

Formaldehyde concentrations in classrooms can strongly change with season. A formaldehyde concentration measured at a central point of the room is not necessarily the same as in other parts of the room. By using passive samplers, it is possible to sample in different locations in a room using a reasonable amount of resources. The use of the classroom during the week can lead to different measurement results compared to the weekend period.

■ DR. RER. NAT. WERNER TIRLER, DR. MED. FABRIZIO NATOLINO, MASSIMO DONEGÁ
Eco Research, Negrellistr. 13, 39100 Bozen, Italien, w.tirler@eco-research.it

Formaldehyd ist in Innenräumen fast ubiquitär nachzuweisen, wobei die Konzentration im Allgemeinen stark davon abhängt, wie der Wohnraum möbliert worden ist (Saltammer, 2019). Der verbreitete Richtwert von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (AIR, 2016) wird in der Praxis nicht immer eingehalten. Speziell bei Räumen, die von vielen Personen genutzt werden, kann dies zu gesundheitlichen Problemen führen (WHO, 2010), die auch gesellschaftlich relevant werden können. In den vergangenen Jahren wurden im Raum Bo-

zen Überschreitungen registriert, die im Zusammenhang mit dem Einbau von bearbeiteten Holzpaneelen aufgetreten sind. Sind in diesen Räumen auch Personen untergebracht, die zu einer vulnerablen Bevölkerungsschicht zählen, wie z.B. Senioren oder Kinder, sollte besondere Vorsicht geboten sein. Bei einem Projekt zur Bewertung der Innenraumluftqualität von Schulklassen wurde ein Fokus auch auf zeitliche und räumliche Schwankungen dieses Gebäudeschadstoffs gelegt.

Formaldehyd

Formaldehyd wird hauptsächlich durch verleimtes Holz bzw. Holzwerkstoffe, die zur Innenraumgestaltung und Möblierung eingesetzt werden, freigesetzt. Des Weiteren können eher in geringerem Umfang auch andere Quellen wie Textilien, Kleber und Reinigungsprodukte/Desinfektionsmittel zur Belastung beitragen. Generell sollte man bedacht sein, die Konzentration von Formaldehyd in Innenräumen sehr niedrig zu halten, da die Kanzerogenität dieses Stoffes als erwiesen gilt (AIR, 2016). Besondere Vorsicht gilt, wenn die Räume öffentlich zugänglich und mit mehreren Personen belegt sind, die womöglich noch eine höhere spezifische Empfindlichkeit (z. B. bei Gesundheitlichen Einrichtungen, Schulen) aufweisen können. Der Vergleich der in den Räumen gemessenen Formaldehydwerte mit den Richtwerten ermöglicht eine Bewertung. Doch wie werden diese Werte erhoben und was sagen sie letztendlich aus?

Auswahl der zu untersuchenden Schulklassen

Wegen der steigenden Sensibilisierung der letzten Jahre, gerade in Bezug auf Formaldehyd, wurden große Bemühungen gemacht, um eine Reduzierung der Emissionen aus Bauprodukten und Mobiliar zu erreichen. So erreichen neue Produkte, die nach DIN EN 717-1:2005-01 geprüft werden, durchweg günstigere (niedrigere) Werte. Diese Fortschritte werden aber manchmal durch die veränderte Bauweise teilweise wieder zunichtegemacht. Ein der Energieeffizienz verpflichtetes Bauen hat manchmal auch einen niedrigen Luftwechsel zur Folge. Zwar ist seit geraumer Zeit bekannt, dass ein zentraler Punkt der Innenraum-Luftqualität („Über den Luftwechsel in Wohngebäuden“; Pettenkofer, 1958) der Luftaustausch ist, doch gerade in jüngster Zeit wird dies nicht immer besonders berücksichtigt. Deshalb wurden bewusst 3 Schulen ausgewählt, die nach verschiedenen Kriterien gebaut wurden. Die Schulen 1 und 2 wurden erst in den letzten Jahren fertiggestellt, aber nach verschiedenen Kriterien der Energieeffizienz. Bei Schule 2 wurde noch auf eine großzügigere Raumge-

staltung Wert gelegt, aber ohne kontrollierte Lüftungssysteme. Bei Schule 1 wurde alles, was dem Stand der Technik entsprechend an kontrollierten Lüftungssystemen zur Verfügung stand, mit Wärmetauscher und Luftfilter, eingebaut. Zudem waren bei dieser Schule beide Klassenräume im Erdgeschoss und eine Tür ermöglichte einen direkten Zutritt zum Garten. Da bei der ausführlichen Messkampagne im November auch kontinuierlich die Raumluftkonzentration an CO₂ gemessen wurde, konnte auch der rege Gebrauch dieser Möglichkeit nachgewiesen werden und der effektive Luftwechsel war davon beeinflusst. Schule 3 wurde in den 1970er-Jahren errichtet (ohne besondere Berücksichtigung der Energieeffizienz) und es wurden für die damalige Zeit gängige Materialien für den Bau und die Einrichtung verwendet. Bei Schule 1 und 2 wurden ausgewählte und geprüfte Materialien verwendet.

Planung der Probenahme

Als Standard-Messmethode wird oft eine Probenahme mit einer Pumpe (ISO 16000-3:2011) angewandt. Diese Art der Probenahme konnte bei den von uns untersuchten Klassenräumen nicht angewandt werden, da ein Stören des Unterrichts durch Vorbereitungsarbeiten und durch Pumpengeräusche nicht erwünscht war. Die Messungen sollten so durchgeführt werden, dass sie im normalen Unterricht nicht wahrgenommen werden konnten. Deshalb wurde eine Probenahme mit Passivsampler (ISO 16000-4:2011) durchgeführt.

Durch Verwenden von Passivsammlern konnten sowohl die Probenanzahl als auch die räumliche Verteilung der Probenahmestellen innerhalb des Klassenraums großzügig angelegt werden. Es wurden jeweils 2 Klassenräume pro Schule beprobt. Man entschied sich für 3 Probenahmepunkte innerhalb des Klassenraums, mit Ausnahme von Klasse B, wo nur 2 zur Verfügung standen. Damit sollte einerseits eine repräsentative Probenahme gesichert werden, andererseits sollten auch Informationen gewonnen werden, wie wichtig die Auswahl des Probenahmepunktes innerhalb des Klassenraums wirklich ist. Nach ISO 16000-1:2004 soll, wenn möglich, in der Raummitte

Tabelle 1: Temperatur- und Feuchteverlauf während der Messkampagne

Temperatur und Feuchte in den Klassen		mittlere Temperatur in °C		mittlere Feuchte in %	
		unter der Woche	am Wochenende	unter der Woche	am Wochenende
Schule 1	Klasse A	23,1	21,8	32,5	29,2
	Klasse B	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten
Schule 2	Klasse C	23,2	22,6	38,4	35,7
	Klasse D	22,4	22,1	37,3	35,5
Schule 3	Klasse E	22,7	21,7	33,0	28,2
	Klasse F	23,1	23,2	32,5	27,2

beprobt werden, in einer Höhe von 1,0 bis 1,5 m, und ein Wandabstand von mehr als 1,0 m soll eingehalten werden. Diese Vorgaben sollten kritisch hinterfragt werden, weshalb auch Parallelmessungen an 3 verschiedenen Punkten vorgenommen wurden. Bei Beprobung und Analyse sollte man auch nicht außer Acht lassen, ob eine dem Zweck entsprechende Vorgehensweise gewählt wurde. Wenn man aus logistischen Gründen nur an einer Stelle beproben kann, ist die Vorgehensweise nach ISO 16000-1 natürlich sinnvoll. Durch Verwenden von Passivsammlern ist der Aufwand bei einer Mehrfach-Beprobung aber begrenzt und diese kann auch flexibel eingesetzt werden.

In einer Schulklassenzimmer können unter Umständen genau in der Mitte keine Schüler sitzen, aber doch welche in der Nähe einer Wand. Der zentrale Probenahmepunkt (Z) war in ca. 2 m Höhe über eine Verbindung mit der Decke angebracht. Zwei Passivsammler wurden seitlich, in unmittelbarer Nähe der Wand (< 0,3 m), meist gegenüberliegend, in einer Höhe von ca. 2 m angebracht. Einer dieser seitlichen Probenahmepunkte war näher zur Fensterfront (S_1), beim zweiten (S_2) wurde zudem auch ein Multiparameter-Sensor (RubiX PoD, www.rubixsi.com; kurz: POD) angebracht, der für die Raumluftqualität wichtige Parameter kontinuierlich erfassen konnte. So konnten CO_2 , Temperatur und Feuchtigkeit in Echtzeit gemessen werden und über eine Cloud-basierte Datenbank auch remote abgerufen werden. Die so erhaltenen Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Ergebnisse

Zu Beginn der Messkampagnen wurden Anfang Mai 2019 für die Beprobung Passivsammler in die Klassenräume gestellt, um eine erste Übersicht über die Formaldehydbelastung zu bekommen. Die erhobenen Werte waren durchweg sehr niedrig, im Bereich von < 1 bis 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Außentemperatur variierte im Bereich von mindestens 10 bis maximal 23 °C (durchschnittlich 20 °C). Da gerade im Mai die Außentemperatur ideal ist, um Klassenräume auch ständig zu lüften, wurden diese Werte als nicht repräsentativ eingestuft und eine ausführlichere Beprobung wurde auf den Herbst verschoben, wo die Räume auch geheizt werden müssen und ein ständiges Lüften nicht mehr möglich ist. Mitte Oktober – die Außentemperatur variierte dabei im Bereich von mindestens 5 bis maximal 20 °C (durchschnittlich 14 °C) – wurde wieder eine Übersichtsbeprobung in den Klassenräumen durchgeführt und die erhaltenen Werte waren doch signifikant höher, im Bereich von 12 bis 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Im November wurde dann eine ausführlichere Messkampagne gestartet, die eine Formaldehydbeprobung an verschiedenen Punkten in den Klassenräumen vorsah und bei der auch der Multiparameter-Sensor zur Online-Messung von CO_2 , Temperatur und Feuchte eingesetzt wurde. Es wurde sowohl am Wochenende (16. bis 17. November) wie auch während der Schulwoche (18. bis 22. November) gemessen. Die im November erhaltenen Temperatur- und Feuchte-Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

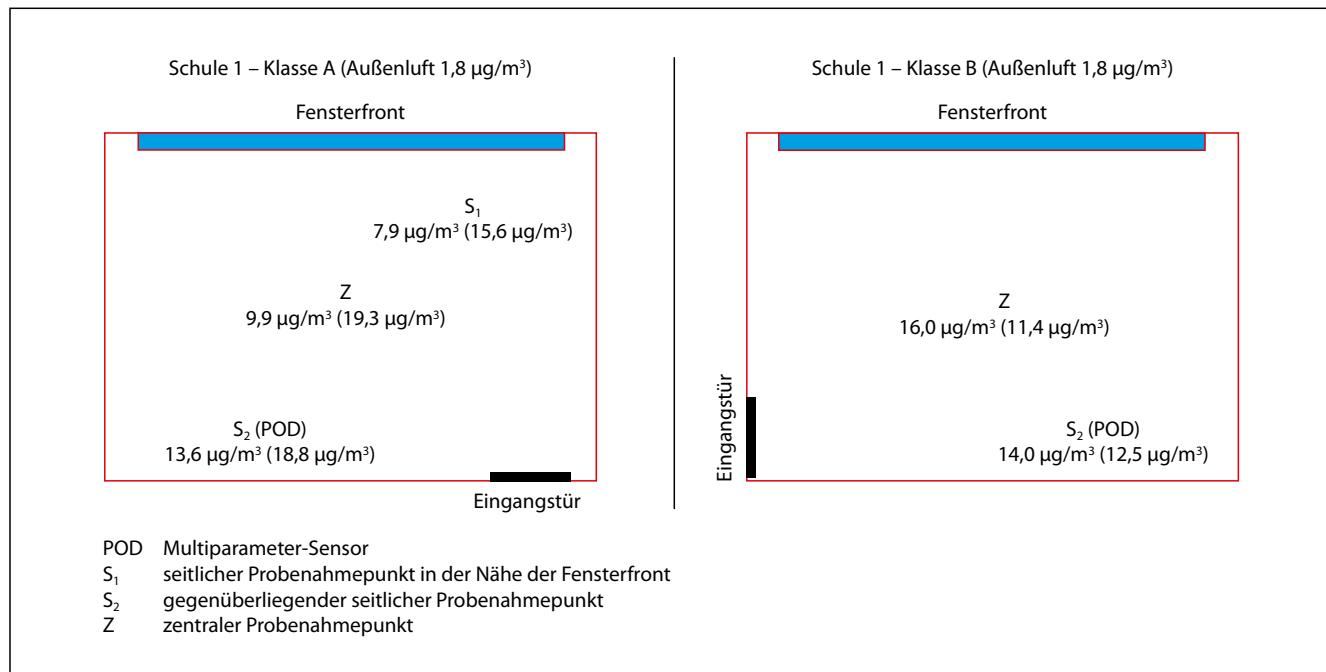


Abb. 1: Formaldehydkonzentrationen in den Klassen A und B der Schule 1

Es wurden 2 Messkampagnen durchgeführt, wobei eine Beprobung während einer Woche normalen Schulbetriebs, von Montag bis Freitag, durchgeführt wurde, die andere über das Wochenende (leere Klasse) erfolgte. Für eine bessere und intuitivere Darstellung der Ergebnisse wurden diese grafisch im Raum zugeordnet, wie in den folgenden, jeweils pro Klasse dargestellten Grafiken ersichtlich ist. Die Ergebnisse der Messkampagne während der Schulwoche sind in den Grafiken beim Beprobungspunkt angeführt, so auch die Ergebnisse der Messkampagne am Wochenende, allerdings in Klammern gesetzt. Alle Werte für Formaldehyd sind in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben.

Wenn wir Abb. 1 betrachten, die die Ergebnisse für Klassenräume der energieeffizientesten Schule (Schule 1) darstellt, sieht man bei Klasse A, dass während der Schulwoche in den Punkten S₁ und Z niedrigere Werte (7,9 und 9,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) als am Wochenende (15,6 und 19,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) erhoben wurden. Beim Punkt S₂, der Fensterfront weiter abgewandt, und bei der Klasse B war der Unterschied nicht signifikant.

Bei Schule 2, wo auch Kriterien des energieeffizienten Bauens angewandt wurden, kann man eigentlich keinen

einheitlichen Trend ausmachen (siehe Abb. 2). Speziell in Klasse C sind sowohl die örtlichen (verschiedene Probenahmepunkte) wie auch die zeitlichen Schwankungen (Wochenende und unter der Woche) der Messwerte nicht wirklich signifikant verschieden. Die einzige Ausnahme stellt der zentrale Probenahmepunkt (Z) in der Klasse D dar, der während der Schulwoche einen deutlich niedrigeren Wert (11,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) als am Wochenende (23,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) liefert.

Schule 3, in den 1970er-Jahren erbaut – damals war Energieeffizienz beim Bauen noch kein zentrales Thema –, liefert je nach Klasse ein recht unterschiedliches Bild (siehe Abb. 3). Bei Klasse E ist kein eindeutiger Trend ersichtlich, bei Klasse F sind sogar fast nur identische Werte erhoben worden, unabhängig davon, wo und wann man beprobt hat. Eine Erklärung für diese überraschende Konstanz der Werte kann wahrscheinlich darin zu finden sein, dass Klasse F keine „normale“ Schulklasse ist, sondern der Computerraum, mit einem Personal Computer (PC) am Platz pro Schüler. Ein PC-Server war ebenfalls im Klassenraum und die eingebauten Lüfter konnten eventuell die Luftdurchmischung beeinflusst haben. Erstaunlich ist auch,

SCHWANKUNGEN DER FORMALDEHYDKONZENTRATION IN KLASSENRÄUMEN

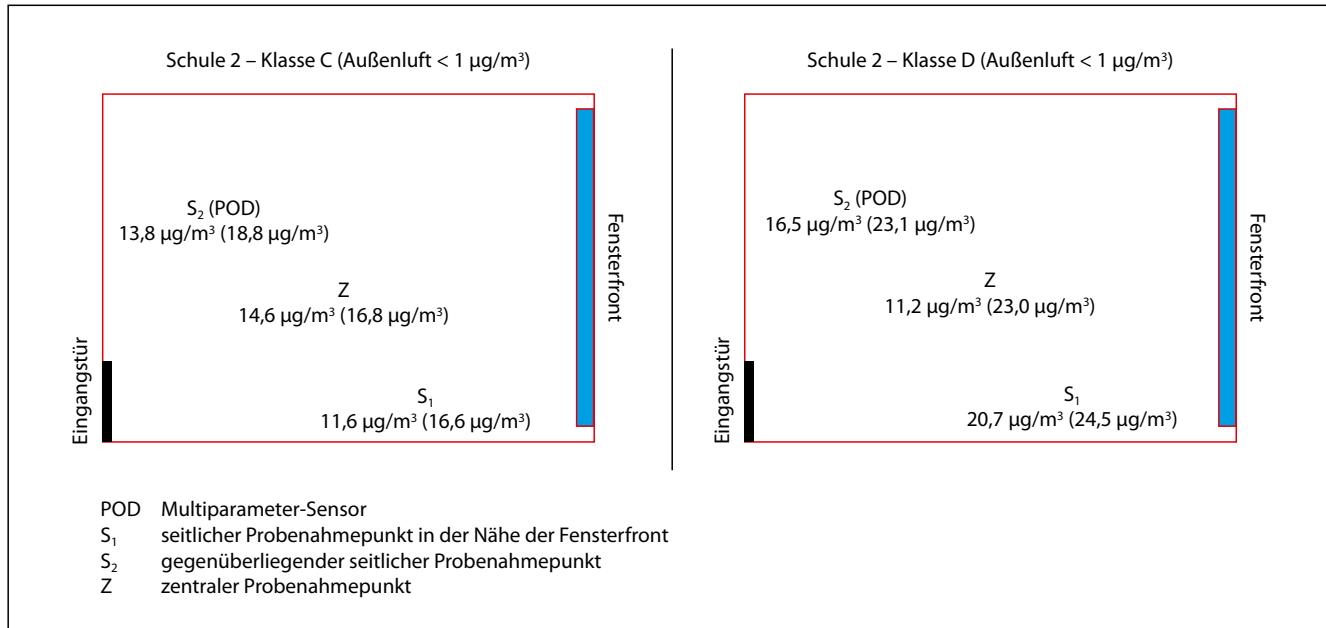


Abb. 2: Formaldehydkonzentrationen in den Klassen C und D der Schule 2

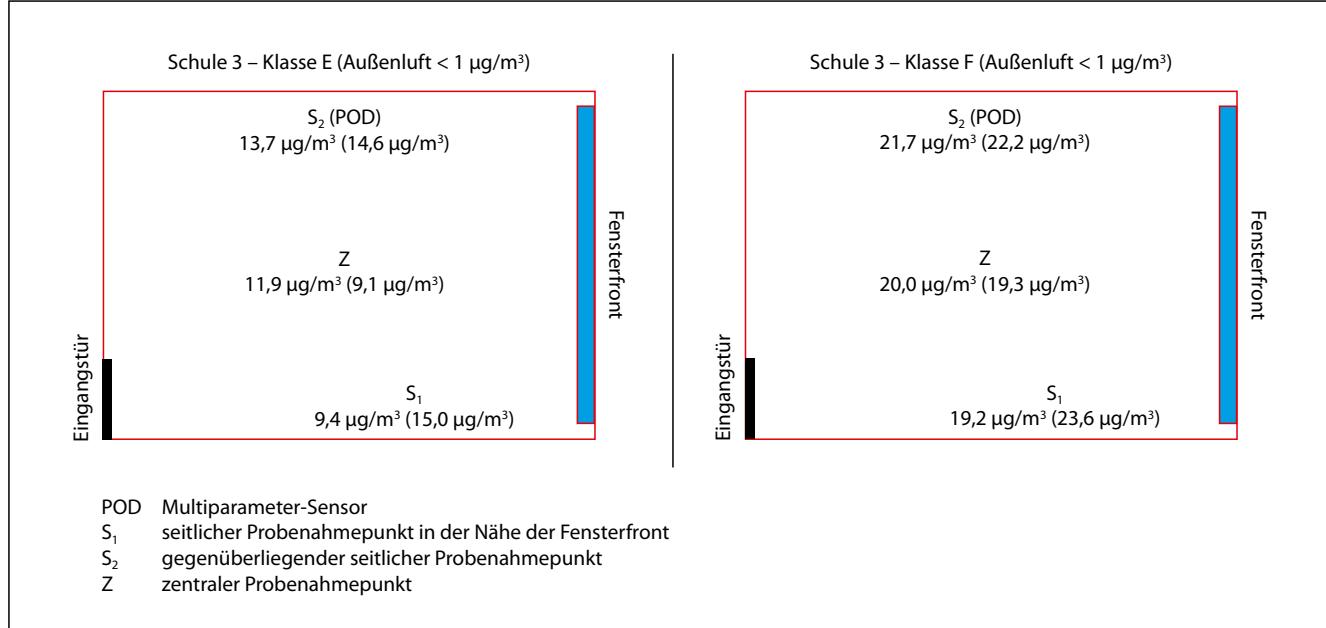


Abb. 3: Formaldehydkonzentrationen in den Klassen E und F der Schule 3

dass die Schwankung der erhobenen Werte in diesem Raum innerhalb der Wiederholpräzision des Verfahrens (innerhalb einer zweifachen Standardabweichung), die mit 15,9 % quantifiziert worden ist, liegt. Dabei sind die Werte weder zeitgleich (am Wochenende und unter der Woche) noch am gleichen Ort (an 3 verschiedenen Punkten im Raum) ermittelt worden.

Die erhobenen Werte ermöglichen nur eine Zeitaufnahme in einer gegebenen Situation und wollen keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Je nach Bauweise und Nutzung können die Werte unterschiedlich schwanken. Eine Beprobung mit Passivsammler ermöglicht, ohne großen Mehraufwand an verschiedenen Punkten in der Klasse zu beproben, und kann so Auskunft über die mögliche Schwankungsbreite der Konzentrationen im Raum liefern.

Bestimmung anderer Aldehyde

Da bei der gewählten Bestimmungsmethode (Analytik mit Hochleistungsflüssigkeitschromatografie [HPLC] nach Sammlung auf Dinitrophenylhydrazin- [DNPH-]Kartuschen) ohne großen Mehraufwand auch andere Aldehyde mitbestimmt werden können, wurden auch diese berücksichtigt. Außer Formaldehyd wird auch die Summenbewertung mit Acetaldehyd diskutiert bzw. in den Fokus gebracht (Weis, 2017). Durch eine nachträgliche, semiquantitative Auswertung der Proben haben sich Hinweise ergeben, dass neben Acetaldehyd auch Butanal und Hexanal in einer ähnlich hohen Konzentration wie Formaldehyd vorliegen können.

Fazit

Die Formaldehydkonzentration in Klassenräumen kann jahreszeitlich bedingt stark schwanken. Wenn in der kälteren Jahreszeit durch selteneres Lüften der Luftwechsel niedrig ist, können höhere Formaldehydkonzentrationen die Folge sein. Durch die Raumnutzung während des Schulbetriebs unter der Woche können die Werte im Ver-

gleich zu einer Nichtnutzung am Wochenende variieren, müssen es aber nicht. Eine räumliche Schwankung der Werte in den Klassenräumen konnte beobachtet werden, wobei diese generell unter der Woche bei Schulbetrieb höher ausfallen kann als am Wochenende. Ein durch einen zentralen Beprobungspunkt erhobener Wert muss nicht immer eine repräsentative Aussage über die effektive Formaldehydbelastung in den Schulklassen liefern. Schulgebäude mit erhöhter Energieeffizienz müssen nicht zwangsläufig einen schlechteren Luftwechsel oder eine höhere Formaldehydbelastung aufweisen. Zusätzliche aktive Lüftung und sorgfältige Auswahl der verbauten Materialien können zu vergleichsweise „guter Luftqualität“ führen.

Danksagung

Die Studie konnte dank finanzieller Unterstützung der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol, nach Landesgesetz vom 13. Dezember 2006, Nr 14, durchgeführt werden.

Literatur

- AIR. (2016) Richtwert für Formaldehyd in der Innenraumluft. Mitteilungen des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Bundesgesundheitsblatt 59, 1040–1044, DOI 10.1007/s00103-016-2389-5
- DIN EN 717-1:2005-01 Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammer-Methode; Deutsche Fassung EN 717-1:2004
- ISO 16000-1:2004 / DIN EN ISO 16000-1:2006-06 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie (ISO 16000-1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 16000-1:2006
- ISO 16000-3:2011 / DIN ISO 16000-3:2013-01 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern – Probenahme mit einer Pumpe
- ISO 16000-4:2011 / DIN ISO 16000-4:2012-11 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 4: Bestimmung von Formaldehyd – Probenahme mit Passivsammlern
- Pettenkofer M. (1958) Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cottasche Buchhandlung, München
- Salthammer T. (2019) Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. Building and Environment 150, 219–232
- Weis N. (2017) Der neue Richtwert für Formaldehyd – eine kritische Betrachtung. Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft 2, 46–53
- WHO. (2010) Formaldehyde. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization, Genf, 103–156