

Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft

Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden

Vorbemerkung

Mit seiner Atmung und seinen Ausdünstungen stellt der Mensch eine wesentliche Quelle von Verunreinigungen in der Innenraumluft dar. Als Abbauprodukt der menschlichen Atmung spiegelt der Kohlendioxidgehalt der Innenraumluft die Anwesenheit eines oder mehrerer Menschen in einem Raum und die Intensität seiner Nutzung wider. Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft korreliert mit dem Anstieg der Geruchsintensität menschlicher Ausdünstungen. Bei Abwesenheit anderer CO₂-Quellen gilt deshalb die Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumluft als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der vom Menschen abgegebenen organischen Emissionen einschließlich der Geruchsstoffe und als Leitparameter zur Beurteilung der Lüftungssituation.

Kohlendioxid wird als Expositionsmarker auch in Wirkungsstudien herangezogen. In der Regel können die gefundenen Wirkungen allerdings nicht alleine dem Kohlendioxid, sondern der Gesamtbelastung der Luft eines Innenraums zugeschrieben werden. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten

Landesgesundheitsbehörden (Ad-hoc-AG IRK/AOLG) leitet aus diesem Grunde für Kohlendioxid in der Innenraumluft nicht – wie sonst nach dem Basisschema üblich – toxikologisch begründete Richtwerte, sondern gesundheitlich-hygienisch begründete Leitwerte zur Beurteilung der aktuellen Luftqualität in einem Innenraum ab.

1 Einleitung

Kohlendioxid (chemische Kurzbezeichnung: CO₂) ist ein farb- und geruchloses Gas. Mit einer Konzentration um 400 ppm¹ ist es ein natürlicher Bestandteil der Umgebungsluft. CO₂ entsteht bei der vollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen bei ausreichender Sauerstoffzufuhr. Im Organismus von Lebewesen bildet es sich als Abbauprodukt der Zellatmung.

¹ Für die Angabe einer Kohlendioxidkonzentration in der Luft werden mehrere Maßeinheiten verwendet. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte verwendet die im internationalen Gebrauch übliche Einheit ppm (aus dem Englischen parts per million – Volumenteile pro Million Volumenteile). 1000 ppm CO₂ entsprechen 1 Volumenpromille (Vol.-%) oder 0,1 Volumenprozent (Vol.-%) oder 1,83 g CO₂ pro Kubikmeter (bei 1013 mbar und 20°C).

In genutzten Innenräumen hängt die CO₂-Konzentration im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Personen im Innenraum,
- Raumvolumen,
- Aktivität der Innenraumnutzer,
- Zeitdauer, die Raumnutzer im Innenraum verbringen,
- Verbrennungsvorgänge im Innenraum,
- Luftwechsel bzw. Außenluftvolumenstrom.

Ein rascher Anstieg der CO₂-Konzentration in der Raumluft ist die typische Folge der Anwesenheit vieler Personen in relativ kleinen Räumen (z. B. Versammlungs-, Sitzungs- oder Schulräumen) bei geringem Luftwechsel. Kritische CO₂-Konzentrationen treten in der Regel zusammen mit anderen Luftverunreinigungen, insbesondere Geruchsstoffen u. a. aus dem Schweiß oder von Kosmetika sowie Mikroorganismen, auf.

Bei luftdichter Bauweise und damit einhergehend sehr geringen Luftwechselzahlen kann die CO₂-Konzentration auch bei Anwesenheit weniger Personen (z. B. in Wohnungen oder Büroräumen) zunehmen.

Während Versammlungs- oder Sitzungsräume in der Regel nur gelegentlich

und kurzzeitig genutzt werden, sind Schulinnenräume wegen der regelmäßigen und stundenlangen Aufenthaltsdauer von Schülern und Lehrern hinsichtlich ihrer CO₂-Konzentration in der Klassenraumluft besonders kritisch zu betrachten. In mehreren Bundesländern laufende oder abgeschlossene Untersuchungen zur Belastung der Innenraumluft von Schulräumen mit Kohlendioxid haben übereinstimmend erhebliche Defizite hinsichtlich einer diesbezüglich ausreichenden Innenraumluftqualität in Schulen aufgezeigt [1, 2, 3, 4]. Offenbar werden Empfehlungen der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes [5] und der Landesgesundheitsbehörden zum richtigen Lüften in Schulen nicht konsequent umgesetzt. Nach Auffassung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte kann Unkenntnis über die Dynamik und Bedeutung von Anstieg und Verlauf der CO₂-Konzentration in der Raumluft und damit über die Notwendigkeit von Maßnahmen hierfür ursächlich sein.

Nachfolgend werden gesundheitlich-hygienische Leitwerte für Kohlendioxid in der Raumluft zur Beurteilung einer ausreichenden Luftqualität bzw. Lüftung in Innenräumen vorgestellt. Diese sind vor allem für Innenräume von Bedeutung, in denen sich eine größere Anzahl von Menschen aufhält, wie z. B. Schul- und Versammlungsräume oder (Großraum-)Büros, können aber auch zur Beurteilung von Räumen in energiedichten Gebäuden hilfreich sein. Um ein unmittelbares Handeln zu ermöglichen, dienen als Bezugsgröße keine Expositionsdaten über einen längeren Zeitraum (z. B. Tagesmittelwerte), sondern die zum jeweiligen Zeitpunkt im Innenraum anzutreffende CO₂-Konzentration (Momentanwert).

2 Begriffsbestimmungen

Innenräume. In Anlehnung an die Festlegung des Sachverständigenrates für Umweltfragen [6], die Richtlinie VDI 4300 Blatt 1 [7] und die ISO 16000-1 [8] werden als Innenräume definiert:

- private Wohn- und Aufenthaltsräume wie Wohn-, Schlaf- und Badezimmer, Küche, Bastel-, Sport- und Keller-räume,

- Räume in öffentlichen Gebäuden (z. B. Schulen, Kindergärten, Jugendhäuser, Krankenhäuser, Sporthallen, Bibliotheken, Gaststätten und andere Veranstaltungsräume),
- Arbeitsräume und Arbeitsplätze in Gebäuden, die nicht im Hinblick auf Luftschadstoffe den Regelungen des Gefahrstoffrechtes (insbesondere zu Arbeitsplatzgrenzwerten) unterliegen,
- Fahrgasträume von Kraftfahrzeugen und öffentlichen Verkehrsmitteln.

Für Arbeitsräume (Räume, in denen Arbeitsplätze innerhalb von Gebäuden dauerhaft eingerichtet sind) sind die Anforderungen an Arbeitsstätten gemäß Arbeitsstättenverordnung zu beachten. Grundsätzlich gelten Räume in Arbeitsstätten (wie z. B. Büroräume) als Innenräume im obigen Sinn, wenn die dort auftretenden Luftschadstoffe nicht als Arbeitsstoffe verwendet werden oder wenn ein Arbeitsstoff aus einem gefahrstoffrechtlich geregelten Bereich in diese Räume übertritt.

Gesundheitlich-hygienische Leitwerte.

Gesundheitlich-hygienische Leitwerte sind systematisch entwickelte Hilfen zur Entscheidungsfindung über eine angemessene Vorgehensweise bei speziellen gesundheitlichen oder hygienischen Problemen. Sie sind eine Orientierungshilfe im Sinne von Handlungswerten und Entscheidungsoptionen, von denen nur in begründeten Fällen abgewichen werden sollte. Die Leitwerte für Kohlendioxid in der Raumluft sind wissenschaftlich begründete, praxisorientierte Handlungsempfehlungen. Leitwerte begrenzen einen Konzentrationsbereich einer Verbindung oder Verbindungs-kategorie in der Innenraumluft, für den systematische praktische Erfahrungen vorliegen, dass mit steigender Konzentration die Wahrscheinlichkeit für Beschwerden und nachteilige gesundheitliche Auswirkungen zunehmen (s. [9]: Kap. 5]). Davon abzugrenzen sind toxikologisch begründete Richtwerte.

Momentanwerte. Momentanwerte beschreiben die aktuellen CO₂-Konzentrationen, die während der Messung an einem repräsentativen Ort im Raum mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung (Mit-

telungsdauer üblicherweise < 2 min) ermittelt werden.

Außenluftvolumenstrom/Lüftungsrate.

Der Außenluftvolumenstrom bzw. die Lüftungsrate beschreibt die Größe des Stroms (in l/s oder m³/h) von Außenluft in einen Raum oder ein Gebäude entweder durch die Lüftungsanlage oder durch Infiltration durch die Gebäudehülle. Für Räume, die für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, werden die erforderlichen Außenluftvolumenströme personenbezogen als l/s Person oder m³/h Person angegeben.

Die Luftwechselzahl (n in 1/h) ist der Quotient aus dem Zuluftvolumenstrom in m³/h und dem Raumvolumen in m³.

3 Messstrategie und Messung von Kohlendioxid in der Innenraumluft

Messungen von Kohlendioxid in der Raumluft sind vor allem angezeigt, wenn die Kombination aus Nutzung (z. B. hohe Personenzahl) und baulichen Gegebenheiten mit eingeschränkter Lüftungsmöglichkeit (z. B. nur ein Fenster, das geöffnet werden kann; Flure mit Brandschutztüren) vermuten lassen, dass Überschreitungen eines Leitwertes für Kohlendioxid in der Raumluft zu besorgen sind.

Die VDI-Richtlinie VDI 4300-9 gibt Hinweise, welche Messbedingungen bei welchem Messziel einzuhalten sind [10]: „Die Überprüfung des Richtwertes ist daher nur unter üblichen Nutzungsbedingungen und mit der üblichen Personenbelegung sinnvoll. Der Raum sollte vor Beginn der Messung für einige Minuten kräftig gelüftet werden, am besten durch Querlüftung.“ Bei der Untersuchung von Räumen, die über eine Raumlufttechnische Anlage verfügen, ist die Anlage während der Messung unter den für den Raum üblichen Betriebsbedingungen zu betreiben.

Zum Zeitpunkt der Messung wird ausgeführt: „Wenn überprüft werden soll, ob in einem Raum hinsichtlich der CO₂-Konzentration hygienisch einwandfreie Bedingungen herrschen, wird die Konzentration bei der vorgesehenen Nutzung (Personenbelegung) des Raumes über einen bestimmten Zeitraum hinweg konti-

nuierlich registriert, z. B. über den Zeitraum der üblichen Nutzungsdauer. Dabei wird mit der Messung begonnen, nachdem der Raum kräftig durchgelüftet wurde, sodass sich als Ausgangspunkt die CO₂-Konzentration der Außenluft ergibt.“ Der Ort der Messung sollte sich „in einer Höhe von 1,5 m und einem Abstand von mindestens 1 m–2 m von den Wänden befinden“. Abweichend davon kann entsprechend der Fragestellung der Messort auch beispielsweise dem Aufenthaltsort einer Person angepasst werden (z. B. Büroarbeitsplatz), wobei darauf zu achten ist, dass die Messung nicht durch die direkt ausgeatmete Luft der betreffenden oder einer anderen Person beeinflusst wird (Mindestabstand: 1 m).

Für Schulen empfiehlt die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte als Messzeitraum die Nutzungsdauer eines Schultages mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung unter 2 Minuten. Ziel ist die Erstellung eines Konzentrationszeitprofils (s. Beispiel in Abschnitt 4) zur Ermittlung von Nutzungszeiten mit unzureichender Lüftung sowie die Bestimmung der jeweils aktuellen CO₂-Konzentrationen der Innenraumluft (Momentanwerte), die der hygienischen Bewertung anhand der in Abschnitt 6.2 (in **■ Tabelle 4**) aufgeführten Leitwerte dient.

Als Verfahren zur Messung der CO₂-Konzentration der Innenraumluft stehen z. B. die nicht-dispersive Infrarotspektroskopie (NDIR) oder die photoakustische Spektroskopie (PAS) zur Verfügung [10]. In der Regel wird die CO₂-Konzentration der Innenraumluft mit einem automatischen Gerät registriert, das in einem bestimmten zeitlichen Abstand (z. B. alle 10 s) einen Messwert erhebt. Damit wird es auch möglich, die zeitliche Veränderung der CO₂-Konzentration der Innenraumluft zu verfolgen.

4 Exposition gegenüber Kohlendioxid in der Innenraumluft

Für den Außenluftbeitrag zur CO₂-Konzentration der Innenraumluft werden derzeit für ländliche Gebiete übliche Werte von 350 ppm, für kleine Städte von 375 ppm und für Stadtzentren von 400 ppm genannt. Diese Werte werden bestätigt durch 58 Messungen in der Außenluft vor baye-

rischen Schulen, bei denen sich die mittleren Konzentrationen (Mediane) zwischen 383 ppm in der Sommermessperiode und 405 ppm bei den Wintermessungen bewegten [3].

Wohnungen. Baek et al. [11] untersuchten 12 Einfamilienhäuser zu je 2 Messzeitpunkten. Die mittlere CO₂-Konzentration über die jeweils 2-stündigen Messungen betrug 790 ppm (369–3634 ppm). Frisk et al. [12] registrierten die CO₂-Konzentrationen in den Schlafräumen von 195 Wohnungen in Schweden und Estland über jeweils eine Woche. Die Wochenmittel lagen im Bereich von 820–920 ppm. Kim et al. [13] untersuchten 172 koreanische Wohnungen und ermittelten eine mittlere CO₂-Konzentration von 564 ppm. Lundqvist und Revsbech [14] berichteten über Messungen in 33 Wohnungen mit dichten Fenstern und 11 ohne solche. Sie fanden in den Schlafräumen CO₂-Konzentrationen von 800–4300 ppm bzw. 600–2700 ppm. Fehrmann und Wanner [15] untersuchten Schlafzimmer unter unterschiedlichen Belegungs- und Lüftungsbedingungen und geben Medianwerte für jeweils eine Nacht zwischen 519 ppm und 2973 ppm an.

Kindertagesstätten. In Berlin wurden von Oktober 2000 bis April 2001 insgesamt 70 Gruppenräume von Kindertagesstätten kontinuierlich während der Betreuungszeiten untersucht [16]. Die über den Tag gemittelten CO₂-Werte lagen zwischen 300 ppm und 1900 ppm (Median: 500 ppm), wobei nur in 4 Fällen 1000 ppm überschritten wurden.

Schulen. Zum Vorkommen von CO₂ in der Raumluft von Klassenräumen liegen Ergebnisse umfangreicher Messungen vor [1, 2, 3, 4, 17]. Typisch für Gemeinschaftsräume mit Pausenlüftung ist ein sägezahnartiger Verlauf (**■ Abb. 1**).

Das Lüftungsverhalten hängt stark von der Außentemperatur ab. In **■ Abb. 2** wird beispielhaft der Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und der Kohlendioxid-Konzentration in einer Grundschule dargestellt [18].

Ein aktuelles Beispiel zur Belastung der Innenraumluft von 251 Klassenräumen mit Kohlendioxid während einer Schulstunde ist in **■ Tabelle 1** dargestellt. Auf-

geführt ist die Verteilung der Mediane und der 95. Perzentilwerte der Kohlendioxidkonzentrationen von Unterrichtseinheiten (45 Min.) in ausgewählten Thüringer Schulen. Es wird deutlich, dass derzeit in Schulen CO₂-Konzentrationen von über 2000 ppm bis in den Bereich von 5000 ppm nicht selten sind. Die ermittelten CO₂-Konzentrationen liegen deutlich über denen der Außenluft, in einigen Fällen beträgt das Verhältnis der CO₂-Konzentrationen innen zu außen mehr als das Zehnfache. Weitere Ergebnisse aus Deutschland sind in **■ Tabelle 2** aufgeführt.

Büroräume. In der ProKlimA-Studie wurden 610 natürlich belüftete Arbeitsplätze untersucht; das CO₂ wurde IR-spektrometrisch gemessen. Der Median der CO₂-Konzentrationen betrug 750 ppm und das 90. Perzentil 1160 ppm. An 850 Arbeitsplätzen in klimatisierten Bürogebäuden fanden sich entsprechende Konzentrationen von 465 ppm bzw. 700 ppm [20].

In einer Untersuchung des berufsmedizinischen Instituts für Arbeitsmedizin (BGIA) in 293 Büroräumen fand sich ein Median von 780 ppm und ein 90. Perzentil von 1380 ppm CO₂. Die Büroräume waren über Nacht und zum Zeitpunkt der Messung ungelüftet, nachdem am Vortag intensiv gelüftet wurde; zur Messung wurden direkt anzeigende Messeinrichtungen (CO₂-Sonde, Prüfröhrchen) eingesetzt. Bei der Messung mit einer CO₂-Sonde wurde der Momentanwert als Ergebnis angegeben [21].

Verkehrsmittelnräume. CO₂-Messungen wurden z. B. in der Berliner U-Bahn (Wagen ohne Klimaanlage) und in einem Pkw durchgeführt, der durch die Berliner City fuhr [22]. In der U-Bahn wurden im Rahmen von Wintermessungen Gehalte bis 1600 ppm (Median: 500 ppm) und im Sommer bis 2000 ppm (Median: 400 ppm) beobachtet. Im Autoinnenraum stiegen die Spitzenkonzentrationen im Winter bis 10.400 ppm (Median: 700 ppm) und im Sommer bis 2300 ppm (Median: 400 ppm). Das Auto verfügte über keine Klimaanlage, und die Lüftung wurde vom Fahrer individuell festgelegt.

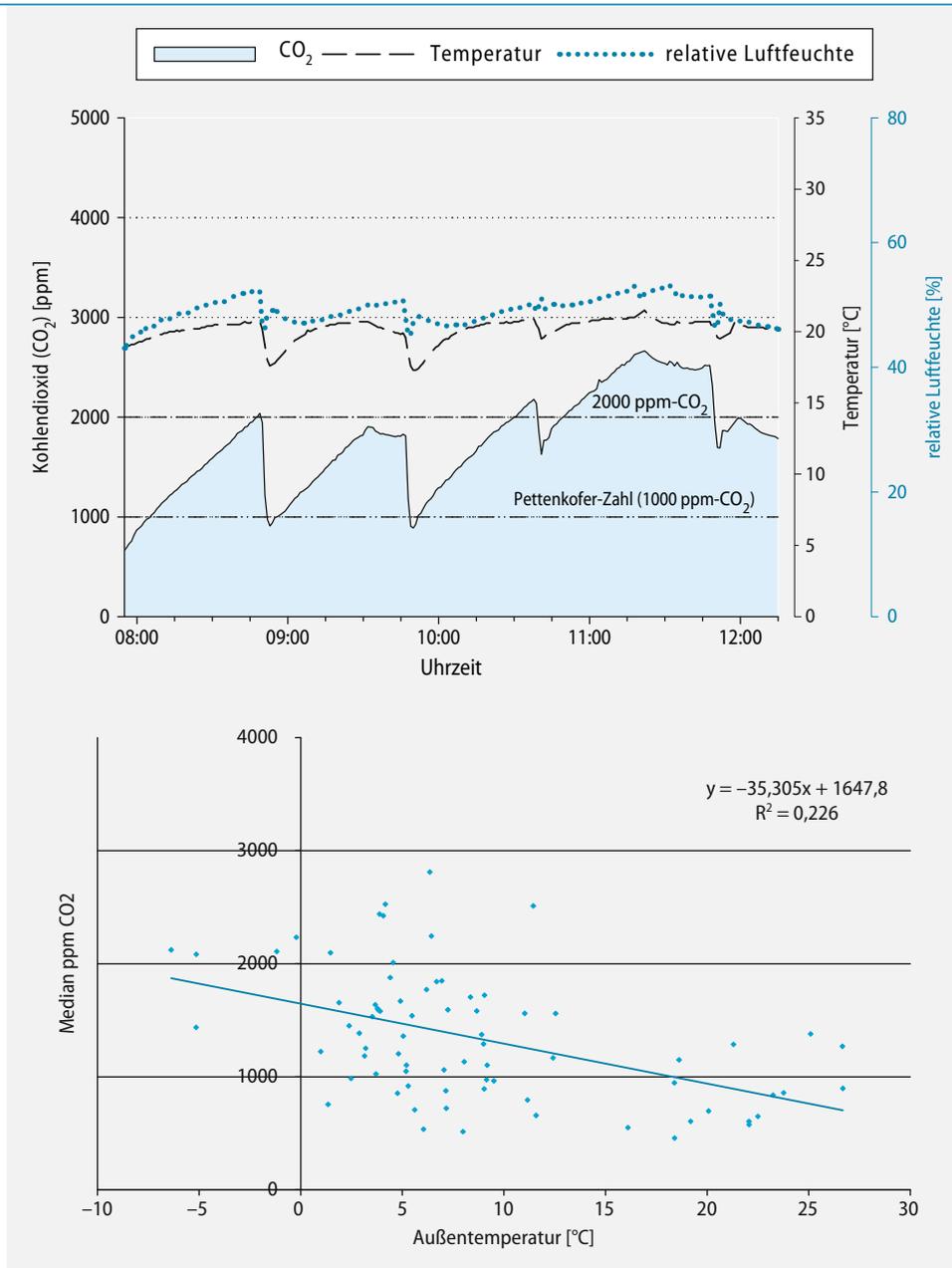


Tabelle 1

Kohlendioxid-Konzentrationen in der Innenraumluft von Schulen während einer Unterrichtsstunde, Untersuchungsobjekt: 10 Erfurter Schulen, Untersuchungszeitraum: Heizperiode 2005/2006

CO ₂ -Konzentration (ppm) in einer Schulstunde	N	5. Perz.	25. Perz.	Median	75. Perz.	95. Perz.	99. Perz.	Max.
Mediane	251	882	1261	1576	2141	3069	3966	4186
95. Perzentile	251	1154	1653	2046	2685	3632	4994	4996

Methoden: Messung während 251 Schulstunden, Wechsel des Klassenraumes und der Klasse nach jeder Stunde, Erfassung von Bau- und Nutzungsmerkmalen, kontinuierliche Messung von Raumtemperatur, Luftfeuchte und CO₂-Konzentration unter definierten Bedingungen (Fenster während des Unterrichts geschlossen, Lüftung nur in den Pausen), Erhebung der Anzahl an Fehltagen aller Schüler der einbezogenen Schulen.

Dargestellt sind jeweils der Median und das 95. Perzentil über die Schulstunde, errechnet aus jeweils 270 Einzelwerten (Dataloggeraufzeichnung der CO₂-Konzentration im 10-Sekunden-Takt). Das 95. Perzentil stellt ein Maß für den Anstieg der CO₂-Konzentration innerhalb einer Schulstunde dar. Die CO₂-Konzentrationen der Außenluft betragen zwischen 330 und 400 ppm [19].

Tabelle 2

Kohlendioxid-Konzentrationen in Klassenräumen deutscher Schulen

Anzahl der Klassenräume	Median (Min-Max) ^a	% Überschreitung >1000 pmm während der Unterrichtszeit	% Überschreitung >2000 pmm während der Unterrichtszeit	Messzeitraum	Ort	Bemerkungen	Quelle
90	1412 (367–5359)	82	30	Winter 2004/2005	München und Umgebung	Messungen während der Unterrichtszeit; je Klassenraum 1 ganzer Unterrichtstag	[3]
75	728 (314–2742)	29	5	Sommer 2005			
39	1600 (300–6000)	80	17	Winter 2002/2003	Berlin	Messungen während der Unterrichtszeit; je Klassenraum 1 ganzer Unterrichtstag	[2]
220	1654 (355–4998)	86	32	Winter 2005/2006	Erfurt	Messung während der Unterrichtszeit, je Klassenraum eine Schulstunde, Fenster während der Messung geschlossen	[19]
19	1459 (431–4380)	79	23	Winter 2005/2007	Baden-Württemberg (überwiegend Stuttgart)	Auswertung der Unterrichtszeit, je Klassenraum 1 ganzer Unterrichtstag (aus Messungen ganzer Schultage)	[18]
18	820 (304–3554)	36	3	Sommer 2006			
36	1510 (730–4177)	89 ^b		Winter 2001/2002	Hannover und Umgebung	Sommer- und Wintermessung erfolgten an denselben (7) Schulen.	[1]
22	581 (339–1270)	32 ^b		Sommer 2001/2002		Die Messungen erfolgten üblicherweise über ca. 48 Stunden/ Klassenraum ^c	

^a Aus Kurzzeitmessungen (überwiegend minütlich); ^b prozentuale Überschreitung von 1500 ppm; ^c Auswertung der Unterrichtszeit

5 Gesundheitliche Wirkungen von Kohlendioxid in der Atemluft

Kohlendioxid entsteht in den Körperzellen (in einer Menge von 0,7 kg pro Tag) und diffundiert von dort in die umliegenden Kapillaren. Im Blut wird es nach chemischer Bindung an Proteine, wie z. B. Hämoglobin, oder in gelöster Form transportiert. Dabei ist CO₂ überwiegend physikalisch gelöst, nur ein kleiner Teil davon wird durch die Carboanhydrase in den roten Blutkörperchen zu Kohlensäure umgewan-

delt, die in wässrigem Milieu in Wasserstoff- und Hydrogencarbonat-Ionen zerfällt. Über die Alveolarmembran der Lunge wird das Kohlendioxid abgeatmet.

Eine wesentliche physiologische Funktion des Kohlendioxids im Organismus besteht darin, dass es über die Chemorezeptoren der Aorta und der Medulla oblongata, die das Atemzentrum im Hirnstamm reflektorisch erregen, die Atmung regelt. Erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Einatemluft erhöhen die Atemfrequenz und das Atemzugvolumen. Dabei

wirkt CO₂ erweiternd auf die Bronchien, wodurch sich das Totraumvolumen erhöht. Die dilatorische Wirkung des CO₂ auf periphere und zentrale Arteriolen führt jedoch nicht zu einem Blutdruckabfall, da eine erhöhte Adrenalinausschüttung eine kompensatorische Vasokonstriktion bewirkt.

In den folgenden Abschnitten werden Untersuchungen zur gesundheitlichen Wirkung des Kohlendioxids in einem relevanten Konzentrationsbereich (s. voriges Kapitel) der Raumluft beschrieben.

Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um Studien, bei denen Kohlendioxid lediglich als Indikator für die Luftqualität bzw. für die Lüftungssituation verwendet wurde und weitere Parameter (andere Verunreinigungen der Innenraumluft, Temperatur- und Feuchteanstieg etc.) meist nicht erfasst wurden. Nur wenige, meist experimentelle Arbeiten hatten die Exposition gegenüber Kohlendioxid allein zum Gegenstand.

Sayers et al. [23] führten Kurzzeitkammerstudien zum Einfluss hoher CO₂-Konzentrationen (oberhalb des Arbeitsplatzgrenzwertes von 5000 ppm) auf die geistige Leistungsfähigkeit durch. 21 junge erwachsene Probanden atmeten in je 5 Versuchszyklen 20 Minuten lang CO₂-Konzentrationen von 0, 45.000, 55.000, 65.000 oder 75.000 ppm bei einer konstanten O₂-Konzentration von 21 Vol-% ein. Vor, während und nach der Exposition wurden Verständnis- und Kurzzeitgedächtnistests [Reasoning test (Baddeley), short-term memory test, long-term memory test, mood assessment] durchgeführt. Während das logische Denken und das Kurzzeitgedächtnis von den hohen CO₂-Konzentrationen nicht signifikant beeinflusst wurden, war die Denkleistung signifikant verlangsamt. Yang et al. [24] untersuchten den Einfluss hoher CO₂-Konzentrationen auf die visuelle Wahrnehmung kohärenter Bewegungen. Sie fanden bei ihren Untersuchungen an 3 Probanden eine Wahrnehmungsbeeinträchtigung bei einer Exposition gegenüber Konzentrationen von 25.000 ppm CO₂; Angaben zur Expositionsdauer fehlen.

Langzeitwirkungen höherer CO₂-Konzentrationen von 7000 bzw. 12.000 ppm wurden an 4 Probanden vor, während und nach einem 26-tägigen Aufenthalt in einer Tauchkammer untersucht [25]. Dazu wurde eine Reihe kognitiver und optisch-motorischer Tests angewendet. Im Vergleich mit einer nicht exponierten Probandengruppe zeigten sich bei der unteren CO₂-Konzentration geringe nicht-signifikante und bei der höheren Konzentration signifikante Verschlechterungen bei der Durchführung der optisch-motorischen Tests.

Neuere Studien evaluierten die Frage einer möglichen Einschränkung der Leistungsfähigkeit bei CO₂-Konzentrationen

Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 2008 · 51:1358–1369
DOI 10.1007/s00103-008-0707-2
© Springer Medizin Verlag 2008

Bekanntmachung des Umweltbundesamtes

Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden

Zusammenfassung

Seit 150 Jahren gilt die Konzentration von Kohlendioxid in der Raumluft als Indikator für die Luftqualität in Aufenthaltsräumen des Menschen. Im Gegensatz zu mechanisch belüfteten Gebäuden, für die mit der DIN EN 13779 vier gestufte Wertebereiche eingeführt wurden, liegt seit dem 1858 von Pettenkofer vorgeschlagenen Richtwert von 1000 ppm Kohlendioxid keine neuere Bewertung für natürlich belüftete Innenräume vor. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden leitet aus der Bewertung aktueller Interventionsstudien gesundheitlich-hygienisch begründete

Leitwerte für Kohlendioxid in der Raumluft ab. Danach gelten Konzentrationen unter 1000 ppm Kohlendioxid in der Raumluft als unbedenklich, Konzentrationen zwischen 1000 und 2000 ppm als auffällig und Konzentrationen über 2000 ppm als inakzeptabel. Damit stellt die Ad-hoc-Arbeitsgruppe nach den TVOC-Werten eine weitere übergreifende Hilfe zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen zur Verfügung.

Schlüsselwörter

Kohlendioxid · Innenraumluft · Lüftung · Bewertung · Wirkungen · Leitwert

Health evaluation of carbon dioxide in indoor air

Abstract

For over 150 years, carbon dioxide has been an acknowledged indicator of indoor air quality. To estimate the air quality in mechanically ventilated buildings, DIN EN 13779 proposes four different levels of indoor carbon dioxide concentration. However, apart from the early guideline value of 1000 ppm carbon dioxide recommended by Pettenkofer in 1858, there is no actual guideline value for naturally ventilated buildings. Regarding recent intervention studies, the German Working Group on Indoor Guideline Values of the Federal Environmental Agency and the States' Health

Authorities therefore recommends the following guide values, based on health and hygiene considerations: concentrations of indoor air carbon dioxide below 1000 ppm are regarded as harmless, those between 1000 and 2000 ppm as elevated and those above 2000 ppm as unacceptable. In addition to the recommendations for TVOC values, this further assists in the assessment of indoor air quality.

Keywords

carbon dioxide · indoor air · ventilation · evaluation · health effects · guideline value

unter 5000 ppm an Büroarbeitsplätzen und in Schulen. Bei der Bewertung dieser Studien ist anzumerken, dass in den untersuchten Situationen eine Reihe weiterer Verunreinigungen der Innenraumluft vorlag und auch die raumklimatischen Bedingungen einbezogen werden müssen. Insbesondere eine erhöhte Raumtemperatur führt allein schon zu deutlichen Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit [26]. Die im Folgenden dargestellten Studien weisen deshalb Einschränkungen auf, die eine vergleichende Bewertung der Ergebnisse der Studien erschweren.

In 2 Kammerstudien an jeweils 10 Probanden in einem mittleren Alter von 22,5 bzw. 21,3 Jahren wurden Wohlbefinden und Aufmerksamkeit bei mehrstündiger Exposition bei sonst gleichen Temperatur- und Lüftungsbedingungen gegenüber einer eingestellten CO₂-Konzentration von 600, 1500, 2500 und 5000 ppm (Experiment 1) sowie 600, 1500, 3000 und 4000 ppm (Experiment 2) untersucht. Der Aufmerksamkeitstest bestand in einem 2-mal oder 3-mal 70-minütigen Fehlersuchen in einem Text, wobei die Zahl der Fehler sowie Anzahl der gelesenen Textspalten erfasst wurden. Vor, während und nach dem Test wurden Raumtemperatur und Raumfeuchte gemessen sowie subjektiver Komfort und Wohlbefinden per Fragebogen erfasst. In beiden Experimenten fanden sich Einbußen an Komfort und Wohlbefinden mit steigender CO₂-Konzentration. Im ersten Experiment zeigte sich weder ein signifikanter Einfluss der Kohlendioxidexposition zwischen 600 und 5000 ppm auf die gelesene Textmenge noch auf die Anzahl der erkannten Fehler. Im zweiten Experiment wurde mit einem Text erhöhten Schwierigkeitsgrades für Expositionen in Höhe von 3000 ppm eine signifikant geringere Zahl erkannter Fehler im Vergleich zu 600 ppm ermittelt. Ein Einfluss auf die Leseleistung zeigte sich nicht [27].

Myhrvold et al. [28] untersuchten an 548 Schülern aus 22 Klassen im Alter von 15–20 Jahren den Einfluss der Kohlendioxidkonzentration auf ausgewählte ZNS- und Haut- bzw. Schleimhautsymptome sowie das mentale Leistungsniveau. Letzteres wurde als Leistungsindex angegeben, welcher anhand einer Faktorenanalyse aus

einer einfachen Reaktionszeitaufgabe, einem Farb-Wort-Vigilanztest und einer Wahlreaktionszeitmessung errechnet wurde. Die in den Schulräumen gemessenen CO₂-Konzentrationen von 601 bis 3827 ppm wurden in 3 Bereiche eingeteilt: 601–999 ppm (48,9 %), 1000–1499 ppm (24,9 %) und 1500–3827 ppm (26,4 %). Im Ergebnis zeigte sich eine altersjustierte Abnahme der mentalen Leistung mit der CO₂-Konzentration, die jedoch das Signifikanzniveau nicht erreichte. Eine deutliche Zunahme von ZNS-Symptomen wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwäche fand sich bei CO₂-Konzentrationen über 1500 ppm. Die in den Schulräumen herrschenden raumklimatischen Bedingungen wurden nicht mitgeteilt.

Eine vergleichbare Studie ist kürzlich in Bremen abgeschlossen worden [29]. Die Untersuchungen wurden während 225 Unterrichtsstunden aus 16 Klassen mit freier Lüftung in 2 Grundschulen und einer Kooperativen Gesamtschule durchgeführt. Kontinuierlich erhoben wurden die CO₂-Konzentration, die Herzfrequenz als Beanspruchungsparameter, Schallpegel in der Klasse und parallele Beobachtungen des Unterrichtsverlaufes. Das Kommunikationsprotokoll und das Aktivitätsprotokoll wurden durch 2 im Unterricht anwesende Beobachterinnen mittels dafür entwickelter Registrierungssoftware kontinuierlich aufgezeichnet. Die Prüfung der Aufmerksamkeit vor und nach dem Unterricht erfolgte mittels eines Zahlensymboltests. Die Erfassung der Daten erfolgte sowohl bei den in den Schulen üblichen Lüftungsverhältnissen als auch nach Einführung einer Lüftungsintervention bei vergleichbarer Unterrichtsstruktur, bestehend aus regelmäßiger Lüftung vor dem Unterricht, in den Pausen und einer zusätzlichen Stoßlüftung nach der Hälfte jeder 45-minütigen Unterrichtsstunde. Durch die Intervention wurden sowohl die Anfangs- als auch die mittleren CO₂-Konzentrationen während des Unterrichtes gesenkt, wobei insgesamt ein vergleichsweise eher niedriges Belastungsniveau vorlag. Ausgehend von 1100, 1440 bzw. 950 ppm sanken die mittleren CO₂-Konzentrationen in den Klassenräumen der 3 Schulen auf 970, 1000 bzw. 790 ppm. Der Zeitanteil, der während des Unter-

richtes unter 1000 ppm lag, erhöhte sich dementsprechend von 34, 15 bzw. 58 % vor der Intervention auf 56, 41 bzw. 75 % danach. Aus der deskriptiven Darstellung der Ergebnisse ergaben sich erste Hinweise, dass die Senkung der CO₂-Konzentration in der Innenraumluft durch verstärktes Lüften mit den Aufmerksamkeitsleistungen der Schüler, einer intensiveren Kommunikation zwischen Schülern und Lehrern und einem reduzierten Geräuschpegel verknüpft ist und mit einer Senkung der Beanspruchung (gemessen an der Herzfrequenz) einhergehen könnte. Darüber hinaus ergab die externe Beobachtung Hinweise darauf, dass sich die Anzahl der störenden Schüleraktivitäten und der hierdurch bedingten Disziplinierungsmaßnahmen verringerten. Da andere Einflussfaktoren auf die vorgenannten Parameter nicht berücksichtigt werden konnten, sind vertiefende Untersuchungen notwendig, um einen möglicherweise bestehenden Zusammenhang zu belegen.

Im Rahmen einer Interventionsstudie haben Wargocki und Wyon [30] den Einfluss unterschiedlicher CO₂-Konzentrationen auf die Leistungsfähigkeit von 10–12 Jahre alten Schülern aus 2 dänischen Parallelklassen untersucht. Die beiden bauartgleichen Klassenräume befanden sich in einem 1950 erbauten Schulgebäude und waren mechanisch belüftet, zusätzlich konnten auch die Fenster bei Bedarf geöffnet werden. Während der gesamten Unterrichtszeit wurde kontinuierlich die CO₂-Konzentration in den Klassenräumen erfasst; die mittlere Raumtemperatur betrug im Winter zwischen 18,7 und 19,4°C und im Sommer 23,7–24,1°C. Mittels der raumluftechnischen Anlage wurde der Außenluftvolumenstrom wochenweise von 3 auf 8,5 l/s Person (bzw. von 11 auf 31 m³/h Person) erhöht und damit die mittlere CO₂-Konzentration von 1300 ppm auf 900 ppm erniedrigt. Die Studie bestand aus 4 Untersuchungen über jeweils eine Woche im Winter und 2 im Sommer. In den einzelnen Untersuchungszeiträumen sanken die mittleren CO₂-Konzentrationen von 1260 auf 910, von 1300 auf 930 bzw. von 1130 auf 900 ppm und die gemittelten CO₂-Spitzenkonzentrationen von 1620 auf 1170, von 1700 auf 1090 bzw. von 1760 auf 1190 ppm. Jeweils am Ende der Schulwoche wurden die Kinder u. a.

auch zur empfundenen Qualität der Schulluft befragt.

Die Leistungsfähigkeit der Kinder wurde anhand der Schnelligkeit und Fehlerfreiheit der Bearbeitung altersgemäßer Schulaufgaben getestet. Die Aufgaben stammten aus 9 unterschiedlichen Bereichen des Lesens und Rechnens, die im regulären Unterricht integriert waren. Von den 9 durchgeführten Aufgabenblöcken erfüllten 7 die Auswertungskriterien, insbesondere hinsichtlich der Vollständigkeit der Aufgabenlösung. Ein signifikanter Effekt der erhöhten Lüftungsrate zeigte sich in 70 % der Tests (5 von 7), vor allem bei den im Winter durchgeführten Tests.² Im Vergleich mit der jeweils höheren CO₂-Konzentration war bei der niedrigeren CO₂-Konzentration die Geschwindigkeit bei der Durchführung der Aufgaben signifikant erhöht. In einigen Tests war auch die Anzahl der Fehler signifikant erniedrigt.

Im Ergebnis führte eine Verdopplung der Luftzufuhr zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit um 8–14 %, bezogen auf die Schnelligkeit und Fehlerfreiheit bei der Bearbeitung von Aufgaben im Schulunterricht. Da in dieser Studie die Kinder als ihre eigene Kontrollgruppe dienten, können die beobachteten Unterschiede in der Leistung nicht auf Unterschieden zwischen den Kindergruppen beruhen. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Effekte bei den untersuchten Kindern größer waren als bei den bisherigen Studien an Erwachsenen. Kinder reagieren auf ihre Umgebungsbedingungen möglicherweise empfindlicher als Erwachsene. Unabhängig davon, welcher Mechanismus zu den gefundenen Effekten führt, ist es unübersehbar, dass sich die Leistungsfähigkeit der Schulkinder verbessert hat. Nach Auffassung der Autoren lassen sich die Ergebnisse auf andere Schulen im europäischen Bereich übertragen.

Bartlett et al. [31] analysierten die Keimzahlen in der Luft von 116 Schulräumen. Im multiplen linearen Regressi-

onsmodell stellt die CO₂-Konzentration diejenige Variable mit der höchsten Varianzaufklärung für die Bakterienkonzentration dar. Dem Zusammenhang von erhöhter CO₂-Konzentration und dem Anstieg der Krankschreibungs- bzw. Infektionsrate gehen Milton et al. [32] sowie Rudnick und Milton [33] nach. Das relative Risiko für kurzzeitige Abwesenheit durch Krankschreibung wurde mit 1,53 (95 %-Konfidenzintervall: 1,22–1,92) für Arbeitsräume mit Außenluftvolumenströmen von 12 l/s Person im Vergleich zu solchen mit sehr hohen Volumenströmen von 24 l/s Person ermittelt [32]. Basierend auf diesen Untersuchungen stellen Rudnick und Milton [33] einen direkten Zusammenhang zwischen CO₂-Konzentration und Infektionsrate auf Basis einer modifizierten Wells-Riley-Gleichung dar.

Voronova et al. [34] verfolgten Schüler zweier Klassen bei 20 m³/h (Kontrollklasse) (entspricht 5,6 l/s und Person) bzw. 40 m³/h (Experimentalklasse; entspricht 11 l/s und Person) über ein Schuljahr. Der physische Zustand der Kinder wurde anhand der Parameter Pulsfrequenz, Belastungsblutdruck und Blutkörperchengeschwindigkeit eingeschätzt. Registriert wurden auch krankheitsbedingte Fehlzeiten der Kinder. Weiterhin gaben die Autoren einen über das Untersuchungsjahr gemittelten CO₂-, VOC- und Ammoniak-Konzentrationsverlauf für den Schultag (1.–4. Stunde) an. In der Kontrollklasse stieg CO₂ auf Werte um 1000 ppm an, in der Experimentalklasse blieb ein Anstieg aus. Auch hinsichtlich der VOC und des Ammoniaks zeigte die Experimentalklasse eine bessere Raumluftqualität. Die Bewertung des physischen Zustandes der Kinder zu Beginn und am Ende des Schuljahres wies auf eine Verbesserung für die Experimentalklasse im Vergleich zur Kontrollklasse hin. Weiterhin zeigte sich eine geringere Prävalenz an akuten Erkrankungen in der Experimentalklasse.

Shendell et al. [35] untersuchten den Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration in US-amerikanischen Schulen und den Fehlzeiten von Schülern infolge von Erkrankungen. 45 % der untersuchten 434 Klassenräume wiesen mittlere CO₂-Konzentrationen von 1000 ppm und mehr

über der Außenluftkonzentration (d. h. ca. 1400 ppm absolut) auf. Anhand multivariater Regressionsanalyse fanden die Autoren pro 1000 ppm CO₂-Anstieg eine signifikante Erhöhung der relativen Abwesenheitsrate von 10–20 %.

Die US-amerikanische Umweltbehörde führte zwischen 1994 und 1998 eine Studie in 100 zufällig ohne konkreten Beschwerdeanlass ausgewählten Bürogebäuden durch. Ausgewertet wurde unter anderem der Zusammenhang zwischen Schleimhautreizungen, Beschwerden der oberen Atemwege und der Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumluft, vermindert um die CO₂-Konzentration der Außenluft. Für Schleimhaut- und respiratorische Symptome fand sich eine signifikante Zunahme pro Anstieg der CO₂-Konzentrationsdifferenz um 100 ppm [36]. Eine signifikante und deutliche Dosis-Wirkungs-Beziehung des Anstiegs der CO₂-Differenz konnte für die Symptomgruppen Halsschmerzen und pfeifendes Atemgeräusch nachgewiesen werden.

Kim et al. [13] untersuchten 181 Kinder aus 110 Wohnungen und stellten einen Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration und Asthmaanfällen bei Probanden mit asthmatischen Erkrankungen in der Anamnese fest (OR = 1,12 pro 10 ppm CO₂-Anstieg, $p < 0,05$).

In einer Studie an 49 kanadischen Inuit-Kindern unter 5 Jahren wurde ein Zusammenhang der CO₂-Konzentration in der elterlichen Wohnung und der Häufung von tiefen Atemwegsinfektionen untersucht. Atemwegsinfektionen waren signifikant mit der durchschnittlichen CO₂-Konzentration in der Wohnung assoziiert [OR 2,85 (95 %-Konfidenzintervall 1,2–6,6) pro 500 ppm CO₂-Anstieg] [37].

Seppänen et al. [38] untersuchten in einer umfangreichen, auch graue Literatur einschließenden Analyse den Zusammenhang zwischen CO₂-Konzentration und Befindlichkeitsstörungen in kommerziellen und öffentlichen Gebäuden. Kritisch wurde von den Autoren angemerkt, dass von den 21 analysierten Studien nur 10 aus Zeitschriften mit externer Gutachterprüfung (Peer-Review) stammten und in den meisten Fällen mögliche weitere Einflussfaktoren nicht angemessen kontrolliert worden waren. Die häufigste Wirkung höherer CO₂-Konzentrationen war das Auf-

² Eine ergänzende Untersuchung der Autoren dieser Studie ergab auch einen signifikanten, aber etwas kleineren Effekt der Absenkung der Raumtemperatur in der Klasse auf die Leistungsfähigkeit von Schülern.

Tabelle 3

Klassifizierung der Raumluftqualität nach DIN EN 13779: 2007–09 (DIN 2007–09). Die Tabelle enthält in den Spalten 1–3 und 5 die Vorgaben der DIN EN 13779. Spalte 4 stellt beispielhaft für eine CO₂-Außenluftkonzentration von 400 ppm absolute CO₂-Konzentrationen in der Innenraumluft vor

Raumluft-Kategorie (Indoor Air)	Beschreibung	Erhöhung der CO ₂ -Konzentration gegenüber der Außenluft [ppm]	Absolute CO ₂ -Konzentration in der Innenraumluft [ppm]	Lüftungsrate/Außenluftvolumenstrom [l/s Person] ([m ³ /h Person])
IDA 1	Hohe Raumluftqualität	≤ 400	≤ 800	> 15 (> 54)
IDA 2	Mittlere Raumluftqualität	> 400–600	> 800–1000	10–15 (> 36–54)
IDA 3	Mäßige Raumluftqualität	> 600–1000	> 1000–1400	6–10 (> 22–36)
IDA 4	Niedrige Raumluftqualität	> 1000	> 1400	< 6 (< 22)

treten selbstberichteter Symptome aus dem sog. Sick-Building-Syndrom. Bei Beschränkung der Übersichtsarbeiten auf die in extern begutachteten Zeitschriften publizierten Studien fanden sich kaum noch Zusammenhänge zwischen CO₂-Konzentration und Befindlichkeitsstörungen.

Schon länger bekannt ist ein Zusammenhang zwischen der Kohlendioxidkonzentration und der Unzufriedenheit von Raumnutzern mit der Luftqualität [39, 40]. Die European Collaborative Action (ECA) kommt aufgrund von Modellrechnungen zu folgenden Unzufriedenheitsraten: Bereits ab 1000 ppm ist mit etwa 20 % und ab 2000 ppm mit ca. 36 % unzufriedenen Raumnutzern zu rechnen [39].

6 Bewertung

6.1 Bestehende Regelungen und Einstufungen

Zur hygienischen Bewertung der Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumluft dient seit 150 Jahren die sog. Pettenkoferzahl von 1 Vol.-% (1000 ppm) [41]. Pettenkofer erläuterte dazu:

„Der Kohlendioxidgehalt allein macht die Luftverderbnis nicht aus, wir benötigen ihn bloss als Maassstab, wonach wir auch noch auf den grössern oder geringeren Gehalt an andern Stoffen schliessen, welche zur Menge der ausgeschiedenen Kohlendioxid sich proportional verhalten.“

„Aus diesen Versuchen geht zur Evidenz hervor, dass uns keine Luft behaglich

ist, welche in Folge der Respiration und Perspiration der Menschen mehr als 1 pro mille Kohlendioxid enthält. Wir haben somit ein Recht, jede Luft als schlecht und für einen beständigen Aufenthalt als untauglich zu erklären, welche in Folge der Respiration und Perspiration der Menschen mehr als 1 pro mille Kohlendioxid enthält.“

„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 Kohlendioxidgehalt nie über 1 pro mille anwachsen könnte.“

Obwohl die Pettenkofer-Zahl vielfach verwendet wird, ist die Bedeutung dieses Indikators aus heutiger Sicht nicht ausreichend klar, da die heutige Situation in Innenräumen nicht mehr den damaligen Gegebenheiten von Wohnungen entspricht. Die Pettenkoferzahl wurde deshalb auch nicht in Normen übernommen. Ein auf der Basis der Pettenkoferzahl modifizierter Beurteilungsmaßstab fand sich in der DIN 1946. In ihrem Teil 2 wurde ein hygienischer Beurteilungswert von 1500 ppm CO₂ genannt [42]. Eine Begründung oder Beschreibung der gesundheitlichen Bedeutung dieses empfohlenen Wertes fehlte in der DIN 1946. Diese DIN galt nur für Räume mit RLT-Anlagen. Im Mai 2005 wurde diese Norm durch die DIN EN 13779 mit demselben eingeschränkten Geltungsbereich (s. u.) ersetzt,

die mittlerweile in einer überarbeiteten Fassung vorliegt [43].

Die von den zuständigen europäischen Normungsgremien im CEN entwickelte und in Deutschland eingeführte DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme“ [43] enthält eine differenzierte Bewertung der Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumluft. In dieser Norm werden zur Klassifizierung der Raumluftqualität von „Aufenthaltsräumen, in denen Rauchen nicht erlaubt ist und Verunreinigungen hauptsächlich durch menschlichen Stoffwechsel verursacht werden“, die vier Qualitätskategorien IDA 1 bis IDA 4 eingeführt (■ **Tabelle 3**). Grundlage dieser Kategorien ist die Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft, vermindert um die Kohlendioxidkonzentration in der Außenluft. Beispielsweise würde eine Innenraumkonzentration von 1500 ppm Kohlendioxid in einer Schule bei einer typischen Außenluftkonzentration um 400 ppm in Großstädten einem Wert über Außenluft von 1100 ppm und damit der Kategorie RAL 4 (> 1000 ppm) „niedrige Raumluftqualität“ entsprechen.

In der DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ [44] wird ausgeführt: „Das Innenraumklima beeinflusst auch Gesundheit, Produktivität und Behaglichkeit der Nutzer. Neuere Studien haben gezeigt, dass die Kosten für die Behebung von Problemen im Zusammen-

hang mit schlechtem Innenraumklima für den Arbeitgeber, den Gebäudeeigentümer und die Gesellschaft oft höher sind als die Energiekosten der betreffenden Gebäude. Es wurde auch nachgewiesen, dass eine geeignete Qualität des Innenraumklimas die Gesamtleistung beim Arbeiten und Lernen verbessern und Fehltag verringern kann.“ Diese Norm gilt in erster Linie für nicht-industrielle Gebäude, bei denen die Kriterien für das Innenraumklima durch die menschliche Nutzung bestimmt werden. Der Anwendungsbereich umfasst u. a. Gebäudearten wie Wohnhäuser, Bürogebäude, Schul- und Hochschulgebäude, Restaurants und Handelsgebäude. Es werden Kategorien des Innenraumklimas festgelegt, denen neben Lüftungsraten auch CO₂-Konzentrationen in Anlehnung an die DIN EN 13779 zugeordnet werden.

Eine Reihe europäischer Nachbarländer hat Richtlinien und Empfehlungen zur Lüftung von Gebäuden einschließlich Schulen veröffentlicht, die u. a. auch Vorgaben zur Begrenzung der CO₂-Konzentration in der Innenraumluft enthalten. In Finnland beträgt die maximal zulässige CO₂-Konzentration in der Innenraumluft bei üblichen Wetterbedingungen und unter Nutzung 1200 ppm [45]. Die norwegischen und schwedischen Richtlinien sehen für Wohnräume, Schulen und Büroräume eine maximale CO₂-Konzentration von 1000 ppm vor [46, 47]. In Dänemark soll nach der Richtlinie der Arbeitsschutzbehörde die Kohlendioxidkonzentration in Kindertagesstätten, Schulen und Büroräumen 1000 ppm nicht überschreiten. Der Luftwechsel wird als unzureichend bezeichnet, wenn die CO₂-Konzentration mehrmals am Tag für kurze Zeit den Wert von 2000 ppm überschreitet [48]. In Österreich gilt für natürlich belüftete Räume während des Beurteilungszeitraumes (für die Nutzungsdauer repräsentativer Zeitraum) für Einzelwerte als auch die gleitenden Stundenmittelwerte ein Zielbereich von < 600 ppm CO₂ plus Außenluftkonzentration (entspricht etwa < 1000 ppm als Innenraumluftkonzentration). Als sogenannte Mindestvorgabe dürfen die gleitenden Stundenmittelwerte den Wert von 1000 ppm über der Außenluftkonzentration nicht überschreiten, und kein Einzelwert in dauernd be-

nutzten, natürlich belüfteten Innenräumen darf über 1500 ppm plus Außenluft (entspricht etwa 1900 ppm innen) liegen. Für mechanisch belüftete Räume werden strengere Maßstäbe angelegt. Der Zielbereich beträgt < 400 ppm über der Außenluftkonzentration, während als Mindestvorgabe die gleitenden Stundenmittelwerte 600 ppm und kein Einzelwert 1000 ppm über der Außenluftkonzentration liegen darf [49].

Eine umfangreiche Empfehlung speziell zur Lüftung von Schulgebäuden hat das britische Ministerium für Kinder, Schulen und Familien vorgelegt [50]. In dem Building Bulletin 101 „Ventilation of School Buildings – Regulations, Standards, Design Guidance“ lautet die Anforderung, dass angemessene Mittel zur Lüftung für Gebäudenutzer vorhanden sein müssen.³ Der empfohlene Lüftungsstandard soll sich dabei an der CO₂-Konzentration im Schulraum orientieren: Während der gesamten Unterrichtszeit soll die durchschnittliche CO₂-Konzentration in Sitzhöhe 1500 ppm nicht überschreiten. Zu jedem Nutzungszeitpunkt müssen die Raumnutzer in der Lage sein, die CO₂-Konzentration auf 1000 ppm herabsetzen zu können. Im Abschnitt 7.2.2 „Kontrolle durch den Nutzer“ heißt es: „Es wäre hilfreich, Nutzer mit einer optischen Anzeige der Raumbedingungen auszustatten. Dies könnte beispielsweise eine direkte Anzeige der CO₂-Konzentration oder eine Lüftungsampel sein, anhand der die Raumnutzer einen erhöhten Lüftungsbedarf beurteilen könnten.“⁴

An Arbeitsplätzen, die den Regelungen der Gefahrstoffverordnung unterliegen, gilt gemäß TRGS 900 ein Arbeitsplatzgrenzwert von 5000 ppm Kohlendioxid [51]. In der Begründung des MAK-Wertes für CO₂ wird auf eine bereits nach kurzzeitiger Exposition gegenüber 10.000 ppm CO₂ auftretende Verstärkung der unter körperlicher Belastung zu beobachtenden

³ Requirement F1: There shall be adequate means of ventilation provided for people in the building.

⁴ It would be beneficial to provide the occupants with some visual display of the conditions in the room. For example, this may be a display of the CO₂ level either directly or by means of a “traffic light” system by which the occupants could judge the need for increased ventilation.

Azidose verwiesen. Ferner wird die ungenügende Abklärung der beobachteten Wirkung von CO₂ auf den Knochenstoffwechsel bemängelt [52]. Kurzzeitig (15 Min. lang) wird am Arbeitsplatz eine Exposition bis zu 10.000 ppm Kohlendioxid zugelassen, da sich der Blut-pH in dieser Zeit nur um 0,04 Einheiten ändert und somit die untere Grenze des Normbereichs von 7,35 nicht unterschreitet [53].

Hinsichtlich der Bewertung von CO₂ an Arbeitsplätzen, die nicht den Regelungen der Gefahrstoffverordnung unterliegen, führte die DFG [52] aus: „Bei der Beurteilung der künstlich betriebenen Belüftung von Arbeitsräumen wird die CO₂-Konzentration als Kriterium einer ausreichenden Luftumwälzung benutzt. Die Intensität der störenden Gerüche geht mit der Ansammlung des ausgeatmeten CO₂ parallel. 0,1 Vol.-% (1000 ppm) gelten als oberer Grenzwert für eine ausreichende Durchlüftung solcher Arbeitsräume. Dieser für geschlossene, künstlich belüftete Arbeitsräume geltende Grenzwert kann durch den derzeit vorgesehenen MAK-Wert von 0,5 Vol.-% (5000 ppm) CO₂ nicht ersetzt werden. Demnach gilt der MAK-Wert von 0,5 % CO₂ nicht als Beurteilungskriterium für die Belüftung von geschlossenen Arbeitsräumen (z. B. Büros).“

Gemäß Arbeitsstättenverordnung [54] muss in umschlossenen Arbeitsräumen unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren, der körperlichen Beanspruchung und der Anzahl der Beschäftigten sowie der sonstigen anwesenden Personen ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein. Diese Anforderung wird erfüllt, wenn die vom Ausschuss für Arbeitsstätten ermittelte und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales bekannt gemachte Regel für Arbeitsstätten hinsichtlich der Lüftung eingehalten wird. Da sich die Konkretisierung dieser Anforderung gegenwärtig noch in Bearbeitung befindet, ist entsprechend der noch gültigen Arbeitsstättenrichtlinie [55] ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft in Arbeitsräumen dann vorhanden, wenn die Luftqualität im Wesentlichen der Außenluftqualität entspricht. Für freie Lüftung ist eine ausreichend gleichmäßige Durchlüftung der Arbeitsräume zu gewährleisten, für lüf-

Tabelle 4

Hygienische Bewertung der Kohlendioxid-Konzentration in der Innenraumluft mithilfe von Leitwerten (bezogen auf die aktuell vorliegende Konzentration – Momentanwert). Die Empfehlungen mit kurzfristig durchzuführenden Maßnahmen bauen aufeinander auf. Die Kohlendioxid-Leitwerte können z. B. im Sinne einer Lüftungsampel (grün–gelb–rot) verwendet werden

CO ₂ -Konzentration (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

nungstechnische Anlagen ist für überwiegend sitzende Tätigkeit ein Außenluftvolumenstrom von 20–40 m³/h Person zugrunde zu legen.

6.2 Hygienische Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft

Innenraumluftkonzentrationen über 1000 ppm werden allgemein – insbesondere im Hinblick auf Körpergerüche – als ein Indikator für inakzeptable Lüftungsraten angesehen [56]. Jedoch garantieren auch CO₂-Konzentrationen unter 800 ppm nicht immer, dass die Lüftungsraten ausreichen, um Luftverunreinigungen aus anderen Quellen im Innenraum zu entfernen [38]. Eine systematische Interventionsstudie hat kürzlich eindrücklich gezeigt, dass Absenkungen der mittleren CO₂-Konzentration von 1300 ppm auf 900 ppm bzw. der mittleren CO₂-Spitzenkonzentration von 1700 auf 1100 ppm zu einer signifikanten Leistungssteigerung bei Schulkindern führen [30]. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt auch eine in Deutschland durchgeführte Studie [29]. Vor diesem Hintergrund ist der bisher in Deutschland üblicherweise verwendete Beurteilungswert von 1500 ppm CO₂ als zu hoch anzusehen. Im benachbarten europäischen Ausland liegen die Zielwerte überwiegend bei 1000 ppm [45, 46, 47, 48, 49].

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte schlägt deshalb die in **■ Tabelle 4** genannten hygienischen Leitwerte vor. Sie beschreiben die aktuellen CO₂-Konzentrationen (Momentanwerte), die während der Messung (an einem repräsentativen Ort im Raum) mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung (Mittelungsdauer üblicherweise < 2 min) er-

mittelt werden. Hinsichtlich der Messstrategie siehe Abschnitt 3 bzw. VDI 4300-9 [10].

– Bei Überschreitung eines Wertes von 1000 ppm CO₂ soll gelüftet werden.

Wenn Lüftungsmaßnahmen und eine Verbesserung des Lüftungsverhaltens nicht den gewünschten Erfolg zeigen, sollte ein Lüftungsplan mit festgelegten Verantwortlichkeiten aufgestellt und umgesetzt werden. Die Durchführung einer Kontrollmessung zur Überprüfung der Wirksamkeit der Lüftungsmaßnahmen ist zu prüfen. In Räumen mit sehr hoher Personenanzahl bei beschränktem Raumvolumen sollte darauf geachtet werden, dass vor Nutzungsbeginn gründlich gelüftet wird, damit die Raumluft weitgehend der Außenluftqualität entspricht. Es ist außerdem sinnvoll, bereits vor dem Erreichen einer CO₂-Konzentration von 1000 ppm für einen angemessenen Luftwechsel⁵ zu sorgen.

– Bei Überschreitung eines Wertes von 2000 ppm CO₂ muss gelüftet werden.

Eine Unterschreitung von 1000 ppm CO₂ ist dabei anzustreben. Wenn der Wert der CO₂-Konzentration von 2000 ppm trotz verstärkter Lüftung nicht dauerhaft unterschritten wird und höhere Lüftungsfre-

⁵ Die notwendige Luftwechselzahl ist abhängig von der Anzahl der Personen und dem zur Verfügung stehenden Raumvolumen. Sie ergibt sich für eine Personenanzahl als Quotient aus der angestrebten Lüftungsrate (Gesamt-Außenluftvolumenstrom) und dem Raumvolumen. Gemäß DIN EN 13779 sollte der Außenluftvolumenstrom zur Gewährleistung einer mittleren Raumluftqualität (siehe Tab. 3) mindestens 36 m³/h Person betragen (entspricht z. B. einer Luftwechselzahl von 4,5 je Std. bei 25 Personen in einem Raumvolumen von 200 m³).

quenzen zu erheblichen Störungen (z. B. des Unterrichtsverlaufes in einem Klassenraum) führen, sind weitergehende organisatorische, lüftungstechnische oder bauliche Maßnahmen erforderlich. Hierzu zählen z. B. die Überprüfung der Belüftbarkeit des Raumes, eine Verringerung der Anzahl der Personen im Raum oder der Einbau einer technisch geregelten Lüftung (z. B. einer CO₂-gesteuerten Fensteröffnung oder eines mechanischen Raumbelüftungssystems).

Empfehlungen zur besonderen Problematik in Unterrichtsräumen mit hoher Personendichte (z. B. in Klassenräumen), den dort notwendigen Lüftungsmaßnahmen sowie praktische Hinweise zu weitergehenden organisatorischen und lüftungstechnischen Maßnahmen gibt der überarbeitete Schulleitfaden der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes [57].

Anmerkungen

Der Text dieser Empfehlung wurde federführend von Thomas Lahrz, Dr. Wolfgang Bischof und Dr. Helmut Sagunski unter Beteiligung von Christoph Baudisch, Dr. Hermann Fromme, Herbert Grams, Dr. Thomas Gabrio, Dr. Birger Heinzow und Dr. Ludwig Müller erarbeitet. Die Literaturrecherche wurde im Januar 2008 abgeschlossen.

Literatur

1. Grams H, Hehl O, Dreesman J (2003) Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64:447–456

2. Lahrz T, Piloty M, Oddoy A, Fromme H (2003) Schwerpunktprogramm – Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Untersuchung der Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Bericht des Fachbereichs Umwelt- und Gesundheitsschutz des ILAT Berlin
3. Fromme H, Heitmann D, Dietrich S, et al. (2008) Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70:88–97
4. Heudorf U, Neitzert V, Spark J (2008) Particulate matter and carbon dioxide in classrooms – the impact of cleaning and ventilation. Int J Hyg Environ Health (in press)
5. Umweltbundesamt (UBA) (2000) Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulen. Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Eigenverlag, Berlin
6. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1987) Luftverunreinigungen in Innenräumen. Sondergutachten Mai 1987. Kohlhammer, Stuttgart
7. VDI (1995) Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Messstrategie VDI 4300 Blatt 1. Beuth, Berlin
8. DIN (2000) Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1. Allgemeine Aspekte der Messstrategie. DIN ISO 16000-1:2000-11. Beuth, Berlin
9. Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG (2007) Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz 50: 990–1005
10. VDI (2003) Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid (CO₂). VDI 4300 Blatt 9. Beuth, Berlin
11. Baek S, Kim Y, Perry R (1997) Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas – indoor/outdoor relationships. Atmos Environ 31:529–544
12. Frisk M, Andersson H, Loit H, et al. (2002) Are there any differences in indoor environment of asthmatics and non-asthmatics persons? A case/control study performed in Sweden and Estonia. Proc Indoor Air '02 1:97–102
13. Kim CS, Lim YW, Yang JY, et al. (2002) Effect of indoor CO₂ concentrations on wheezing attacks in children. Proc Indoor Air '02 1:492–497
14. Lundqvist G, Revsbech P (1986) Ventilation in flats. Measurement of carbon dioxide and air exchange in retrofitted flats. Ugeskr Laeger 148:3475–3479
15. Fehlmann J, Wanner H (1993) Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. Indoor Air 3:41–50
16. Fromme H, Lahrz T, Piloty M, et al. (2002) Schwerpunktprogramm – Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Bericht des Fachbereichs Umwelt- und Gesundheitsschutz des ILAT Berlin
17. Fromme H, Dietrich S, Twardella D, et al. (2007) Particulate matter in the indoor air of classrooms – exploratory results from Munich and surrounding. Atmos Environ 41:854–866
18. Gabrio T, Volland G (2007) Persönliche Mitteilung
19. Bischof W, Bebersdorf J, Koch A (2008) Erhebung zur raumlufthygienischen Situation in Erfurter Schulen. Publikation in Vorbereitung
20. Bischof W, Bullinger-Naber M, Kruppa B, et al. (2003) Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
21. Schlechter N, Pohl K, Barig A, et al. (2004) Beurteilung der Raumluftqualität an Büroarbeitsplätzen. Gefahrstoffe Reinhaltung Luft 64:95–99
22. Fromme H, Oddoy A, Lahrz T, et al. (1997/98) Exposition der Bevölkerung gegenüber flüchtigen Luftschadstoffen im Autoinneren und in der U-Bahn. Zentralbl Hyg Umweltmed 200:505–520
23. Sayers JA, Smith REA, Holland RL, Keatinge WR (1987) Effects of carbon dioxide on mental performance. J Appl Physiol 63:25–30
24. Yang Y, Sun C, Sun M (1997) The effect of moderately increased CO₂ concentration on perception of coherent motion. Aviat Space Environ Med 68: 187–191
25. Manzey D, Lorenz B (1998) Effects of chronically elevated CO₂ on mental performance during 26 days of confinement. Aviat Space Environ Med 69:506–514
26. Mendell MJ, Heath GA (2005) Do indoor pollutants and thermal conditions in school influence student performance? A critical review of the literature. Indoor Air 15:27–52
27. Kajtár L, Herczeg L, Läng E, et al. (2006) Influence of carbon-dioxide pollutant on human well-being and work intensity. Proc Healthy Buildings Conf '06 1:85–90
28. Myhrvold AN, Olsen E, Lauridsen O (1996) Indoor environment in schools – pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. Proc Indoor Air '96 4:369–374
29. Tiesler G, Schönwälder HG, Ströver F (2008) Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht. ISF – Institut für interdisziplinäre Schulforschung, Universität Bremen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Gemeindeunfallversicherungsverbandes Hannover und der Unfallkasse Hessen
30. Wargocki P, Wyon DP (2006) Research report on effects of HVAC on student performance. ASHRAE JI 48(October 2006):23–26
31. Bartlett KH, Kennedy SM, Brauer M, et al. (1999) Predictors of exposure to indoor CO₂ and bioaerosols in elementary school classrooms. Proc Indoor Air '99 1:252–257
32. Milton DK, Glencross PM, Walters MD (2000) Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints. Indoor Air 10:212–221
33. Rudnick SN, Milton DK (2003) Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. Indoor Air 13:237–245
34. Voronova BZ, Veremkovich LV, E'lkovskaia EA (1989) Optimal air conditioning in the classrooms of secondary schools as a factor of improving health status of schoolchildren. Gig Sanit Nov: 19–22
35. Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, et al. (2004) Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Indoor Air 14:333–341
36. Erdmann CA, Apte MG (2004) Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset. Indoor Air 14(Suppl 8):127–134
37. Kovesi T, Gilbert NL, Stocco C, et al. (2007) Indoor air quality and the risk of lower respiratory tract infections in young Canadian Inuit children. Can Med Assoc J 177:155–160
38. Seppänen OA, Fisk WJ, Mendell MJ (1999) Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. Indoor Air 9:226–252
39. ECA (1992) Guidelines for ventilation requirements in buildings. European Collaborative Action Indoor Air Quality & its Impact on Man. Report no. 11. EUR 14449
40. VDI (2001) Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. VDI 4300 Blatt 7. Beuth, Berlin
41. Pettenkofer (1858) Besprechung Allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J.G. Cotta'sche Buchhandlung, München
42. DIN (1994) Raumlufttechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). DIN 1946 Teil 2. Beuth, Berlin
43. DIN (2007) Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme. DIN EN 13779: 2007-09. Beuth, Berlin
44. DIN (2007) Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. DIN EN 15251:2007-08. Beuth, Berlin
45. SF-Ministry of the Environment (2003) Indoor climate and ventilation of buildings. Regulations and Guidelines 2003. D2 National building code of Finland. Unter: <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=68171&lan=en>
46. NO-Folkehelseinstituttet (1996) Anbefalte faglige normer for inneklima. Unter: <http://www.fhi.no/da/v/249C03CEC6614E87862368DA175E7A31.pdf>
47. Svenska Inneklimainstitutet (1994) R1 Classified indoor climate systems. Guidelines & specifications
48. DK-Arbejdstilsynet (2008) Indeklima. At-vejledning A.1.2 (Januar 2008). Unter: <http://www.at.dk/sw4607.asp>
49. Ö-Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2006) Bewertung der Innenraumluft. Physikalische Faktoren. Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter.
50. UK-Department of Children, School and Families (2006) Building bulletin 101. Ventilation of school buildings. Regulations, standards, design guidance. Version 1.4 vom 5. Juli 2006. Unter: <http://www.teachernet.gov.uk/management/resources/financeandbuilding/schoolbuilding/BB101>
51. BMAS (2006) Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). Ausgabe Januar 2006. GMBI 55:1094
52. DFG (1983) Kohlendioxid. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten. Wiley-VCH, Weinheim
53. DFG (2002) Kohlendioxid. Nachtrag 2002. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten. Wiley-VCH, Weinheim
54. BMAS (2004) Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV) vom 12.8.2004. BGBl I 2179
55. BMA (1984) Arbeitsstättenrichtlinie – ASR 5 vom 22.8.1979. BARbI 10/1979:103, berichtigt durch Bek. des BMA vom 13.9.1984. BARbI 12/1984:85
56. Daisy JM, Angell WJ, Apte MG (2003) Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. Indoor Air 13:53–64
57. UBA (2008) Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulen. Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin (in Vorbereitung)