

Übersicht

Korrespondierende Autorin*:

Dr. med. Katrin Steul
Gesundheitsamt Frankfurt
am Main
Breite Gasse 28
60313 Frankfurt

E-Mail: katrin.steul@stadtfrankfurt.de

Interessenkonflikt:

Die Autorinnen erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) besteht.

Zitierweise:

Heudorf U., Steul K.
Innenraumhygiene - Grundlagen: Messung und Bewertung von Innenraum-Kontaminationen. HygMed 2022; 47(1-2): D12-D19

Manuskriptdaten:

Eingereicht: 30. Dezember 2021
Überarbeitetes Manuskript
angenommen: 11. Januar 2022

Innenraumhygiene - Grundlagen: Messung und Bewertung von Innenraum- Kontaminationen

Ursel Heudorf¹, Katrin Steul^{2*}

¹ MRE-Netz Rhein-Main, c/o Gesundheitsamt Frankfurt am Main

² Gesundheitsamt Frankfurt am Main

■ Zusammenfassung

Die hygienisch-gesundheitliche Bewertung der Innenraumluftqualität ist auch eine Aufgabe der Fachärzte für Hygiene und Umweltmedizin. Der Beitrag zeigt die Grundlagen der Messung und Bewertung von Innenraumkontaminationen auf. In Kenntnis möglicher Quellen von Verunreinigungen in Innenräumen und vor dem Hintergrund einer klaren Fragestellung ist eine Mess-Strategie zu erarbeiten. Zur Bewertung der so standardisiert erhaltenen Ergebnisse werden die Bewertungsschemata und -kriterien der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumkommission bzw. des Ausschusses für Innenraumrichtwerte (AIR) sowie die aktuellen toxikologisch abgeleiteten Richtwerte (RW I und RW II), risikobasierten Leitwerte für krebserzeugende Stoffe im Innenraum, die hygienisch abgeleiteten Leitwerte und das TVOC-Konzept vorgestellt.

Schlüsselwörter

- Raumlufthygiene
- Innenraum-Kontamination
- Richtwert
- Leitwert
- TVOC-Konzept

■ Abstract

Indoor Hygiene - Basics: Measurement and Assessment of Indoor Contamination.

The hygienic health assessment of indoor air quality is also a task of specialists in hygiene and environmental medicine. The article shows the basics of measurement and evaluation of indoor contamination. A Strategy has to be

worked out regarding possible sources of contamination indoors. The evaluation schemes and criteria of the ad-hoc working group of the Indoor Air Quality Commission and the Committee for Indoor Guideline Values (AIR) are presented for evaluation of results obtained in this standardized way. Beside this, the evaluation schemes of the current toxicologically derived guideline values (RW I and RW II), the risk-based guideline values for carcinogenic substances in indoor air, and the guidelines of the so called TVOC concept are presented.

Keywords: [indoor air hygiene](#) · [indoor contamination](#) · [guideline value](#) · [TVOC concept](#)

■ Einleitung

Die Luft von Innenräumen kann durch vielfältige Quellen (z.B. aus der Baustoffsubstanz, Baumaterialien, durch Einrichtungsgegenstände etc.) und auch durch die Raumnutzer und deren Aktivitäten im Raum (z.B. Kohlendioxid, Emissionen aus Schreib- und Bastelmaterialien) belastet bzw. verunreinigt werden (siehe Tabelle 1). Verunreinigungen der Innenraumluft können ggf. zu Beeinträchtigungen der Gesundheit und des Wohlbefindens der Raumnutzer führen.

■ Fragestellung und Mess-Strategie und -bedingungen

Oft wird aus der Annahme einer Verunreinigung der Raumluft die Forderung nach Raumluft-Messungen abgeleitet. Zur Erarbeitung einer geeigneten und angemessenen Mess-Strategie bedarf es immer guter vorheriger Recherchen und Vorinformationen – ggf. an-

hand von Checklisten [1]. Darüber hinaus braucht es eine klare Fragestellung und daraus abgeleitet spezifischer, klar definierter und beschriebener Rahmenbedingungen und Mess-Strategien. Es wird empfohlen, nur Parameter zu messen, für die es Bewertungsmöglichkeiten gibt.

a) Besteht die Frage nach der gesundheitlichen Bewertung der Raumluftqualität, so soll die Raumluft-Messung unter möglichst nutzungs-

üblichen Bedingungen vorgenommen werden, z.B. normale Raumtemperatur, Lüftung für wenige Minuten und Abwarten der Ausgleichsbedingungen – für Schulen z.B. eine 45-min-Unterrichtseinheit.

b) Besteht die Frage nach der Suche nach einer unbekanntenen Quelle im Raum bei bspw. unklarer Geruchsbelastung, kann eine Messung in hochgeheizten und über Tage un-

gelüfteten Räumen sinnvoll sein, da durch diese Vorbereitung des Raums auch schwerer flüchtige Stoffe aus Bau- und Einrichtungsmaterialien emittiert werden und sich in der Raumluft anreichern. In einigen Fällen kann nur so die Nachweisgrenze der Analyseverfahren überschritten und ein in Frage stehender Stoff nachgewiesen werden.

Tabelle 1: Quellen von Verunreinigungen im Innenraum (Auszug aus [1])

Quelle / Ursache	Quellen im engeren Sinn	Emittierte Stoffe (Auswahl)
Biologische Quellen		
Menschen, Tiere, Insekten, Milben		Kohlendioxid, Wasserdampf, Geruchsstoffe
Zimmerpflanzen inkl. Schimmelpilzbefall		Terpene, Geruchsstoffe, mikrobielle VOC
Bausubstanz/Gebäudeausrüstung		
Baukörper/Baumaterialien	Baustoffe, Isolierstoffe, Dichtungsmaterialien, Farben etc.	Versch. Gas- oder Partikelförmige Stoffe, z.B. Lösemittel, Weichmacher, Mono- und Oligo-Monomere, Holz- und Flammschutzmittel, Fasern (aus Altbestand auch Asbest), Radon (aus Granit), Amine, Ammoniak, mikrobielle VOC (bei Schimmelschaden)
Raumlufttechnische Anlagen	Wäscher, Filter, Isolier- und Dichtungsmaterialien, Ablagerungen	Biozide, Fasern, Geruchsstoffe
Raumausstattung (Möbel) Einrichtungsgegenstände (incl. Böden)	Möbel, Fußbodenbeläge, Heimtextilien, Lacke, Anstrichmittel, Tapeten	Monomere und Oligomere aus Kunststoffen, Harzen, Oberflächenbeschichtungen, Klebern (z.B. Formaldehyd), Fasern, Lösemittel, Weichmacher, Stabilisatoren, Biozide (z.B. Pyrethroide)
Aktivitäten im Innenraum		
Nutzung als Büro*		Organische Lösemittel, schwerflüchtige organische Substanzen (Weichmacher, Flammschutzmittel), Druckeremissionen
Raumpflege	Wasch- und Putzmittel, Polituren, Desinfektionsmittel, Schädlingsbekämpfungsmittel	Wasser, Ammoniak, Chlor, organische Lösemittel (z.B. Ethanol), Bakterizide, Insektizide und Staub
Hygiene und Körperpflege	Kosmetische Mittel	Lösemittel, Treibgase, Duftstoffe, anorganische und organische Aerosole (Farbstoffe, Pigmente, Lacke, Harze)
Außenluft		
Emissionen durch menschliche Aktivität	Gewerbe, Industrie, Verkehr, Landwirtschaft etc.	Anorganische und organische Gase und Aerosole, Lösemittel, Ammoniak, Geruchsstoffe, PAH
Biogene und geogene Emissionen	Blühende Pflanzen, Boden, Deponien, Altlasten, Bodenresuspensionen, natürliche Verrottung	Pollen, Radon, Methan u. a. flüchtige organische Verbindungen (Kohlenwasserstoffe, Organohalogenverbindungen), Geruchsstoffe, Stäube

* u.E. auch Wohnräume, Schulen, Kita etc.

Die Fragestellung und Mess-Strategie muss vorab mit den Raumnutzern besprochen werden und es muss vor der Messung klar dargelegt werden, dass nur Messwerte, die unter nutzungsähnlichen Bedingungen gewonnen wurden, gesundheitlich bewertet werden können, nicht die unter b) genannten sog. „Worst Case-Messungen“.

Die Rahmenbedingungen zur sachgemäßen Ermittlung von Innenraumluftverunreinigungen sind in Grundsatzpapieren niedergelegt (z.B. [1]). In den Messprotokollen müssen nicht nur das Messverfahren selbst, sondern unbedingt auch Angaben zur Fragestellung, zum Raum und seiner Ausstattung sowie zur Vorbereitung des Raums (Ausmaß, Dauer einer vorherigen Lüftung und die seither verstrichene Zeit) sowie die Raumtemperatur (und möglichst auch die Luftfeuchte im Raum) dokumentiert sein. Ohne diese Angaben ist eine sachgerechte Bewertung der erhaltenen Befunde nicht möglich und aus fachlicher Sicht strikt abzulehnen.

■ Probenahme-Verfahren

Grundsätzlich können Kurzzeit- und Langzeitmessungen unterschieden werden.

Bei **Kurzzeitmessungen** werden die in Frage stehenden Substanzen mittels aktiver Probenahme mit einem Messgerät über <1 bis ggf. mehrere Stunden auf geeigneten Absorptionsmaterialien (z.B. Aktivkohle, Tenax TA) absorbiert und dann im Labor mit speziellen Desorptionsverfahren (z.B. Schwefelkohlenstoff, thermisch) in Reagenzlösungen überführt und analysiert (z.B. Flammenionisation, Massenspektrometrie). Diese Verfahren sind geeignet bspw. zur Untersuchung leichtflüchtiger organischer Substanzen. Ein Überblick über die empfohlenen Verfahren findet sich in [1, 2].

Langzeitmessungen werden durch Auslegen von speziellen Messröhrchen (Passivsammler) in den Raum – über Tage bis bspw. eine Woche – gewonnen. In diesen Proberöhrchen befindet sich ebenfalls ein spezielles Absorptionsmedium, das durch passiven Luftaustausch mit den Stoffen in der Raumluft beaufschlagt wird. Dieses kann dann nach einer definierten Expositionszeit im Raum im Labor herausgelöst und analysiert werden. Mit diesen Verfahren können auch schwerer flüchtige Substanzen

untersucht werden, die einer Kurzzeitmessung entgehen, z.B. bestimmte Pestizide wie das nicht mehr zu verwendende DDT oder auch bestimmte schwer flüchtige Weichmacher oder Flammschutzmittel. Aus der Kenntnis des Probenahmematerials, der Raumgröße und der Ausbringungsdauer kann dann auf die Konzentration in der Raumluft geschlossen werden.

Eine Sonderform bilden Hausstaubproben, die von Privatleuten aus Privatwohnungen leicht selbst genommen und an ein Labor verschickt werden können. Das erspart zwar die Kosten für die Anfahrt und Probenahme eines Experten, eine gesundheitliche Bewertung der Probe ist so jedoch nicht möglich. Als quasi „unstandardisierter Passivsammler“ (Wie alt? Woher genau? Probenahme mittels Absaugen, Abfegen, Abwischen? Weiterverarbeitung: Gesamtstaub? Durch Sieben abgetrennte Fraktionen unterschiedlicher Korngrößen?) ist Hausstaub bestenfalls geeignet, Hinweise auf eine Quelle im Raum (z.B. früherer Einsatz von DDT) zu geben. Eine belastbare Expositionsabschätzung von Hausstaub für die Raumnutzer ist angesichts der genannten methodischen Unsicherheiten und sehr unterschiedlicher individueller Verhaltensweisen (Beispiel: Wieviel Hausstaub wird durch Spielen am Boden oral oder dermal aufgenommen?) nicht möglich [3].

■ Bewertung der Ergebnisse

Zur Bewertung der Ergebnisse von Raumluftmessungen leitet der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR), vormals Ad-hoc-Arbeitsgruppe, gesundheitsbezogene Richtwerte sowie hygienische Leitwerte ab, die eine gesundheitliche Beurteilung von Konzentrationen einer Chemikalie in der Innenraumluft ermöglichen [4]. Der AIR besteht aus Expertinnen und Experten des Bundes und der einzelnen Bundesländer in Deutschland, die auf Mandat der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden benannt werden. Zusätzliche Expertinnen und Experten können für die Arbeit im AIR berufen werden. Die Geschäftsstelle ist am Umweltbundesamt angesiedelt.

■ Toxikologisch abgeleitete Richtwerte

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumhygiene-Kommission des Umwelt-

bundesamtes hat bereits seit den 1990er Jahren nach einem sog. „Basischema“ aus dem Jahr 1996 toxikologisch hergeleitete, gesundheitsbezogene Richtwerte für die Innenraumluft erarbeitet. Diese Richtwerte wurden ausgehend von dem Lowest observed adverse effect level (LOAEL) berechnet. Als LOAEL bezeichnet man, die niedrigste Konzentration einer Substanz, bei welcher im Tierversuch oder in Humanstudien erste „adverse“ Effekte erkennbar waren. Dabei wurde ein Sicherheitsfaktor (eigentlich Divisor) von 10 eingesetzt, wenn der LOAEL aus einem Tierversuch entnommen wurde (sog. Interspezies-Faktor). Um auch besonders empfindliche Menschen zu schützen, wurde ein weiterer Sicherheitsfaktor von 10 eingesetzt (sog. Intraspezies-Faktor). Wurde eine arbeitsmedizinische Untersuchung zugrunde gelegt, wurde nochmals ein Faktor von 5 eingesetzt (Umrechnung von 40 h-Woche auf Gesamtwoche 168 h) und zuletzt noch ein Sicherheitsfaktor von 2 (sog. Kinderfaktor) [5].

Im Jahr 2012 wurde dieses Basischema fortgeschrieben. Nach der neuen Version können je nach Verfügbarkeit geeigneter Studiendaten die Richtwerte weiterhin vom LOAEL abgeleitet werden (RW II). Sie können aber auch vom NOAEL, dem „No observed adverse effect level“ abgeleitet werden, also der höchsten Konzentration, bei der (im Tierexperiment) (noch) kein adverser Effekt beschrieben wurde. Zudem kann auch ein sogenanntes Benchmark-(Dosis-)Verfahren herangezogen werden. Dieses ist ein Verfahren, dass anders als die Ansätze der Berechnung aus NOAEL und LOAEL alle Werte einer mathematisch erstellten Dosis-Wirkungskurve mit einbezieht.

Zur Berücksichtigung der Studiedauer verwendet die Ad-hoc-Arbeitsgruppe in der Regel den Extrapolationsfaktor von 6 (subakut - chronisch) bzw. von 2 (subchronisch - chronisch). Statt des früheren Interspeziesfaktors von 10 wird entsprechend einer WHO-Empfehlung eine Aufteilung des Interspezies-Faktors in einen Faktor für die Toxikokinetik von 4 und für die Toxikodynamik von 2,5 verwendet. Da in Humanstudien zur Reizwirkung einer Reihe von flüchtigen organischen Verbindungen im Atemtrakt die Empfindlichkeit der Mehrheit der untersuchten Probanden um weniger als ei-

nen Faktor 5 vom Durchschnitt abwich, wird jetzt im Rahmen von Risikobewertungen die interindividuelle Variabilität der Reizwirkung mit einem Faktor von 5 abgebildet. Zum Schutz besonders empfindlicher Personengruppen, insbesondere von Kindern, verwendet die Ad-hoc-Arbeitsgruppe nach wie vor einen zusätzlichen Extrapolationsfaktor von 2 („Kinderfaktor“). In den Publikationen zu den einzelnen Stoffen werden die jeweils genutzten Faktoren transparent angegeben [6].

In Abbildung 1 sind die Definitionen der toxikologisch abgeleiteten Richtwerte (2012) [6] dargelegt.

Inzwischen wurde von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe, aber auch deren Nachfolge-Institution, dem Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR), eine Vielzahl von toxikologisch abgeleiteten Richtwerten veröffentlicht. Die jeweiligen Veröffentlichungen geben einen detaillierten Überblick über das Vorkommen und den Einsatz des jeweiligen Stoffes, die physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften, das Vorkommen im Innenraum, die toxikologischen Eigenschaften des Stoffes und die der Richtwertableitung zugrunde gelegten Studien und

Überlegungen. Sämtliche Publikationen können als PDF-Datei von der Internetseite heruntergeladen werden [4]. In Tabelle 2 sind die bislang publizierten Richtwerte I und II zusammengestellt, es finden sich darin in der rechten Spalte auch die Nachweise der gedruckten Version im Bundesgesundheitsblatt.

■ Risikobezogene Leitwerte für krebserzeugende Stoffe in der Innenraumluft

Falls der in Frage stehende Stoff krebserzeugend wirkt, setzt der Ausschuss Innenraumrichtwerte AIR eine von dem o.g. Basisschema abweichende Methode ein [7]. Aus Studien an hochbelasteten Arbeitsplätzen bzw. tierexperimentellen (Hochdosis)-Studien wird über – in der Wissenschaft nicht unumstrittene – verschiedene Modellierungsverfahren (z.B. linearisierte Modelle oder Modelle mit sublinearem Verlauf, die die möglichen Entgiftungs- und Reparaturmechanismen modellhaft mit abbilden) das theoretische Krebsrisiko bei einer lebenslangen Exposition (übliche Annahme 70 Jahre) abgeschätzt. Für die gesundheitliche Bewertung wird ein

theoretisches Risiko von 10^{-6} , d.h. ein Krebsfall pro 1.000.000 entsprechend Exponierter, angesetzt, das nicht überschritten werden soll.

Unter der Voraussetzung, dass eine belastbare Abschätzung des theoretischen Krebsrisikos einer Verunreinigung im Innenraum und ein Referenzwert (das 95. Perzentil einer für Deutschland repräsentativen Stichprobe) vorliegen, leitet die AIR folgende Werte ab:

- Unterschreitet der Referenzwert das auf 10^{-6} errechnete theoretische Krebsrisiko, wird die Konzentration mit dem theoretischen Krebsrisiko von 10^{-6} als **risikobezogener Leitwert** festgelegt.
- Überschreitet der Referenzwert das auf 10^{-6} errechnete theoretische Krebsrisiko, wird dieser Referenzwert als **vorläufiger Leitwert (v)** angegeben.

Die bislang abgeleiteten risikobezogenen resp. vorläufigen Leitwerte für krebserzeugende Stoffe in der Innenraumluft sind in Tabelle 3 zusammengestellt inkl. der Literaturverweise.

Abbildung 1: Definitionen der toxikologisch abgeleiteten Richtwerte I und II [6]

Richtwert II (RW II)

Der Richtwert II ist ein wirkungsbezogener, begründeter Wert, der sich auf die toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Extrapolationsfaktoren stützt. Bei dem Richtwert II handelt es sich in der Regel um einen Langzeitwert, er kann aber auch als Kurzzeitwert abgeleitet sein und wird in diesem Fall entsprechend gekennzeichnet (RW IIK). Der Richtwert II stellt die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft dar, bei deren Erreichen bzw. Überschreiten unverzüglich Handlungsbedarf besteht, da diese Konzentration geeignet ist, insbesondere bei Daueraufenthalt in den Räumen die Gesundheit empfindlicher Personen einschließlich Kindern zu gefährden. Der Handlungsbedarf ist als unverzüglicher Prüfbedarf zu verstehen, z.B. im Hinblick auf Sanierungsentscheidungen zur Verringerung der Exposition. Eine Empfehlung zur Schließung von Räumen kann daher notwendig sein.

Die Anwendung von Richtwerten als Vergleichsmaßstab setzt die Durchführung einer Messung unter üblichen Nutzungsbedingungen voraus. Die Feststellung der Überschreitung des Richtwertes II sollte umgehend mit einer Kontrollmessung abgesichert werden. Im Einzelfall kann - soweit möglich und sinnvoll - eine Bestimmung der internen Belastung der Raumnutzer erfolgen.

Richtwert I (RW I)

Der Richtwert I ist die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der im Rahmen einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Kenntnisstand auch bei lebenslanger Exposition von empfindlichen Personen keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Eine Überschreitung ist mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, hygienisch unerwünschten Belastung verbunden. Aus Vorsorgegründen besteht auch im Konzentrationsbereich zwischen RW I und RW II Handlungsbedarf. Der RW I kann als Sanierungszielwert dienen. Er soll nicht ausgeschöpft, sondern nach Möglichkeit unterschritten werden.

Tabelle 2: Toxikologisch abgeleitete Richtwerte für die Innenraumluft [4]

Verbindung	CAS Nr	Einheit	RW II	RW I	Jahr d. Festlegung	Publiziert in Bundesgesundheitsblatt
2-Propanol	67-63-0	mg/m ³	45	22	2021	2021; 64: 1318-1327
Aceton	67-64-1	mg/m ³	160	53	2021	2021; 64: 1184-1192
Methylmethacrylat	80-62-6	mg/m ³	2,1	1,1	2021	2021; 64: 126-135
Benzothiazol	95-16-9	µg/m ³	n.abgel.	15 (v)	2020	2020; 63: 1304-1310
Stickstoffdioxid NO ₂	10102-44-0	mg/m ³	0,25 (60 min)	0,08 (60 min)	2018	https:// doi.org/ 10.1007/ s00103- 019- 02891-4
2-Phenoxyethanol	122-99-6	mg/m ³	0,1	0,03	2018	2018; 61: 488-493
Tetrachlorethen	127-18-4	mg/m ³	1,0	0,1	2017	2017; 60: 1305-1315
Propan-1,2-diol	57-55-6	mg/m ³	0,6	0,06	2017	2017; 60: 1298-1304
C ₇ -C ₈ -Alkylbenzole (Summenrichtwert Toluol, Xylole, Ethylbenzol) #						
Toluol	108-88-3	mg/m ³	3,0	0,3	2016	2016; 59: 1522-1539
Formaldehyd	50-00-0	mg/m ³	n. abgel.	0,1	2016	2016; 59: 1040-1044
Xylole-Summe	Versch	mg/m ³	0,80	0,10	2015	2015; 58: 1378-1389
Butanonoxim	96-29-7	µg/m ³	60	20	2015	2015; 58: 505-512
2-Chlorpropan	75-29-6	mg/m ³	8,0	0,8	2015	
Ethylacetat	141-78-6	mg/m ³	6,0	0,6	2014	2014; 57: 1442-1450
1-Methyl-2-Pyrrolidon	872-50-4	mg/m ³	1,0	0,1	2014	2014; 57: 1232-1241
1-Butanol	71-36-3	mg/m ³	2,0	0,7	2014	2014; 57: 733-743
2-Ethylhexanol	104-76-07	mg/m ³	1,0 (v)	0,1 (v)	2013	2013; 56: 590-599
Glycoether und -ester #	Versch.	mg/m ³			2013	2013; 56: 286-320
Naphthalin und naphthalinähnliche Verbindungen		µg/m ³	30 (v)	10 (v)	2013	2013; 56: 1448-1459
Acetaldehyd	75-07-0	mg/m ³	1,0	0,1	2013	2013; 56: 1434-1447
Methylisobutylketon	108-10-1	mg/m ³	1,0	0,1	2013	2013; 56: 148-158.
Ethylbenzol	100-41-4	mg/m ³	2,0	0,2	2012	2012; 55: 1192-1200
Alkylbenzole		mg/m ³	1,0	0,1	2012	2012; 55: 1201-1214
Kresole		µg/m ³	50	5,0	2012	2012; 55: 1061-1068
Phenol	108-95-2	mg/m ³	0,20	0,02	2011	2011; 54: 1262-1268
2-Furaldehyd	98-01-1	mg/m ³	0,10	0,010	2011	2011; 54: 510-515
Zyklische Dimethylsiloxane D3-D4 (Summe)		mg/m ³	4,0	0,4	2011	2011; 54: 388-400
Benzaldehyd	100-52-7	mg/m ³	0,20 (v)	0,020 (v)	2011	2010; 53: 636-640.
Benzylalkohol	100-51-6	mg/m ³	4,0	0,40	2010	2010; 53: 984-988
Monozyklische Monoterpene (Leit-substanz D-Limonen)		mg/m ³	10	1,0	2010	2010; 53: 1206-1215
Aldehyde C ₄ -C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)		mg/m ³	2,0	0,1	2009	2009; 52:650-659
Dioxinähnliche PCB #						2007; 50: 1455-1465
C ₉ -C ₁₄ -Alkane / Isoalkane (aromaten-arm)		mg/m ³	2,0	0,20	2005	2005; 48: 803-813
Terpene, bicyclisch (Leitsubstanz Alpha-Pinen)		mg/m ³	2,0	0,20	2003	2003; 46: 346-352
Tris(2-chlorethyl)-phosphat (TCEP)	115-96-8	µg/m ³	50	5,0	2002	2002; 45: 300-306
Diisocyanate #					2000	2000; 43: 505-512
Quecksilber (als metall. Dampf)		µg/m ³	0,35	0,035	1999	1999; 42:168-174
Styrol	100-42-5	mg/m ³	0,30	0,030	1998	1998; 41:392-421
Dichlormethan	75-09-2	mg/m ³	2,0 (24 h)	0,2	1997	1997; 40: 278-284
Pentachlorphenol (PCP)	87-86-5	µg/m ³	1,0	0,10	1997	1997; 40:234-236

detailliertere Angaben, s. Originalpublikation; v: vorläufig

■ Hygienisch abgeleitete Leitwerte

Wenn der toxikologische Kenntnisstand aber nicht ausreicht, um rein toxikologisch begründet Richtwerte abzuleiten, praktische Erfahrungen aber zeigen, dass mit steigender Konzentration eines Innenraumschadstoffes die Wahrscheinlichkeit für Beschwerden oder nachteilige gesundheitliche Auswirkungen zunimmt, werden sog. hygienisch begründete Leitwerte abgeleitet. Aktuell sind hier hygienisch begründete Leitwerte für Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Feinstaub (Particulate Matter - PM 2,5) publiziert (s. auch Abbildung 2, D18: Exkurs: Sonderfall Schule).

Tabelle 4 zeigt die hygienisch abgeleiteten Leitwerte im Überblick.

■ Hygienisch abgeleitete Leitwerte

Angesichts der Fülle möglicher Innenraumluft-Verunreinigungen mit flüchtigen Stoffen wurde 1999 das TVOC-Konzept entwickelt, eine Summenbewertung der (damals bestimmten) leichtflüchtigen organischen Verbindungen (*total volatile organic compounds*, TVOC) [8]. Darin wird eine Bewertung von organischen Stoffen mit einem Siedepunkt zwischen 50–100 °C und 250–260 °C zusammengefasst und

in ein System mit 5 Bewertungsklassen eingeteilt. Allerdings ist eindringlich darauf hinzuweisen, dass diese Einteilung nicht auf einer toxikologischen Bewertung beruht.

Da das TVOC-Konzept prinzipiell auf der statistischen Auswertung der Daten des I. Umweltsurveys von 1985/86 mit der Untersuchung von ca. 500 Wohninnenräumen in Deutschland fußt, können die TVOC-Werte im Sinne von Referenzwerten interpretiert werden [9]. Darüber hinaus wurde bereits im Jahr 2000 betont, dass die Stoff-Ver-

Tabelle 3: Risikobezogene Leitwerte für krebserzeugende Stoffe in der Innenraumluft [4]

Verbindung	CAS Nr	Einheit	Leitwert	Jahr d. Festlegung	Publiziert in Bundesgesundheitsblatt
Vinylchlorid	75-01-4	µg/m ³	2,3	2021	2021; 64: 1616-1623
Benzo(a)pyren	50-32-8	µg/m ³	0,0008 (v)	2021	2021; 64:1036-1046
Benzol	71-43-2	µg/m ³	4,5 (v)	2020	2020; 63: 361 - 367
1,2-Dichlorethan	107-06-2	µg/m ³	1,0 (v)	2018	2019; 62:114 - 117
Trichlorethen	79-01-6	µg/m ³	20	2015	2015; 58:762-768

v: vorläufig

Tabelle 4: Hygienisch abgeleitete Leitwerte für die Innenraumluft [4]

Verbindung/ Stoffe	Einheit	Leitwert	Maßnahmen	Publiziert in Bundesgesundheitsblatt	
Kohlenmonoxid (CO)*	mg/m ³	100	Viertelstunde		
		35	1 Stunde		
		10	8 Stunden		
		4	24 Stunden		
Kohlendioxid (CO ₂)	ppm	<1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen	
		1000-2000	Hygienisch auffällig		Lüftungsmaßnahmen (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen)
		>2000	Hygienisch inakzeptabel		Belüftbarkeit des Raumes prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen
Feinstaub 2,5	µg/m ³	25	Der 24h-Mittelwert gilt nur in reinen Wohninnenräumen in Abwesenheit wohninnenraumtypischer Staubquellen	2008; 51: 1370-1378	

v: vorläufig

teilung im Innenraum im Vergleich zu 1985/86 bereits eine deutlich andere ist und auch durch Änderungen in der Methode (zusätzliche Erfassung sehr flüchtiger, polarer und hochsiedender Stoffe) eine direkte Vergleichbarkeit nicht mehr zulassen [2].

Dennoch: bei Beschwerden von Raumnutzern, aber ohne klare Hinweise auf definierte Quellen im Raum kann die Bestimmung der TVOC einen ersten Hinweis auf die Raumluftqualität – und ggf. Quellen im Raum – geben

(siehe Tabelle 5). Eine gesundheitliche Bewertung sollte jedoch nur anhand der o.g. Richt- und Leitwerte vorgenommen werden.

■ Bewertung von Geruchsstoffen mithilfe von Geruchsleitwerten

Im Jahr 2014 hat die Ad-hoc-Arbeitsgruppe einen Entwurf zur gesundheitlich-hygienischen Beurteilung von Geruchsstoffen vorgelegt und zur Diskussion gestellt [10]. Bislang wurden

jedoch keine konsentierten Geruchsleitwerte abgeleitet.

■ Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt dieser Beitrag die Grundlagen der Messung und Bewertung von Innenraumkontaminationen auf. In Kenntnis möglicher Quellen von Verunreinigungen im Innenraum und vor dem Hintergrund einer klaren Fragestellung ist eine Mess-Strate-

Abbildung 2: Exkurs: Sonderfall Schule

Kohlendioxid (CO₂)

Schon im 19. Jahrhundert hat Pettenkofer sich intensiv mit Fragen der Innenraumhygiene beschäftigt und zu erreichende Standards formuliert. Die „Pettenkoferzahl“ 1000 ppm **Kohlendioxid** bezeichnet seither den lufthygienisch akzeptablen Bereich. Bereits vor mehr als 150 Jahren klagte Pettenkofer über unzutragliche Luftqualität und hohe Kohlendioxidbelastungen in Klassenräumen und stellte fest: *„Ich bin auf das Lebendigste überzeugt, dass wir die Gesundheit unserer Jugend wesentlich stärken würden, wenn wir in den Schulhäusern, in denen sie durchschnittlich fast den fünften Theil des Tages verbringt, die Luft stets so gut und rein erhalten würden, dass ihr Kohlensäuregehalt nie über 1 pro mille anwachsen könnte“*... *„der Kohlensäuregehalt alleine macht die Luftverderbnis nicht aus, wir benutzen ihn bloß als Maßstab, wonach wir auch noch auf den größeren und geringeren Gehalt an anderen Stoffen schließen, welche zur Menge der ausgeschiedenen Kohlensäure sich proportional verhält“* (Pettenkofer 1858).

Bis heute hat sich der Kohlendioxidgehalt der Luft als geeigneter Indikator für schlechte, verbrauchte Luft erwiesen (Ad Hoc 2008). Kohlendioxid selbst ist nicht hochtoxisch, bei hohen Kohlendioxidkonzentrationen kommt es jedoch zu einer pH-Verschiebung im Blut mit zu geringer Sauerstoffsättigung im Blut. In der Folge können Abgeschlagenheit, Müdigkeit und Kopfschmerzen auftreten. Die Problematik hoher Kohlendioxidbelastungen in Klassenräumen besteht bis heute unvermindert fort; Vorgaben zur Pausenlüftung, die angesichts immer dichter Gebäudehüllen immer wichtiger werden, werden zu wenig umgesetzt und CO₂-Konzentrationen über 2000 ppm sind dann keine Seltenheit.

Stäube

Im Zusammenhang mit der Frage der Qualität der Raumluft in Klassenzimmern wurde auch früh die **Staub**-Problematik angesprochen. Prausnitz hatte bereits 1891 formuliert: *„Es ist vielmehr notwendig, dass die Schulzimmer möglichst oft - am besten täglich - durch nasses Aufwischen von dem Staub und Schmutz gereinigt werden, welchen die Schulkinder jeden Tag in das Schulzimmer hereinbringen. Dieser Schmutz und Staub bildet in trockenem Zustande bei der häufig lebhaften Bewegung der Schulkinder die hauptsächlichste Veranlassung zur Verunreinigung der Luft des Schulzimmers“* (Prausnitz 1891).

Umfangreiche Feinstaubmessungen (PM10) in Frankfurter Schulen in den Jahren 2006–2009 hatten genau dies bestätigt: Kinder tragen Partikel/Stäube in den Klassenraum ein und wirbeln durch ihre Bewegung im Raum bereits sedimentierte Stäube wieder auf. Eine tägliche Feuchtreinigung im Vergleich zur zuvor üblichen 2x wöchentlichen Feuchtreinigung führte zu einer Reduktion des Feinstaubgehalts in der Raumluft um ca. 20%. Infolge dieser Untersuchung führte die Stadt Frankfurt als erste Stadt in Deutschland im Jahr 2006 (wieder) die tägliche Feuchtreinigung der Klassenräume ein.

Literatur

- Pettenkofer v M. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Literarisch-artistische Anstalt der Cotta'schen Buchhandlungen, München, 1858
- Ad-hoc Arbeitsgruppe „Innenraumrichtwerte“ der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitschutz 51 (2008), S. 1358-1369.
- Prausnitz W. Grundzüge der Hygiene, Verlag JF Lehmann, München, 1891, S. 346-347.
- Heudorf U. Feinstaubbelastung in Schulen - Untersuchungsergebnisse und Lösungsansätze am Beispiel der Stadt Frankfurt am Main. Gesundheitswesen (2008) 70: 231-238.
- Heudorf U, Neitzert V, Spark J: Particulate matter and carbon dioxide in classrooms - The impact of cleaning and ventilation. Intern J Hygiene Environ Health (2009) 212: 45-55.

Tabelle 5: TVOC-Konzept zur orientierenden Bewertung der Innenraumlufthqualität [8, 9]

Stufen	mg/m ³	Orientierende Bewertung	Bundesgesundheitsblatt
1	≤0,3	Hygienisch unbedenklich	
2	0,3-1,0	Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe oder Stoffgruppen vorliegen	1999; 42: 270-278
3	1,0-3,0	Hygienisch auffällig	2007; 50: 990-1005
4	3,0-10	Hygienisch bedenklich	
5	>10	Hygienisch inakzeptabel	

gie zu erarbeiten. Zur Bewertung der so standardisiert erhaltenen Ergebnisse wurden die Bewertungsschemata und -kriterien der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumkommission bzw. des Ausschusses für Innenraumrichtwerte AIR sowie die aktuellen toxikologisch abgeleiteten Richtwerte (RW I und RW II), risikobasierte Leitwerte für krebserzeugende Stoffe im Innenraum, die hygienisch abgeleiteten Leitwerte und das TVOC-Konzept vorgestellt.

In einem weiteren Beitrag sollen anhand eines Fallbeispiels die konkreten Schritte bei der Bearbeitung einer Innenraumluftproblematik in einer Schule dargelegt werden – einschließlich der oft sehr herausfordernden und schwierigen Kommunikation.

■ Literatur

1. Gemeinsame Mitteilung der Arbeitsgruppe Luftanalysen der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Er-

mittlung und Beurteilung chemischer Verunreinigungen der Luft von Innenraumarbeitsplätzen (ohne Tätigkeit mit Gefahrstoffen) Bundesgesundheitsblatt 2014; 57(8):1002-1018.

2. Oppl R, Höder B, Lange A. Innenraumluft und TVOC: Messung, Referenz- und Zielwerte, Bewertung. Ein Diskussionsbeitrag zum TVOC-Konzept. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz 2000; 43: 513-518.
3. Seifert B. Die Untersuchung von Hausstaub im Hinblick auf Expositionsabschätzungen. Bundesgesundheitsblatt 1998; 41: 383-391.
4. Umweltbundesamt: Ausschuss für Innenraumrichtwerte. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte#ausschuss-fur-innenraumrichtwerte-air>
5. Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AGLMB. Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema. Bundesgesundheitsblatt 1996; 39: 422-426.
6. Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas. Bundesgesundheitsblatt 2012; 55:279-290.

7. Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte Gesundheitliche Bewertung krebserzeugender Verunreinigungen der Innenraumluft – erste Ergänzung zum Basisschema Bundesgesundheitsblatt 2015; 58 (7): 769-773.
8. Seifert B. Richtwerte für die Innenraumluft: Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). Bundesgesundheitsblatt 1999; 42: 270-278.
9. Ad-hoc-Arbeitsgruppe aus Mitgliedern der Innenraumluftthygienekommission (IRK) des Umweltbundesamtes sowie der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden (AOLG); Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsblatt 2007; 50: 990-1005.
10. Entwurf der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden zur öffentlichen Diskussion bis Ende Dezember 2015. Gesundheitlichhygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten. Bundesgesundheitsblatt 2014; 57(1): 148-153.