



RICHTLINIE ZUR BEWERTUNG DER INNENRAUMLUFT

KOHLLENSTOFFDIOXID ALS LÜFTUNGSPARAMETER

AKTUALISIERTE FASSUNG 2017

AUTORENVERZEICHNIS

In alphabetischer Reihenfolge

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Peter Tappler

Mitarbeit:

Dipl.-Ing. Bernhard Damberger

Dipl.-Ing. Andreas Greml

Assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans-Peter Hutter

Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi

Univ.-Doz. Dr. Hanns Moshhammer

Dipl.-Ing. Felix Twrdik

Dr. Peter Wallner

Datum der Ausstellung: 09. November 2017

Herausgegeben vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW),
Stubenbastei 5, 1010 Wien

unter Mitarbeit der Kommission Klima und Luftqualität (KKL) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, 1010 Wien

Werden Personenbezeichnungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit lediglich in der männlichen oder weiblichen Form verwendet, so schließt dies das jeweils andere Geschlecht mit ein.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Präambel	4
2	Allgemeine Eigenschaften	5
2.1	Chemisch-physikalische Eigenschaften, Allgemeines	5
2.2	CO ₂ als Lüftungsparameter	6
2.3	Vorkommen und Verbreitung	8
2.3.1	Verbreitung in der Umwelt.....	8
2.3.2	Der Mensch als Quelle von CO ₂ in Innenräumen	8
2.3.3	Abiotische Quellen von CO ₂ in Innenräumen.....	9
2.3.4	Studien zu CO ₂ in Innenräumen (ausg. Bildungseinrichtungen)	11
2.3.5	Studien zu CO ₂ in Bildungseinrichtungen	14
3	Messstrategie, Analytik und Prüfbericht	18
3.1	Messstrategie	18
3.1.1	Allgemeines	18
3.1.2	Zeitpunkt der Messung, Beurteilungszeitraum	18
3.1.3	Ziel der Messung, Messstrategie	19
3.1.4	Lüftungssituation.....	20
3.1.5	Ort der Messung, weitere Vorgaben	21
3.2	Analytik	22
3.3	Prüfbericht	23
4	Toxikologie	24
4.1	Allgemeine Wirkungen auf den Menschen	24
4.2	Wirkungen auf die Leistungsfähigkeit	26
4.3	Bestehende Regelungen	28
4.3.1	Gesetzliche Regelungen für die Lüftung von Räumen.....	28
4.3.2	Sonstige Regelungen für CO ₂	30
5	Beurteilung von CO₂-Konzentrationen	35
5.1	Allgemeines	35
5.2	Definitionen	36
5.3	Bewertung der Raumluftqualität	36
5.4	Abdeckung gesetzlicher Vorgaben	39
6	Literatur	40

1 PRÄAMBEL

Die Konzentration von CO₂ in Innenräumen dient vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der vom Menschen abgegebenen Emissionen und Geruchsstoffe. Als Produkt der menschlichen Atmung ist der CO₂-Gehalt der Innenraumluft daher unmittelbar Ausdruck der Intensität der Nutzung eines Raumes. Bei Vorliegen anderer Quellen (z.B. Verbrennungsprozesse bei Gasherden, Ethanol- und Gasöfen ohne Abzug ins Freie) gehen auch diese Emissionen durch das entstehende CO₂ in die Messung und Beurteilung ein.

Grundsätzlich ist anzustreben, dass das Lüften von Innenräumen vor allem über einfach zu öffnende Fenster möglichst in den Außenbereich erreicht werden kann – eine mechanische Lüftung für alle bestehenden Innenräume wird nicht als erforderlich angesehen und würde dem Ziel eines anzustrebenden eigenverantwortlichen Wohn- und Lüftungsverhaltens entgegenstehen. Vor allem in der warmen Jahreszeit und in der Übergangszeit ist geeignete Fensterlüftung ohne Einschränkung der Behaglichkeit und des gesunden Raumklimas anzustreben.

Es gibt jedoch Fälle, in denen ein gutes und behagliches Innenraumklima auf Grund der zunehmenden Dichtigkeit von Gebäuden ohne Unterstützung durch lüftungstechnische Einrichtungen grundsätzlich nicht mehr erreicht werden kann. In diesen Fällen ist im Rahmen eines Lüftungskonzeptes anzustreben, eine möglichst einfache, zumutbare und wirksame Lösung für eine hygienische Raumlüftung zu finden, bei der die notwendigen Luftvolumina für ein hygienisches Innenraumklima dauerhaft zugeführt werden.

Allein auf Grund von Kostenüberlegungen sollten keine Abstriche von den vorgegebenen Richtwerteempfehlungen gemacht werden – dies gilt insbesondere für Bildungseinrichtungen – bei richtiger Planung sind kostengünstige Lösungen verfügbar. In jedem Fall ist zu prüfen, ob die Möglichkeit der Hybridlüftung – die Kombination von Fensterlüftung und bedarfsorientierter mechanischer Unterstützung – besteht. Bei der Konzeption vor der Auswahl von mechanischen Lüftungssystemen sollten die möglichen Lösungen jedoch in Hinblick auf Kosten und Aufwendungen für ihren Betrieb (Energieeinsatz und CO₂-Emissionen in die Umwelt, Wartung) optimiert werden.

2 ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

2.1 CHEMISCH-PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN, ALLGEMEINES

Systematischer Name: Kohlenstoffdioxid

Synonyme: Kohlendioxid, Kohlensäureanhydrid, Carbon Dioxide

CAS-Nummer: 124-38-9

EINECS-Nummer: 204-696-9

Kennzeichnungen: nicht kennzeichnungspflichtig nach EG-Kriterien, S-9, S-23

Summenformel: CO₂

Strukturformel: O=C=O

Molmasse: 44,01 g/mol

Schmelzpunkt: 216,6 K bei 0,53 hPa

Siedetemperatur: 194,2 K (1013,25 hPa)

Dichte: 1,976 kg/m³ (273,15 K, 1013,25 hPa)

Dampfdruck: 5,733 hPa (bei 293,15 K)

Wasserlöslichkeit: 3,48 g/l (bei 273 K)

1,45 g/l (bei 298 K)

Umrechnungsfaktoren (bei 293,15 K, 1013,25 hPa): 1 ppm = 1,83 mg/m³

1 mg/m³ = 0,546 ppm

1 Vol% = 10 000 ppm

1 ppm = 0,0001 Vol%

Im Folgenden werden die Angaben für die Konzentrationen an CO₂ in der Einheit „ppm“ (parts per million) angegeben. Die Umrechnung in andere Einheiten erfolgt laut der angegebenen Umrechnungsfaktoren.

2.2 CO₂ ALS LÜFTUNGSPARAMETER

Der Mensch selbst stellt mit seinen verschiedenen Exhalationsprodukten und Ausdünstungen eine maßgebliche Quelle verschiedener Luftverunreinigungen im Innenraum dar. CO₂ gilt deshalb als Leitparameter für von Menschen verursachte Luftverunreinigungen, da der Anstieg der CO₂-Konzentration in Innenräumen gut mit dem Anstieg der Geruchsintensität menschlicher Ausdünstungen korreliert. Bei 1000 ppm empfinden rund 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend (BUWAL 1997). Diese Konzentration entspricht der Pettenkofer-Zahl, die von dem Hygieniker Max von Pettenkofer (1858) als Richtwert für die maximale CO₂-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen mit 0,1 Vol% CO₂ (1000 ppm) definiert wurde. Huber und Wanner (1982) nahmen an, dass die Belästigungsschwelle durch menschliche Ausdünstungen (nicht aber durch Rauchen oder andere Aktivitäten) in etwa mit einer CO₂-Konzentration von 1500 ppm zusammenfällt. Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO₂-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) lässt sich mittels einer Formel annähern (ECA 1992). Eine fixe Grenze, ab wann die Raumluft als unzureichend bezeichnet wird, kann jedoch nicht angegeben werden.

Die von Menschen abgegebene CO₂-Menge korreliert nicht nur mit der Geruchsintensität von menschlichen Ausdünstungen, sondern auch direkt mit der Menge an flüchtigen organischen Verbindungen, die wiederum – zumindest zum Teil – als Träger des vom Körper ausgehenden Geruchs angesehen werden können. Wang (1975) untersuchte diese Zusammenhänge in einem Klassenzimmer und stellte fest, dass die vier der Menge nach dominierenden Verbindungen in den Körperausdünstungen etwa zwei Drittel der gesamten Menge an flüchtigen organischen Substanzen ausmachen. Dabei handelte es sich um Aceton, Buttersäure, Ethanol und Methanol. Weiter wurden als wichtige Komponenten der Körperausdünstungen, die sich in der Innenraumluft in relevanten Konzentrationen fanden, z.B. die folgenden Stoffe festgestellt: Acetaldehyd, Allylalkohol, Essigsäure, Amylalkohol, Diethylketon, Phenol. Insgesamt wurden durchschnittlich 14,8 mg/h an flüchtigen organischen Substanzen je Person freigesetzt.

Es wurde vorgeschlagen, die Korrelation zwischen der Menge an CO₂ und der Menge an flüchtigen organischen Verbindungen, die von einem Menschen abgegeben werden, zur Bewertung der Raumluftverhältnisse heranzuziehen. Batterman und Peng (1995) haben als Kenngröße für die Innenraumluftverhältnisse einen dimensionslosen Anreicherungsfaktor „VOC-Enrichment Factor“ definiert. Die Ermittlung dieser Kenngröße erfordert die zeitgleiche Messung der CO₂-Konzentration und der Konzentration an flüchtigen organischen Verbindungen (als

Summe) in der Innenraum- und in der Umgebungsluft. Die Werte sollen vor allem Hinweise darauf geben, ob die Raumluft im Gebäude eher von biogenen oder abiotischen Quellen geprägt wird. In der Praxis hat dieser Faktor jedoch bis dato keine Bedeutung erlangt.

Die Klassifizierung nach der CO₂-Konzentration hat sich bei Räumen etabliert, in denen Rauchen nicht erlaubt ist und Verunreinigungen hauptsächlich durch den menschlichen Stoffwechsel verursacht werden (siehe bspw. ÖNORM EN 13779).

Die wesentliche Bedeutung des relativ leicht zu ermittelnden Indikators CO₂ liegt darin, dass durch ihn Konzentrationen definiert werden, die einen Hinweis auf hygienisch unzureichende Raumluftqualität geben. Er eignet sich neben dieser Funktion als Orientierungsmarke auch für andere Regelungsbereiche, so z.B. für die Dimensionierung von raumluftechnischen Anlagen oder für Lüftungsanweisungen in natürlich belüfteten, dichter belegten Räumen wie Schulklassen oder Versammlungsräumen. Für raumluftechnische Anlagen wird CO₂ wegen seiner guten Indikatoreigenschaften für die Belastung der Luft mit anthropogenen Emissionen auch als Leitparameter sowie Regelgröße eingesetzt, über die die Menge an zuzuführender Frischluft bestimmt wird (Turiel und Rudy 1982, Fehlmann et al. 1993). Ein solches Regelkonzept setzt eine sorgfältige Planung der Messstrategie und eine aufmerksame, verlässliche Kontrolle, Wartung und Betreuung der Messsonden und Regelstrecken voraus, da sonst erhebliche Fehler und eine unzureichende Funktion der raumluftechnischen Anlagen die Folge sind. Weitere Überlegungen gehen daher dahin, außer CO₂ auch andere Parameter über Sensoren mitzuerfassen und somit eine komplexere Basis für die Regelung der Anlagen zu haben (Bischof und Witthauer 1993).

Für Schulen wurde ein einfach zu handhabendes Rechenblatt zur Abschätzung der zu erwartenden Konzentrationen an CO₂, abhängig von Anzahl, Aktivität und Alter der Personen im Raum, der Raumgröße, dem Zustand der Fenster (bzw. der Belüftungssituation bei mechanisch belüfteten Gebäuden) im Rahmen einer Studie an oberösterreichischen Schulen entwickelt (Tappler 2015) und im Anschluss zur Anwendung auch für allgemeine Innenräume weiterentwickelt. Die aktuellen Rechenblätter können im Internet bezogen werden¹.

¹ <http://www.raumluft.org/rlt-anlagen/co2-rechner/>

2.3 VORKOMMEN UND VERBREITUNG

2.3.1 Verbreitung in der Umwelt

Die CO₂-Konzentration unbelasteter Außenluft ist innerhalb der letzten 100 Jahre von etwa 300 ppm hauptsächlich auf Grund von anthropogenen Emissionen auf höhere Werte angestiegen und zeigt nach wie vor steigende Tendenz.

In der Außenluft ist die CO₂-Konzentration von der Entfernung zu Emittenten abhängig. Als Hintergrundwert wird eine mittlere Jahreskonzentration von etwa 400 ppm angenommen, in intensiv genutzten Stadtzentren können höhere Konzentrationen auftreten.

2.3.2 Der Mensch als Quelle von CO₂ in Innenräumen

In Innenräumen ist der Mensch die bedeutendste Quelle an CO₂. Die CO₂-Konzentration ist neben der Konzentration in der Außenluft stark von der Belegung des Raumes, der Raumgröße und der Belüftungssituation abhängig. Höhere Konzentrationen treten dann auf, wenn sich relevante Quellen von CO₂ wie Menschen, Haustiere, bzw. CO₂-emittierende technische Anlagen im Raum oder dessen unmittelbarer Umgebung befinden oder wenn im Raum Verbrennungs- oder Gärungsvorgänge stattfinden. Bei unzureichenden Lüftungsverhältnissen oder unter Raumnutzungsbedingungen mit hoher Personenbelegung kann die CO₂-Konzentration in Innenräumen allein durch die von den Nutzern ausgeatmeten Mengen bis zu einer Größenordnung von 10000 ppm ansteigen.

Die Literaturangaben der CO₂-Abgabe für erwachsene Personen schwanken in einem relativ weiten Bereich. Das Verhältnis der CO₂-Konzentration in inhalierter zu exhalierter Luft liegt bei ca. 1:140 (Pluschke 1996).

Tabelle 1: Literaturangaben für die CO₂-Abgabe von Menschen

Literaturstelle	Liter CO ₂ pro Stunde	Anmerkung
Rietschel (1994)	20,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit, entspanntes Stehen
	27,2	Stehende Tätigkeit
Witthauer, Horn, Bischof (1993)	12	Ruhiger Zustand
	18	Sitzende Tätigkeit
	180	Schwerarbeit
Recknagel, Sprenger, Schramek (1999)	20	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit
VDI 4300 Bl. 9 (2003), analog zu 4300 Bl. 7 (2001)	15 - 20	Sitzende Tätigkeit
	20 - 40	Leichte Arbeit
	40 - 70	Mittelschwere Arbeit
	70 - 110	Schwere Arbeit
ASHRAE (1989)	18	Büroarbeit

2.3.3 Abiotische Quellen von CO₂ in Innenräumen

Neben dem biotischen – vor allem dem durch die menschliche Atmung verursachten – Eintrag an CO₂ in die Innenraumluft spielen alle Verbrennungsprozesse, bei denen die Verbrennungsgase nicht vollständig aus dem Raum abgeführt werden, als CO₂-Quelle eine Rolle. Dazu sind grundsätzlich das Rauchen von Tabak (allerdings sind beim CO₂ im Gegensatz zu anderen Schadstoffen die Beiträge der Raucher quantitativ gering), das Abbrennen von Kerzen und der Betrieb von offenen Öl- und Gasleuchten ebenso zu zählen wie Gasherde und andere Einrichtungen, bei denen auf offener Flamme gekocht wird (z.B. Kajtár et al. 2005). Auch Heizgeräte wie bspw. Ethanolöfen mit offener Flamme und ohne Kaminanschluss können die CO₂-Konzentration erheblich erhöhen (Tappler et al. 2015). Bei diesen offenen, meist unvollständigen Verbrennungsprozessen spielen freilich unter lufthygienischen Gesichtspunkten eine Reihe anderer Schadstoffe (wie Benzol, CO, NO₂, PAK, Formaldehyd) für die Einschätzung der davon ausgehenden Risiken eine bedeutsamere Rolle als CO₂, da sie wegen ihrer toxischen Eigenschaften schon bei wesentlich niedrigeren Konzentrationen zu Befindlichkeitsstörungen und Vergiftungserscheinungen führen können (nach Pluschke 1996).

Unter besonderen Umständen kann CO₂ auch als Bestandteil der Bodengase aus dem Untergrund über das Fundament von Gebäuden in den Innenraum eindringen. Solche Effekte sind im Umfeld von Deponiestandorten beobachtet worden, wenn in den Ablagerungen (z.B. Hausmüll) durch biologische Abbauprozesse unter anaeroben Bedingungen Deponiegas gebildet wird, das über 60 % Methan und bis zu 40 % CO₂ enthalten kann (VDI Bildungswerk 1991). Es sind Fälle dokumentiert, in denen es in Häusern im Umfeld solcher Deponien zu Explosionen gekommen ist, weil sich in den Innenräumen ein explosives Gasgemisch mit einer hinreichend großen Methankonzentration ansammeln konnte (Johnson 1993). In solch einem Fall kommt der CO₂-Konzentration natürlich keine nennenswerte Bedeutung mehr zu, aber es kann unter ähnlichen Randbedingungen auch zu einer Anreicherung des Methan-CO₂-Gemisches kommen, die zu unerwünscht hohen CO₂-Konzentrationen in den betroffenen Gebäuden führt. Auch natürliche Bodengasquellen wie Torflager, alluviale Lagerstätten und gewisse geologische Formationen können Gaseintritte in Gebäude verursachen (nach Pluschke 1996). Eine weitere mögliche Quelle sind undichte Kamine. In diesem Fall ist allerdings auch mit einem gleichzeitig auftretenden typischen Geruch und toxischen Abgaskomponenten zu rechnen.

Von untergeordneter Bedeutung ist die CO₂-Abgabe durch Pflanzen bei Dunkelheit. Die Mengen sind gering und entsprechen bei 1 m² Blattoberfläche etwa 1 % der stündlich von einem Menschen abgegebenen CO₂-Menge. Gegenläufig dazu wird CO₂ durch die bei Licht ablaufenden photosynthetischen Prozesse von den Pflanzen aufgenommen (VDI 4300 Bl. 9).

Bei Vorliegen von undichten Gebäuden mit stark frequentierten Tiefgaragen, bei denen keine vollständige lufttechnische Trennung zwischen den Innenräumen und der Tiefgarage besteht, ist damit zu rechnen, dass CO₂ aus der Verbrennung von Treibstoff neben anderen Schadstoffen in die Räume gelangt (Tappler und Damberger 1996).

In Weinkellern kann es durch das entstehende Gärgas zu erhöhten CO₂-Konzentrationen kommen. Technische Anlagen wie Getränke-Zapfstationen, die in größeren Mengen CO₂ als Arbeitsstoff einsetzen, sind theoretisch ebenfalls als Quelle denkbar, diese Anlagen geben jedoch im Normalbetrieb kein CO₂ an die Umgebung ab.

Neben diesen Quellen können auch (meist schwache) Senken vorhanden sein, beispielsweise alkalisch reagierendes Mauerwerk.

2.3.4 Studien zu CO₂ in Innenräumen (ausg. Bildungseinrichtungen)

Auf Grund der Vielzahl an mittlerweile durchgeführten Studien zur Konzentration an CO₂ in Innenräumen können in der Folge nur ausgewählte Arbeiten angeführt werden. In dem von der Ad-hoc Arbeitsgruppe "Innenraumrichtwerte" der deutschen Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche verschiedene bis dahin veröffentlichte Studien zu CO₂ in Innenräumen vorgestellt.

Innerhalb von Gebäuden sind typische zeitliche und räumliche Verteilungsmuster der CO₂-Konzentration festzustellen, die sich aus den Nutzungen ergeben. In Wohngebäuden sind durchschnittliche CO₂-Konzentrationen in der Größenordnung von ca. 400 - 700 ppm festzustellen, die aber im Lauf des Tages stark variieren können (Keskinen et al. 1987). Hoskins et al. (1993) haben eine Reihe von Untersuchungen aus verschiedenen europäischen Ländern zur Luftqualität in Innenräumen ausgewertet. Als Mittelwerte für verschiedene Kategorien von Innenräumen ergaben sich dabei CO₂-Konzentrationen von ca. 700 ppm.

Prescher (1982) fand Konzentrationen in der Größenordnung von etwa 1600 ppm bei Kochtätigkeiten. Der Autor beobachtete auch den Verlauf der CO₂-Konzentration in der Küche nach Abschluss der Kochtätigkeiten und konnte einen Abfall auf die Ausgangskonzentrationen innerhalb von 45 - 100 min, je nach Umfang der Kochaktivitäten und der Lüftungsvorgänge, feststellen.

In Schlafzimmern haben Fehlmann und Wanner (1993) den Einfluss der Fenster- und Türstellung eines Schlafzimmers auf den Anstieg der CO₂-Konzentration während der Schlafphase untersucht. Die Autoren haben in ihrem Messprogramm bei Belegung des Schlafzimmers mit 2 Personen und bei geschlossenen Fenstern und Türen CO₂-Konzentrationen bis zu 4300 ppm gemessen. Es zeigte sich bei ihren Untersuchungen, dass auch relativ geringe Lüftungsöffnungen (z. B. eine 10 cm breite Öffnung der Tür) den Anstieg der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer deutlich beschränkten und dass damit kaum noch Werte größer als 1500 ppm auftraten.

Zu erinnern ist in diesem Zusammenhang an die wohngygienischen Untersuchungen von Friedberger (1923), der in den 20er Jahren in den stark überbelegten Massenwohnquartieren dieser Zeit CO₂-Konzentrationen bis zu 5500 ppm gemessen hat, die gleichzeitig mit beträchtlichen Geruchsbelastungen verbunden waren.

Auch in Innenräumen von Verkehrsmitteln können relativ hohe CO₂-Konzentrationen auftreten. So stiegen in Flugzeugen mit ca. 200 Passagieren die Konzentrationen vor dem Start (vor dem Einschalten der Lüftungsanlage) auf bis zu 2000 ppm an

(Moriske 2002). Während des Fluges wurden durchschnittlich 1500 ppm gemessen. In einer weiteren Studie über die Raumluftqualität in Flugzeugen des Fabrikates „Boeing“ wurde ebenfalls unter anderem der Parameter CO₂ untersucht (Lindgren und Norbäck 2002). Vor dem Start lag die mittlere Konzentration bei etwa 1660 ppm und erreichte Werte bis 3 700 ppm. Bei eingeschalteter Lüftungsanlage während des Fluges lagen die Messwerte in 97% der Fälle unter 1000 ppm.

In modernen Hochgeschwindigkeitszügen (ICE der Baureihen III und IV) lag der CO₂-Gehalt der Raumluft in der Regel unter 1500 ppm (Moriske 2002). Allerdings stiegen die Werte an, wenn längere Tunnel durchfahren wurden, da dann vermehrt von Frischluft- auf Umluftzufuhr umgestellt wurde. In U-Bahnen wurden CO₂-Konzentrationen bis 1200 ppm gemessen.

Sohn et al. (2005) untersuchten unter anderem die CO₂-Konzentrationen in Taxis, öffentlichen Bussen und U-Bahnen. Die mittleren Konzentrationen von jeweils 20 Fahrzeugen lagen bei 2490 ppm bei Taxis, 2220 ppm bei Bussen und 900 ppm bei U-Bahnen.

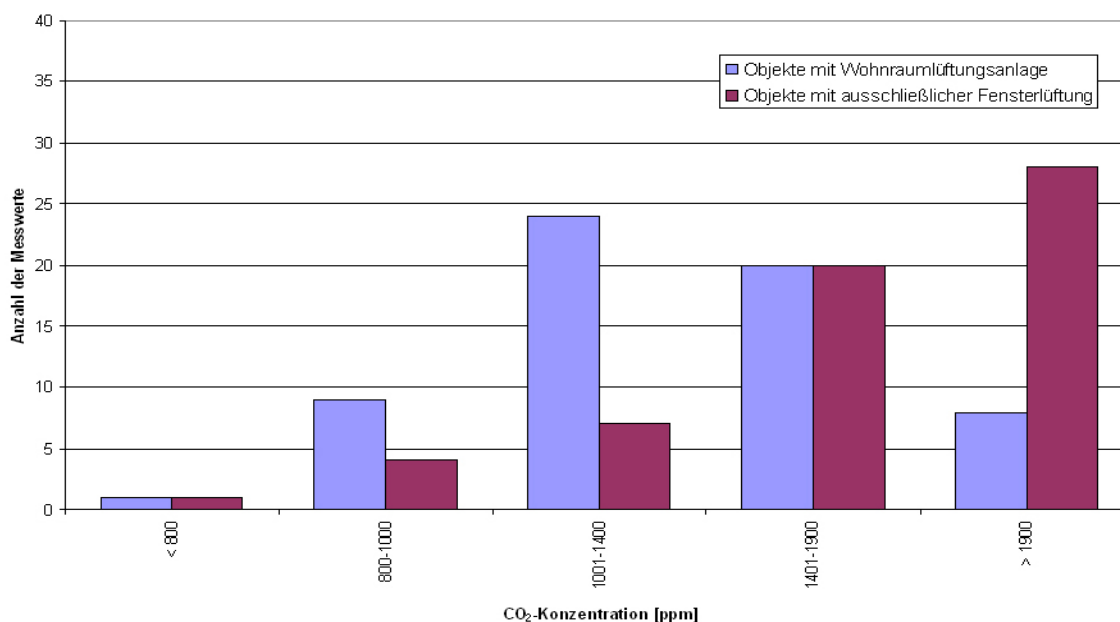
Im Rahmen einer im Zeitraum 2010 bis 2013 von den Projektpartnern IBO, Institut für Umwelthygiene der MedUni Wien, IG Passivhaus und AGES durchgeführten Studie wurde der Unterschied von Raumluftqualität und Bewohnergesundheit in neu errichteten Wohnhäusern bzw. Wohnungen mit mechanischer Lüftungsanlage und solchen ohne Lüftungsanlage untersucht (Wallner et al. 2015, Wallner et al. 2017, Tappler et al. 2014). Aus den Ergebnissen von umfangreichen Messungen wurde ermittelt, ob sich die aus bautechnischer Sicht unterschiedlichen Haustypen hinsichtlich der Schadstoffbelastung sowie dem subjektiven Gesundheitsstatus unterscheiden und ob der subjektiv wahrgenommene Gesundheitsstatus mit objektiven Schadstoffmessungen in Beziehung steht. Anhand der Studie sollte weiters festgestellt werden, ob sich signifikante Einflüsse des Haustyps (Lüftung ja/nein) auf Veränderungen des Gesundheitsstatus nach einem Jahr auswirken.

Die Auswertung der medizinischen Fragebögen ergab, dass Bewohner der Testgruppe (Gebäude mit mechanischer Lüftung) ihren eigenen Gesundheitszustand signifikant besser einschätzten als Bewohner der Kontrollgruppe (Gebäude mit natürlicher Lüftung). Die Gesundheit der befragten Erwachsenen hat sich nach eigenen Angaben ein Jahr nach Einzug in Gebäude mit mechanischer Lüftung signifikant stärker verbessert als nach Einzug in ein Gebäude mit natürlicher Lüftung. Allerdings ergab die Auswertung, dass Erwachsene in der Testgruppe signifikant ($p < 0,05$) häufiger (19,4%) unter trockenen Augen litten als Erwachsene der Kontrollgruppe (12,5%). Offensichtlich damit zusammenhängend wurde die

Luftfeuchtigkeit von Befragten der Kontrollgruppe signifikant besser bewertet. In der Testgruppe sank die Zufriedenheit mit der Wohnsituation insbesondere zwischen den beiden Messzeitpunkten, wenn die Luft trockener empfunden wurde.

Die Raumluft wurde in Hinblick auf die positiven Wahrnehmungen von den Nutzern der mechanisch belüfteten Wohnobjekte (Testgruppe) in Bezug auf den Parameter „sauber“ signifikant ($p < 0,05$) bzw. in Bezug auf „angenehm“ und „frisch“ hochsignifikant ($p < 0,01$) besser beurteilt als in der Kontrollgruppe. Auch hinsichtlich der negativen Wahrnehmungen sind die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen fast durchwegs (bis auf die Attribute „übelriechend“) hochsignifikant ($p < 0,01$): Die natürlich belüfteten Objekte schnitten hier deutlich schlechter ab.

Abbildung 1: Anzahl der CO₂-Messwerte (maximaler gleitender Stundenmittelwert) in Konzentrationsklassen in Anlehnung an ÖNORM EN 13779, Schlafräume von Objekten mit Wohnraumlüftungsanlagen (n=62) und Objekten mit ausschließlicher Fensterlüftung (n=60)



Die CO₂-Konzentration wurde in den Schlafräumen über einen Zeitraum von einer Woche mit einem Multifunktions-Messgerät gemessen. Zu beiden Messterminen war die CO₂-Konzentration in den Schlafräumen mechanisch belüfteter Objekte signifikant niedriger als in jenen natürlich belüfteter. Der Stundenmittelwert der CO₂-Konzentration lag bei 80 % der natürlich belüfteten bzw. bei 45 % der mechanisch belüfteten Schlafzimmer zumindest zeitweise über 1400 ppm („Niedrige Raumluftqualität“ laut EN 13779). Der Median der CO₂-Konzentration bei mechanisch

belüfteten Objekten lag beim Ersttermin bei 1400 ppm, bei natürlich belüfteten Objekten bei 1800 ppm. Die Ursache der erhöhten Werte waren in den zu geringen Luftvolumina begründet, die den Schlafräumen zugeführt wurden, dies betraf auch die mechanisch belüfteten Objekte.

Im Zuge der Gegenüberstellung der gewonnenen Messdaten mit den Untersuchungsergebnissen aus den medizinischen Fragebögen zu gesundheitlichen Symptomen, Wohlbefinden und Lebensqualität stellte sich heraus, dass die Probanden im Schnitt einen so hohen Gesundheitszustand auswiesen, dass die Varianz der Gesundheitsfaktoren nicht ausreichend war, um einen Unterschied zwischen den Messzeitpunkten und zwischen den Untersuchungsgruppen nachweisen zu können. Lediglich hinsichtlich der Häufigkeit vegetativer Symptome bei den Erwachsenen und der Konzentration von Aldehyden, insbesondere Formaldehyd, ergab sich eine schwache aber statistisch signifikante Korrelation. Außerdem konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration und dem Eindruck verbrauchter Luft gezeigt werden. Diese Zusammenhänge waren unabhängig von dem Gebäudetyp (der Untersuchungsgruppe) bzw. von der Art der Lüftung.

2.3.5 Studien zu CO₂ in Bildungseinrichtungen

Auf Grund der Tatsache, dass in Räumen von Bildungseinrichtungen eine hohe Personendichte gegeben ist und auch gesteigerte Ansprüche an die geistige Leistungsfähigkeit bestehen, wurde dem Thema Raumluftqualität in Schulen, Universitäten etc. großes Augenmerk gewidmet. Schon der bekannte Hygieniker Max von Pettenkofer ging 1858 auf das Thema CO₂ ein: „Ich bin auf das Lebendigste überzeugt, dass wir die Gesundheit unserer Jugend wesentlich stärken würden, wenn wir in den Schulräumen die Luft stets so gut und rein erhalten würden, dass der Kohlensäuregehalt nie über ein Promille anwachsen könnte.“

Auf Grund der Vielzahl an mittlerweile durchgeführten Studien zur Konzentration an CO₂ in Bildungseinrichtungen können ebenfalls nur ausgewählte Arbeiten angeführt werden. Eine ausgezeichnete Übersicht über Arbeiten zu Raumluft in Schulen findet sich in Salthammer et al. (2016).

In Versammlungsräumen, Lehrsälen und Klassenzimmern (ohne raumluftechnische Anlagen) mit einer hohen Belegung steigt die CO₂-Konzentration im Lauf der Zeit an und kann Konzentrationen bis zum Mehrfachen der Pettenkofer-Zahl erreichen— diese Situation ist entgegen allgemeiner Auffassung allerdings kein neuartiges

Problem (siehe bspw. Rigos 1981). In neuen Schulen werden aus an sich sinnvollen Energiespargründen extrem dichte Fenster eingebaut, bei denen die Luftwechselzahl (Infiltrationsluftwechsel) unter $0,05 \text{ h}^{-1}$ liegt. Diese Fenster können oder dürfen aus Sicherheitsgründen oftmals in den Pausen nicht geöffnet werden. Es ergeben sich dadurch oftmals extrem erhöhte CO_2 -Konzentrationen – dies betrifft Schulen in der Stadt, aber auch in ländlichen Gegenden. Unter ungünstigen Umständen können dadurch Konzentrationen bis zum Bereich des MAK-Wertes (5000 ppm) erreicht und überschritten werden (Brandl et al. 2001).

Einen Einblick über die reale lufthygienische Situation in österreichischen Schulräumen gab eine Untersuchung, die im Frühjahr 2001 in je zwei Klassenräumen von zehn oberösterreichischen Schulen durchgeführt wurde (Brandl et al. 2001). Die Schulauswahlkriterien waren: Beschränkung auf einen politischen Bezirk, 4 Volksschulen, 4 Hauptschulen, 2 AHS, 3 Neubauten, 3 Altbauten, 4 Altbauten nach Sanierung, je 1 stark und 1 schwach belegter Klassenraum. Die CO_2 -Konzentration wurde in den Klassenräumen während mehrerer Unterrichtseinheiten kontinuierlich aufgezeichnet. Die Art und Häufigkeit der Lüftung wurde nicht vorgegeben, es wurde den Lehrern mitgeteilt, dass die Lüftung der üblichen Situation entsprechen sollte. Der Median der Durchschnittskonzentrationen des Beurteilungszeitraumes (Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende) für CO_2 lag bei 1370 ppm, der Median der Maximalwerte lag bei 2090 ppm, die absolute Maximalkonzentration an CO_2 lag in einem Klassenraum nach etwa 100 Minuten geschlossenen Fenstern bei einer Belegung von 22 bis 23 Schülern bei 6680 ppm.

Im Rahmen einer umfassenden Erhebung von Schadstoffen in oberösterreichischen Schulen wurde unter anderem der Parameter CO_2 in ausgewählten Schulklassen erfasst (Amt der OÖ. Landesregierung 2003). Es wurden in zwei Schulen jeweils 2 Klassenräume zu unterschiedlichen Jahreszeiten untersucht. Die Schulen unterschieden sich in Bezug auf den Zustand der Fenster und das Alter der Schüler. Das Lüftungsregime war vorgegeben und wurde bei der Messung kontrolliert.

In allen untersuchten Räumen konnten nach relativ kurzer Zeit (10 bis 15 Minuten) Konzentrationen an CO_2 nachgewiesen werden, die den Bereich von 1 000 bis 1 500 ppm, der in der Studie „Hygienebereich“ genannt wurde), überschritten. Die Werte stiegen bei geschlossenen Fenstern weiter an. Dies wurde von den Autoren als Hinweis dafür gewertet, dass die für eine Aufrechterhaltung hygienischer Bedingungen notwendige Außenluftmenge während der Unterrichtsstunden nicht zugeführt würde. Der Verlauf der Konzentrationen zeigte, dass bei höherer Belegung der Räume auch selbst bei ständig gekippten Fenstern ein stetiger Anstieg der CO_2 -Konzentration gegeben war.

Lüften in den Pausen führte zu einer starken Absenkung der Konzentration an CO₂. Der „Hygienebereich“ wurde jedoch damit bei höherer Belegung der Räume nicht bzw. nur kurzfristig erreicht. Ein probeweise verstärktes Lüften (Stoßlüften in den Pausen und 5 Minuten Lüftung bereits nach jeweils 25 Minuten Unterricht) führte ebenfalls zu einer deutlichen Senkung der CO₂-Konzentration. Die Autoren schlossen aus den Ergebnissen, dass bei durchschnittlich bis dicht belegten Klassenräumen einmaliges Lüften in der Pause nicht ausreicht, die hygienisch erforderlichen Zuluftmengen sicherzustellen und dass erst bei ständig gekippten Fenstern und geringer Klassenschülerzahl die CO₂-Konzentrationen im hygienisch erforderlichen Zielbereich liegen würden. Die Vorgabe gekippter Fenster wäre jedoch auf Grund einer Reihe von Einschränkungen nur in der warmen Jahreszeit umsetzbar, da bei den Wintermessungen bereits bei einem gekippten Fenster Zugscheinungen und ein starkes Absinken der Raumtemperatur zu beobachten waren. Im Winter wäre der Zustand mit zwei ständig gekippten Fenstern mit einem unzumutbar großen Wärmeverlust im Klassenraum und Zugscheinungen verbunden.

Aufbauend auf theoretischen Überlegungen wurde ein Rechenblatt (Tappler 2015) entwickelt, das als Grundlage für Lüftungsanweisungen in bestehenden Schulen bzw. für die Planung von zukünftigen Schulräumen dienen kann und die zu erwartenden Konzentrationen an CO₂ berechnet. Das Modell wurde anhand der ermittelten Praxisdaten mehrerer Klassenräume überprüft. Mit Hilfe des Rechenblattes können für Klassenräume z.B. die maximale Klassenbelegung, der notwendige Luftraum oder das resultierende Zuluftvolumen pro Schüler bestimmt werden.

In einer durch das Hochbauamt der Stadt Nürnberg beauftragten Studie wurden umfassende Messergebnisse aus deutschen Schulen präsentiert (Müller 2017). Es wurden Messwerte von Messungen in sieben verschiedenen Städten mit etwa 35 verschiedenen Unterrichtsräumen, vorwiegend im Messzeitraum Oktober 2016 bis Januar 2017 dargestellt. In einer Studie des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes wurden Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen untersucht sowie Kohlendioxidverläufe modelliert (NLGA 2004). In der für die Weiterentwicklung des BNB beauftragten Metastudie „Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisingerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung“ ist mit dem Fokus auf Deutschland eine wertende Übersicht über den aktuellen (veröffentlichten) Stand der Forschung hinsichtlich der Thematik „Kohlendioxidgehalte während der Unterrichtseinheit“ erstellt worden (Knaus et al. 2017). In zahlreichen im Zuge dieser Studien

untersuchten Schulen wurden zum Teil stark erhöhte Konzentrationen an CO₂ festgestellt.

Eine Studie, deren Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung wie die in Österreich durchgeführten Untersuchungen lagen, wurde in 120 repräsentativen Klassenräumen von texanischen Grundschulen durchgeführt. Der Median der Durchschnittskonzentrationen der Messwerte für CO₂ lag bei 1290 ppm, der Median der Maximalwerte lag bei 2060 ppm. Die mittlere CO₂-Konzentration lag in 66 % der Räume über 1000 ppm. Die maximale Konzentration überschritt in 88 % der Räume den Wert von 1000 ppm und in 21 % der Räume den Wert von 3000 ppm (Corsi et al. 2002).

Untersuchungen in 26 Kindertagesstätten im Mittleren Westen Amerikas ergaben, dass in mehr als 50 Prozent die durchschnittlichen CO₂-Werte (der Messzeitraum betrug acht Stunden) über 1000 ppm lagen (Feng und Lee 2002). Während der Schlafenszeit der Kinder wurden höhere Konzentrationen gefunden als zu Zeiten, in denen sie nicht schliefen.

3 MESSSTRATEGIE, ANALYTIK UND PRÜFBERICHT

3.1 MESSSTRATEGIE

3.1.1 Allgemeines

Da in Innenräumen aufgrund der beschriebenen Quellen mit veränderlichen CO₂-Konzentrationen gerechnet werden muss, kommt der Messstrategie eine große Bedeutung zu. Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie verwiesen.

3.1.2 Zeitpunkt der Messung, Beurteilungszeitraum

Da kein eigener Wirkungsbezogener Innenraumrichtwert (WIR) für CO₂ angegeben wird, der sich auf einen festgelegten Beurteilungszeitraum bezieht (wie dies im Teil „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie beschrieben wurde), sind die Zeiträume der Probenahme dem Ziel der Messung anzupassen. Dies bedeutet, dass zunächst ein geeigneter Beurteilungszeitraum gewählt werden muss, innerhalb dessen die Messungen erfolgen. Dieser Beurteilungszeitraum sollte repräsentativ für die übliche Nutzung des Raumes sein. Diese übliche Nutzung ist bei Innenräumen unter anderem durch die Personenbelegung, die Intensität der Nutzung, die typische Aktivität und die Belüftung (Art und Luftwechsel) charakterisiert.

Der Beurteilungszeitraum ist durch die Probenahmen möglichst weitgehend abzudecken. Jedenfalls sind typische Phasen, wie Zeiträume der maximalen Belegung oder Lüftungsperioden, zu erfassen. Naturgemäß können derartige relevante Phasen innerhalb eines Beurteilungszeitraumes – wie z.B. die maximalen Konzentrationen vor der Lüftung einer Schulklasse – getrennt ausgewertet werden. Nur bei gleichbleibenden Konzentrationen oder regelmäßig wiederkehrenden Phasen können die Zeiträume der Probenahmen eingeschränkt werden.

Für Messungen in Schulklassen kann der Beurteilungszeitraum die Dauer des Unterrichtes an einem durchschnittlichen Tag, jedoch auch einer Schulstunde (ohne Pausen) sein. Bei Büros ist der Beurteilungszeitraum in der Regel ein durchschnittlicher Arbeitstag von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss. Für Wohnungen kann der Zeitraum der durchgehenden Belegung relevant sein, im Schlafzimmer die Nachtstunden.

Tabelle 2: Beispiele für Beurteilungszeiträume für CO₂-Messungen

Innenraum	Interessierender Zeitraum	Typische Beurteilungszeiträume in Stunden
Schulklassen	Unterrichtszeit von Unterrichtsbeginn bis -ende	6 - 8
	Unterrichtszeit einer Schulstunde Unterrichtsbeginn bis -ende ohne Pausen	1 - 2
Arbeitsstätten, Büros	Arbeitszeit von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss	8
Vortragssäle, Veranstaltungsräume, Theater	Dauer der Veranstaltung inkl. Pausen	2 - 6
Wohnungen	Nachtsituation im Schlafzimmer	8
	Gesamtsituation bspw. im Wohnzimmer	24
Verkehrsmittel	Situation in Flugzeugen, Nachtsituation z.B. in Liege- und Schlafwagenabteilen von Zügen	1 - 8

3.1.3 Ziel der Messung, Messstrategie

Wird die Einhaltung eines Richtwertes überprüft oder allgemein die CO₂-Konzentration unter hygienischen Gesichtspunkten ermittelt, ist keine künstliche Durchmischung der Raumluft vor und während der Probenahme erforderlich. Vielmehr wird an einem repräsentativen oder (wesentlich aussagekräftiger) an mehreren relevanten Punkten beprobt. Bei natürlich belüfteten Räumen wird zunächst kräftig durchgelüftet, so dass sich die CO₂-Konzentration der Raumluft der Außenluftkonzentration annähert. Anschließend wird bei der üblichen Nutzung des Raumes die CO₂-Konzentration kontinuierlich gemessen.

Die CO₂-Konzentration stellt sich langsam auf einen konstanten Wert (Ausgleichskonzentration) ein, der nur durch eine Veränderung des Luftwechsels (Öffnen von Türen oder Fenstern) bzw. durch Veränderung der CO₂-Quellen im Raum verändert wird. In der Regel wird die Ausgleichskonzentration nicht erreicht, sondern durch Lüftungsvorgänge unterbrochen. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte werden diese Ereignisse dokumentiert.

Bei mechanisch belüfteten Räumen wird eine Basismessung des unbelegten Raumes etwa eine Stunde nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage vorgenommen

und dann in Gegenwart der Raumnutzer wie in einem Raum mit natürlicher Lüftung verfahren.

Mindestens 8 Stunden vor und während der Messung darf in den zu untersuchenden Räumen nicht geraucht und keine Gasherde, Zimmeröfen oder ähnliches ohne Abzug betrieben werden (außer das Messziel ist eine Erfassung dieser Emittenten).

Die CO₂-Konzentration ist vom Luftwechsel im Raum abhängig, der wiederum von Außenklimaparametern wie Windgeschwindigkeit, Temperaturdifferenz innen-außen abhängt. Diese Außenklimaparameter sollten daher für die entsprechende Jahreszeit repräsentativ sein. Extreme Abweichungen von typischen Werten, insbesondere hohe Windgeschwindigkeiten oder atypische Wetterlagen schließen eine Messung aus (außer das Messziel ist eine Messung unter vom Durchschnittszustand abweichenden Parametern).

Die Windgeschwindigkeit im Außenbereich sollte die Windstärke 3 nach Beaufort (Bereich 3,6 - 5,4 m/s, entspricht „Schwache Brise“ – Blätter und dünne Zweige bewegen sich) nicht überschreiten.

3.1.4 Lüftungssituation

Die Art und Intensität der Lüftung hat zentrale Bedeutung für die Konzentration an CO₂. Wenn die Lüftungssituation in Schul- und Unterrichtsräumen zu bewerten ist, sollte in den Pausen gelüftet werden, wobei die Art der Lüftung den jeweiligen Gegebenheiten bzw. Vorgaben anzupassen ist (Kippstellung oder vollständig geöffnete Fenster). Bei Büroräumen ist in der Regel ein zumutbares Lüftungsintervall von 2 Stunden anzusetzen. Wenn die Lüftungssituation in Schlafzimmern zu bewerten ist, sollte grundsätzlich über den Zeitraum von 8 Stunden bei geschlossenen Fenstern und Türen gemessen werden, davor und danach ist ein Lüftungsintervall anzusetzen. In Ausnahmefällen (bspw. die Nutzer geben an, immer bei offenen Fenstern zu schlafen) ist zu entscheiden, ob eventuell unter diesen abweichenden Bedingungen zu messen ist.

Raumlufttechnische Anlagen ohne Bedarfsregelung sind in der Leistungsstufe zu betreiben, die für die jeweilige Situation typisch ist (in der Regel mittlere Leistungsstufe).

3.1.5 Ort der Messung, weitere Vorgaben

Die Auswahl der zu beprobenden Räume innerhalb eines Gebäudes richtet sich nach den örtlichen Verhältnissen und der Raumnutzung. Es sollen bevorzugt Räume untersucht werden, die dem dauernden Aufenthalt von Personen dienen (z.B. Wohnräume, Schlafräume, Büros, Unterrichtsräume, Gruppenräume von Kindergärten).

In der Regel wird die Messung an einem oder mehreren repräsentativen Messpunkten ohne zusätzliche Durchmischung der Raumluft erfolgen. Die Repräsentativität des oder der Messpunkte kann durch eine Messserie mit mehreren parallelen Messungen an unterschiedlichen Messpunkten im Raum ermittelt werden. Wenn dies aus zeitlichen oder anderen Gründen nicht möglich ist, kann ein Messpunkt zentral im Raum gewählt werden. Bei Räumen mit einer Grundfläche bis zu etwa 50 m² reicht dies in der Regel aus. Bei größeren Räumen hingegen oder bei asymmetrischen Quellen sind mehrere Messpunkte erforderlich, um allfällige Konzentrationsgradienten zu ermitteln.

Zur Ermittlung von unbekanntem nicht anthropogenen Quellen ist die Position der Sonden zu verändern, um den Ort der höchsten Konzentration festzustellen.

Die Öffnung der Probenahmesonde muss frei anströmbar sein und möglichst in der Raummitte in einer Höhe von ca. 1,5 m über dem Boden und in mindestens 1 m Abstand von den Wänden angebracht werden. Abweichend davon kann die Sonde auch an bestimmten relevanten Stellen, z.B. Arbeitsplätzen, angeordnet werden. Es ist Vorsorge zu treffen, dass die Messwerte nicht durch direkt ausgeatmete Luft der anwesenden Personen – auch des Probenehmers – beeinflusst werden. Die Öffnung der Sonde ist daher mindestens in einer Entfernung von 1 m zu möglichen Emittenten zu positionieren. Die im Raum befindlichen Personen müssen vor der Messung davon informiert werden, dass die Sonde nicht direkt angeatmet werden darf.

In mechanisch belüfteten Räumen ist gegebenenfalls eine Vorbelastung der Zuluft z.B. durch einen Umluftanteil zu ermitteln, die von der Konzentration in der Außenluft abweichen kann.

3.2 ANALYTIK

Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik in „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie verwiesen.

Die Probenahmestrategie der Raumluft in Hinblick auf CO₂ folgt ÖNORM EN ISO 16000-26². Das am häufigsten verwendete Messprinzip und Referenzverfahren ist – wie für Außenluftuntersuchungen – die kontinuierliche Bestimmung mittels nicht-dispersiver Infrarot-Spektroskopie (NDIR). Das Verfahren ermöglicht eine zuverlässige Bestimmung in einem Konzentrationsbereich von 400 ppm bis 10000 ppm.

Das angewandte Messverfahren muss geeignet sein, Momentanwerte³ zu liefern, die für ein Intervall von maximal einer Minute als repräsentativ angesehen werden. Durch die kontinuierliche Registrierung der CO₂-Konzentrationen können die für die Beurteilung erforderlichen Momentanwerte ermittelt werden. Darüber hinaus kann die zeitliche Veränderung verfolgt werden, um Hinweise für Empfehlungen (z.B. für das Lüften, Einbau von raumluftechnischen Anlagen etc.) zu gewinnen.

Elektrochemische Sensoren und Halbleiter-Gassensoren sind in der Regel nicht für Messungen in Innenräumen geeignet, da auch andere Raumluftinhaltsstoffe angezeigt werden; diese Methoden sind daher zu wenig spezifisch. Andere Messverfahren können nur nach Maßgabe des Messzieles und unter Berücksichtigung der Querempfindlichkeiten (z.B. Luftfeuchte) und spezifischen Anforderungen in Innenräumen zum Einsatz kommen.

Probenahmen in Innenräumen über einen längeren Zeitraum sind prinzipiell anspruchsvoll, da die Messstelle nicht oder nur mit großem Aufwand ständig überwacht werden kann. Eine maßgebliche Beeinflussung des Messergebnisses ist im Fall von CO₂ vor allem durch die Personenbelegung und das Lüftungsverhalten gegeben.

² ÖNORM EN ISO 16000-26 (2013): Innenraumluftverunreinigungen - Teil 26: Probenahmestrategie für Kohlendioxid (CO₂)

³ Definition des Begriffes Momentanwert im Kapitel 5.2

3.3 PRÜFBERICHT

Im Messbericht und im Probenahmeprotokoll sind die Zeitpunkte und Intensität des Lüftens bei natürlich belüfteten Gebäuden, die Belegung des Raumes mit Personen und gegebenenfalls Haustieren, nicht-anthropogene Quellen wie bspw. Ethanolöfen oder Gasgeräte (z.B. Gasherde), die Aktivität sowie das Alter der anwesenden Personen sowie die Leistungsstufe einer vorhandenen raumluftechnischen Anlage zu protokollieren. Veränderungen dieser Parameter sind mit der Angabe des Zeitpunktes der Veränderung aufzunehmen.

Bauseitig können die Anzahl, Art und der Wartungszustand der Fenster und Türen sowie die jeweilige Fugenlänge erfasst werden. Weiters ist während der Probenahme die Temperatur und die relative Luftfeuchte im Raum zu erfassen. Da die Konzentration an CO₂ neben der Raumbellegung, Raumgröße und Lüftungssituation von unterschiedlichen Randparametern wie der Windgeschwindigkeit außen etc. abhängt, sind alle Faktoren, die im Kapitel 3.1 thematisiert sind, so weit wie möglich detailliert im Untersuchungsbericht zu beschreiben.

Nachdem aus den Momentanwerten der ermittelten CO₂-Konzentrationen der arithmetische Mittelwert (Beurteilungswert) des jeweiligen Beurteilungszeitraumes errechnet wird und eine Einordnung in die Klassen laut Kapitel 5.3 erfolgt ist, sind diese Ergebnisse und Beurteilungen im Messbericht anzugeben.

Weiters können die Häufigkeiten in Hinblick auf die Luftqualitätsklassen bestimmt werden, diese können zur besseren Übersichtlichkeit auch als Tortengrafik angegeben werden.

4 TOXIKOLOGIE

4.1 ALLGEMEINE WIRKUNGEN AUF DEN MENSCHEN

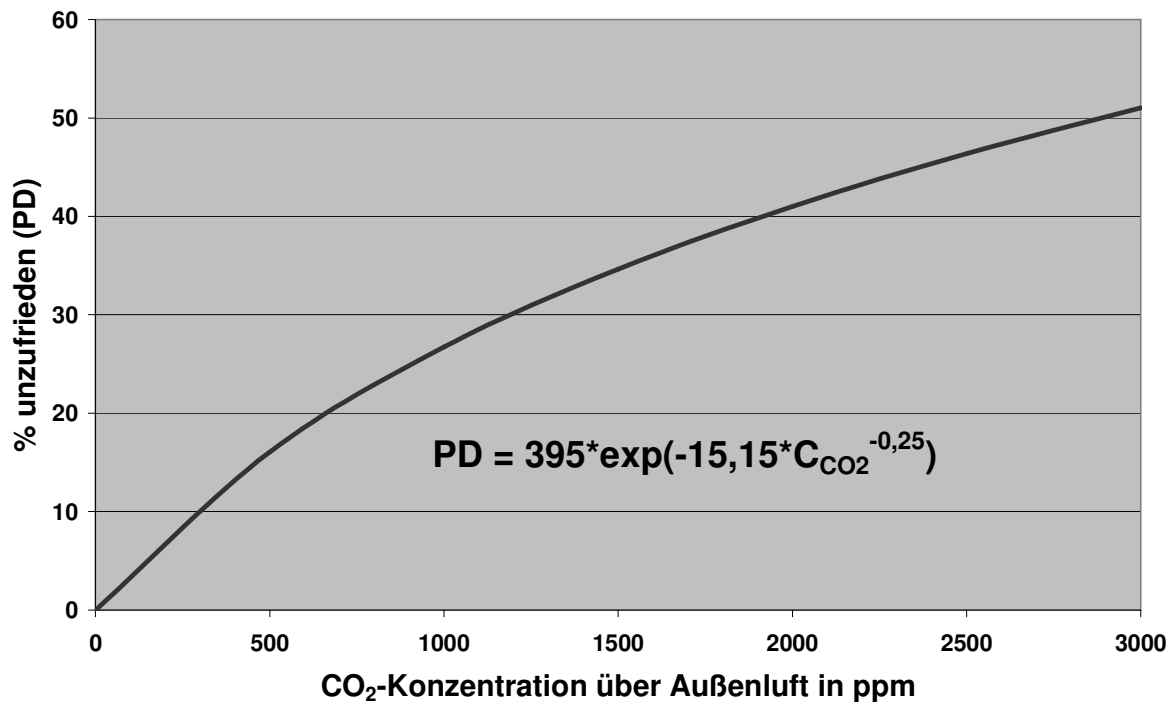
Bei etwa 1000 ppm empfinden rund 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend (BUWAL 1997). Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO₂-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) kann nach folgender Formel abgeschätzt werden (ECA 1992):

$$PD = 395 \cdot \exp(-15,15 \cdot C^{-0,25})$$

PD = Anteil der mit der Raumluftqualität Unzufriedenen in % (percentage dissatisfied)

C = Konzentration an CO₂ in ppm über der Außenluftkonzentration

Abbildung 1: Korrelation zwischen CO₂-Konzentration als Indikator für anthropogene Emissionen und Anzahl der Unzufriedenen Personen (PD in %) in einem Raum (nach ECA 1992)



Obwohl CO₂ in den in Innenräumen üblicherweise auftretenden Konzentrationen in der Regel kein unmittelbares Gesundheitsrisiko darstellt, können ab bestimmten Konzentrationen Befindlichkeitsstörungen wie z.B. Beeinträchtigung von Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kopfschmerzen auftreten (Müller-Limroth 1977, Seppänen et al. 1999).

In dem von der Ad-hoc Arbeitsgruppe "Innenraumrichtwerte" der deutschen Innenraumluftthygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche Studien zu gesundheitlichen Effekten von CO₂ in Innenräumen vorgestellt. Eine Zusammenschau von Studien zu gesundheitlichen Wirkungen und Kohlendioxid zeigte, dass sich in rund der Hälfte der Untersuchungen mit abnehmender CO₂-Konzentration sogenannten Sick-Building-Syndrom assoziierte Beschwerden (z.B. Reizungen und Trockenheit von Schleimhäuten, Müdigkeit, Kopfschmerzen) verringern (Seppänen et al. 1999). In keiner einzigen Arbeit nahmen die Symptome mit abnehmender CO₂-Konzentration zu.

Eine amerikanische Studie in Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen konnte statistisch signifikante, positive Korrelationen von Beschwerden wie z.B. trockene Kehle und Schleimhautreizungen mit dem Anstieg der CO₂-Konzentrationen nachweisen, dies auch schon im Konzentrationsbereich von unter 1000 ppm absolut (Apte et al. 2000). Eine Folgestudie mit einer erweiterten Datengrundlage beobachtete Effekte, die in die gleiche Richtung wiesen. Die Odds-Ratio lag bei Werten zwischen 1,17 und 1,20 pro 100 ppm CO₂-Anstieg (Erdmann et al. 2002). Kim et al. (2002) fanden in einer Studie mit Kindern einen signifikanten Zusammenhang zwischen erhöhten CO₂-Konzentrationen in den Wohnungen mit einer verstärkten Frequenz von „Wheezing“-Attacken bei Kindern mit Asthma.

Wargocki et al. (2000) setzten Probanden in Prüfräumen unterschiedlichen personenbezogenen Zuluft-Volumenströmen aus und befragten sie hinsichtlich Befindlichkeitsstörungen. Die Forscher fanden einen signifikanten Zusammenhang zwischen den personenbezogenen Frischluftvolumenströmen und Berichten über diverse Befindlichkeitsstörungen. Höhere Ventilationsraten verringerten signifikant den Anteil jener Personen, die mit der Luftqualität und hinsichtlich der Geruchssituation (v.a. Intensität) unzufrieden waren, und erhöhten die subjektiv empfundene Frische der Luft. Weiters verringerte sich der Anteil der Personen, die ein Gefühl von Trockenheit in Hals und Rachen und das Gefühl, nicht klar denken zu können, angaben. Höhere Ventilationsraten korrelierten mit einem höheren Prozentsatz von Personen, die angaben, sich generell besser zu fühlen.

In einer kanadischen Studie wurde die Häufigkeit verschiedener Gesundheitsbeschwerden und Befindlichkeitsstörungen von Bewohnern in energieoptimierten Gebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung (n=52) und vergleichbaren, natürlich belüfteten Gebäuden (n=53) unmittelbar nach Bezug des Gebäudes und ein Jahr danach untersucht (Leech et al. 2004). Im Untersuchungszeitraum konnten zwischen den beiden Gruppen von Häusern signifikante Unterschiede in der Verringerung des Auftretens bestimmter innenraumtypischer Beschwerden beobachtet werden. So verringerten sich Beschwerden wie Reizungen des Rachens, Müdigkeit und Husten in den Gebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung in signifikant höherem Ausmaß als in den natürlich belüfteten Gebäuden. Hingegen zeigten nicht innenraumluftbezogene Beschwerden wie z.B. Durchfall oder Übelkeit diese Tendenz nicht. Die Unterschiede wurden von den Autoren auf die verbesserte Lüftung zurückgeführt.

Über die physiologischen Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen liegen umfangreiche Erkenntnisse aus der Arbeitsmedizin, aber auch aus luft- und raumfahrtmedizinischen Untersuchungen vor. Als akute Vergiftungszeichen sind bei hohen CO₂-Konzentrationen zunächst u. a. Kopfschmerzen, Schwindel, Ohrensausen, Reflexverlangsamung, motorische Unruhe, Beeinträchtigungen des Visus (z.B. Doppelsehen, Gesichtsfeldausfälle) zu beobachten (Greim 1994). In einem späteren Stadium, bei etwa 100000 ppm treten Erstickungserscheinungen und Bewusstseinsverlust auf (Pluschke 1996). Noch höhere CO₂-Konzentrationen in der Atemluft sind letal (typische Gärkellerunfälle).

Die Exposition gegenüber erhöhten CO₂-Konzentrationen führt zu einem Anstieg des CO₂-Partialdrucks im Blut. Daraus entwickelt sich über die Hydratation des CO₂ ein Anstieg der H⁺- und HCO₃⁻-Konzentration, was zu einer respiratorischen Azidose führt, wenn die Pufferkapazität im Blut überschritten ist. Dies löst eine höhere Atemfrequenz aus und führt so zu einer erhöhten CO₂-Abgabe (pulmonale Kompensation), während parallel das Säure-Basen-Gleichgewicht über die Niere wieder ausgeglichen wird (renale Kompensation) (Pluschke 1996).

4.2 WIRKUNGEN AUF DIE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Neben dem Einfluss auf das sensorische Empfinden, die Behaglichkeit etc. rückte auch immer mehr die Frage in den Vordergrund, ob etwa auch die (geistige) Leistungsfähigkeit der Raumnutzer durch die Kohlenstoffdioxidkonzentration beeinflusst wird.

Dieser Frage ging eine dänische Forscherguppe nach (Wargocki et al. 2000). Sie setzten Probanden in Prüfräumen unterschiedlichen personenbezogenen Außenluft-

Volumenströmen aus und prüften die Leistungsfähigkeit mittels standardisierter Tests. Es wurden die Aufgaben „Rechnen“, „Texte korrigieren“ und „Texte tippen“ untersucht. Es ergab sich bei allen Aufgaben ein positiver Zusammenhang zwischen den personenbezogenen Außenluftvolumenströmen (damit auch indirekt zu den CO₂-Konzentrationen) und der Leistungsfähigkeit, der hinsichtlich der Aufgabe „Texte tippen“ signifikant war. Die gemessenen Steigerungen der Leistungsfähigkeit lagen bei einer Erhöhung von 18 m³ auf 36 m³ pro Person und Stunde bei etwa 2 bis 4 %. Anzumerken ist, dass keine Wirkung der unterschiedlichen Außenluftmengen auf typische Beschwerden des Sick Building-Syndroms beobachtet wurden.

Shaughnessy et al. (2006) fanden in einer Untersuchung in 50 Klassenräumen signifikante Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit von Schülern und der CO₂-Konzentration. Höhere Konzentrationen waren mit signifikant schlechteren Ergebnissen bei Mathematik-Tests korreliert. Zusammenhänge mit Lese-Tests, die in die gleiche Richtung wiesen, waren ebenfalls gegeben, jedoch statistisch nicht signifikant.

In dem von der Ad-hoc Arbeitsgruppe "Innenraumrichtwerte" der deutschen Innenraumluftthygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche Studien zu Auswirkungen von CO₂ auf die Leistungsfähigkeit vorgestellt.

Sehr bedeutende Studienergebnisse wurden von US-amerikanischen Forschern veröffentlicht. Satish et al (2012) fanden in kontrollierten Prüfkammerversuchen direkte Auswirkungen von CO₂ auf die Leistungsfähigkeit mittels eines computerbasierten Tests, der speziell für die Prüfung komplexer kognitiver Funktionen entwickelt wurde (decision-making performance, Strategic Management Simulation [SMS] test). Probanden wurden im Doppelblindversuch gegenüber 600, 1000 und 2500 ppm CO₂ exponiert, wobei die Konzentration mittels synthetischem CO₂ erzeugt wurde. Relativ zu den Ergebnissen bei 600 ppm wurden bei den höheren Werten in sieben von neun Parametern (basic activity, applied activity, task orientation, initiative, information usage, breadth of approach, and basic strategy) mit zunehmender CO₂-Konzentration signifikant schlechtere Werte erzielt. Beim Parameter „information search“ zeigten sich keine Abhängigkeiten der Leistungsfähigkeit von den CO₂-Konzentrationen. Beim Parameter „focused activity“ zeigten sich hingegen signifikant bessere Ergebnisse bei CO₂-Konzentrationen von 2500 ppm, die Unterschiede in absoluten Zahlen waren allerdings bei diesem Parameter sehr gering. Die Ergebnisse wurden dahingehend interpretiert, dass

Kohlenstoffdioxid – neben seiner Indikatorfunktion – auch per se direkte Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit hat.

Eine experimentelle Studie der Harvard School of Public Health (Allen et al. 2016), in der Probanden in real nachempfundenen Büroumgebungen unter kontrollierten, doppelt verblindeten Umgebungsbedingungen neun kognitive Leistungstest (u.a. basic activity level, crisis response, information usage, strategy) zu lösen hatten, zeigte bereits signifikante Effekte von CO₂ auf die Leistungsfähigkeit bei 1400 ppm. Weiters wurde beobachtet, dass sich die kognitive Leistungsfähigkeit der Probanden bei einem Anstieg von CO₂ um 400 ppm durchschnittlich um 21% verminderte. Auch bei dieser Studie wurden die konstanten Konzentrationen zum Teil mittels synthetischem CO₂ aufrecht erhalten.

4.3 BESTEHENDE REGELUNGEN

4.3.1 Gesetzliche Regelungen für die Lüftung von Räumen

In den jeweiligen bautechnischen Vorschriften der Länder (z.B. Bautechnikverordnungen) sind Vorgaben für die Lüftung von Räumen enthalten, die sich auf die OIB-Richtlinie 3: Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz⁴ als Basis beziehen, wobei die Textteile in Bezug auf Lüftung in unveränderter Form (teilweise noch in der Version 2011) in die jeweiligen Verordnungen übernommen wurden.

Auszug aus den entsprechenden Kapiteln der OIB-Richtlinie 3 (2015):

10.1.1 Aufenthaltsräume und Sanitärräume müssen durch unmittelbar ins Freie führende Fenster, Türen und dergleichen ausreichend gelüftet werden können. Davon kann ganz oder teilweise abgesehen werden, wenn eine mechanische Lüftung vorhanden ist, die eine für den Verwendungszweck ausreichende Luftwechselrate zulässt.

10.1.2 Ist bei Aufenthaltsräumen eine natürliche Lüftung zur Gewährleistung eines gesunden Raumklimas nicht ausreichend oder nicht möglich, muss eine für den Verwendungszweck bemessene mechanische Lüftung errichtet werden.

In den erläuternden Bemerkungen der OIB-Richtlinie 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz werden unter anderem die Richtwerte nach BMLFUW/

⁴ Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinie 3, Hygiene, Gesundheit & Umweltschutz Ausgabe 2015, Internet vom 17.01.2017 <http://www.oib.or.at/de/guidelines/richtlinie-3-1>

Österreichische Akademie der Wissenschaften sowie die ÖNORM EN 13779 als Beurteilungsgrundlage genannt⁵:

Zu Punkt 8.1: Immissionen können prinzipiell auf zweierlei Art auf ein vertretbares Maß reduziert werden: Durch Reduktion der Quellstärke oder durch Erhöhung der Frischluftzufuhr.

Eine ausreichend hohe Luftwechselrate widerspricht allerdings dem Ziel der Vermeidung von Zugerscheinungen und eines möglichst niedrigen Luftwechsels im Sinne der Energieeffizienz. Als Richtwert für die Frischluftzufuhr zu Wohnräumen gilt 25 m³ pro Person und Stunde, was ausreicht, wenn nicht geraucht wird, offene Flammen (z.B. Durchlauferhitzer) einen eigenen Abzug besitzen, keine flüchtigen Lösungsmittel von Bauprodukten abgegeben werden und auch auf geruchsintensive Haushalts- und Hobbychemikalien verzichtet wird.

Zu Punkt 10.1.1: Immer „dichtere“ Gebäude reduzieren den Luftaustausch durch „undichte“ Fenster und Türen. Die Folge ist ein Ansteigen der Luftfeuchtigkeit, des Kohlenstoffdioxidgehaltes und der Konzentration von leichtflüchtigen Schadstoffen. Wenn in Innenräumen die Luft als „verbraucht“ empfunden wird, liegt dies in erster Linie neben Tabakrauch und Gerüchen an von Menschen abgegebenen flüchtigen Stoffen, dargestellt durch den Kohlenstoffdioxidgehalt. Eine regelmäßige Belüftung solcher Räume ist somit eine wichtige Voraussetzung für ein gutes Wohn- und Arbeitsklima.

Die Lüftung von Aufenthaltsräumen und Sanitärräumen durch unmittelbar ins Freie führende Fenster und Türen ist ebenfalls gewährleistet, wenn vor diese verglaste Loggien oder Wintergärten vorgesetzt sind, die ihrerseits wiederum über offenbare Fenster und Türen verfügen.

Der Begriff „mechanische Lüftung“ umfasst nicht nur die kontrollierte Be- und Entlüftung, sondern z.B. auch Abluftöffnungen mit Zuströmöffnungen, sofern diese ausreichend dimensioniert sind. In kleinen Räumen können auch Lüftungsschlitze oder gegebenenfalls Türschlitze als Zuströmöffnung ausreichend sein.

Zu Punkt 10.1.2: Ein Beispiel bei dem eine natürliche Lüftung gegebenenfalls nicht ausreicht, ist ein Veranstaltungssaal, mit einer hohen Anzahl gleichzeitig anwesender Personen. Ein Beispiel für eine nicht mögliche natürliche Lüftung von Aufenthaltsräumen wäre ein Schlafräum, bei dem ein maßgeblicher Außenlärmpegel von mehr als 45 dB in der Nacht vor dem Fenster des Schlafraumes gegeben ist, sodass das Fenster zu Lüftungszwecken nicht geöffnet werden kann. Im

⁵ OIB (2015): Erläuternde Bemerkungen zu OIB-Richtlinie 3, Internet vom 15.03.2016 http://www.oib.or.at/sites/default/files/erlaeuternde_bemerkungen_richtlinie_3_26.03.15.pdf

geschlossenen Zustand ist jedoch eine ausreichende Belüftung zu gewährleisten. Diese kann beispielsweise über andere mit geringerem Außenlärmpegel belastete Fenster, eine mechanische Lüftungsanlage oder schallgedämmte Fensterlüfter u. dgl. erfolgen.

Für die Beurteilung der Raumluftqualität können beispielsweise die „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluf: CO₂ als Lüftungsparameter“, Ausgabe 2011, herausgegeben vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie ÖNORM H 6038, Ausgabe 2014-02-15 oder die ÖNORM EN 13779, Ausgabe 2008-01-01 herangezogen werden.

4.3.2 Sonstige Regelungen für CO₂

Pettenkofer definierte Mitte des 19. Jahrhunderts einen Richtwert für die maximale CO₂-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen mit einem Wert von 0,1 Vol% CO₂ (1000 ppm), die sogenannte Pettenkofer-Zahl (Pettenkofer 1858), die als Basis für Berechnungen und Regelungen vor allem im Bereich raumlufttechnischer Anlagen herangezogen wurde (siehe z.B. ÖNORM EN 13779⁶).

In Österreich liegt der derzeit gültige MAK-Wert für CO₂ laut Grenzwertverordnung (2011) bei 5 000 ppm (9000 mg/m³) bzw. 10000 ppm (18000 mg/m³) als Momentanwert für den Beurteilungszeitraum von 60 Minuten.

In der ÖNORM EN 13779 wird eine Klassifizierung von Räumen, die typischerweise dem Aufenthalt von Menschen dienen und in denen keine bedeutenden Emissionen anderer Quellen zu erwarten sind, über die CO₂-Konzentration beschrieben (Tabelle 3). Es wird allerdings nicht festgelegt, ob sich die Klassifizierung auf Spitzen- oder Durchschnittswerte bezieht. Die angegebene CO₂-Konzentration wird als Konzentration über dem CO₂-Gehalt der Außenluft definiert. Zusätzlich wird den einzelnen Klassen eine sensorische Bewertung der Luftqualität in der Einheit „decipol“⁷ zugeordnet.

⁶ ÖNORM EN 13779 (2008): Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme

⁷ Die Einheit für die empfundene Luftqualität in decipol wurde von Ole Fanger entwickelt, wobei die Luftqualität mittels trainierter Personengruppen bewertet wird. Die Methode wird in CR 1752 (1998) sowie in UBA (1998) beschrieben.

Tabelle 3: Klassifizierung der Raumlufqualität nach ÖNORM EN 13779 (2008)⁸

Kategorie	Beschreibung der Raumlufqualität	CO ₂ -Konzentration über Außenluftwert [ppm]	Außenluftrate pro Person und Stunde – Nichtraucher (m ³ *Person ⁻¹ *h ⁻¹)
IDA 1	Hoch	≤ 400	> 54
IDA 2	Mittel	400 - 600	36 - 54
IDA 3	Mäßig	600 - 1000	22 - 36
IDA 4	Niedrig	> 1000	< 22

In der ÖNORM EN 16798-1⁹ werden im informativen Anhang Standardwerte für Lüftungsraten und die CO₂-Konzentration angegeben. Diese Werte sind einerseits Auslegungswerte der Lüftungsrate, die für die Dimensionierung einer Lüftungsanlage vorgesehen sind, andererseits Auslegungswerte der CO₂-Konzentrationen in belegten Wohn- und Schlafzimmern.

Tabelle 4: Auslegungswerte der CO₂-Konzentrationen in belegten Wohn- und Schlafzimmern nach ÖNORM EN 16798-1 informativer Anhang (2015)

Kategorie	Auslegungswert der CO ₂ -Konzentration über Außenluftwert in Wohnzimmern [ppm]	Auslegungswert der CO ₂ -Konzentration über Außenluftwert in Schlafzimmern [ppm]
I	550	380
II	800	550
III	1350	950
IV	1350	950

In Deutschland wurden „Hygienische Leitwerte“ für CO₂ von der Innenraumluftthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (Ad-hoc Arbeitsgruppe 2008) veröffentlicht. Es erfolgt allerdings keine Angabe, wie aus den im Zuge von Untersuchungen gewonnenen Momentanwerten eine Einordnung eines Raumes in Klassen oder ähnliches erfolgen soll.

⁸ Die Beschreibung der Raumlufqualität der einzelnen Klassen sowie die Kategoriebezeichnungen der ÖNORM EN 13779 haben sich zwischen den Ausgaben der Jahre 2005 und 2008 verändert

⁹ EN 16798-1 Entwurf (2015): Energieeffizienz von Gebäuden. Teil 1: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik — Modul M1-61

Tabelle 6: Hygienische Leitwerte für CO₂ laut deutscher Ad-hoc Arbeitsgruppe

Beurteilungswert als CO ₂ -Konzentration [ppm absolut]	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

Für alle Arten von Schulgebäuden, Kindertagesstätten, Jugendheime etc. wurde vom deutschen Arbeitskreis Lüftung des Umweltbundesamtes bestehend aus der Kommission Nachhaltiges Bauen (KNBau) und der Innenraumlufthygienekommission (IRK) als Richtwert eine CO₂-Konzentration der Raumluft als arithmetischer Mittelwert von 1.000 ppm über die Dauer einer Nutzungseinheit (in Schulen eine Unterrichtsstunde ohne Pausen) festgelegt (AK Lüftung 2017).

Vor allem in der Klimatechnik und in den in diesem Fachgebiet geltenden Regelungen wurden zur Dimensionierung der in raumluftechnischen Anlagen benötigten Volumenströme Mindest-Außenluftvolumenströme abgeleitet, die sich aus den Vorgaben für bestimmte CO₂-Höchstkonzentrationen ergeben.

Die Arbeitsstättenverordnung – AstV (1998 i.d.g.F.) definiert allgemeine Anforderungen an die Qualität der Raumluft: Als Arbeitsräume dürfen nur Räume verwendet werden, denen ausreichend frische, von Verunreinigungen möglichst freie Luft zugeführt und aus denen verbrauchte Luft abgeführt wird. Die Lüftung hat so zu erfolgen, dass die Räume möglichst gleichmäßig be- und entlüftet werden. Eine genaue Präzisierung, was bei natürlich belüfteten Räumen als „ausreiche Luftzufuhr“ gilt, wird nicht gegeben.

Bei ausschließlich mechanisch be- und entlüfteten Räumen werden in der AstV Mindestanforderungen an das personenbezogene Außenluftvolumen gestellt. Pro anwesender Person und Stunde sind mindestens 35 m³ Außenluft zuzuführen, wenn in dem Raum Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung durchgeführt werden. Diese Werte erhöhen sich auf 50 m³, wenn in dem Raum Arbeiten mit normaler körperlicher Belastung bzw. auf 70 m³, wenn in dem Raum Arbeiten mit hoher körperlicher Belastung durchgeführt werden (Arbeitsstättenverordnung 1998 i.d.g.F.).

Die ÖNORM H 6000 Teil 3¹⁰ legt den hygienisch wünschenswerten Mindest-Außenluftvolumenströmen unter anderem eine explizit erwähnte, zu erreichende CO₂-Konzentration von absolut 1000 ppm zugrunde. Der Mindest-Außenluft-Volumenstrom liegt für klimatisierte Gebäude bei 20 - 30 m³ pro Person und Stunde bei geringer körperlicher Aktivität. Für Räume mit Raucherlaubnis sind laut dieser Norm höhere Werte anzustreben.

Tabelle 7: Mindest-Außenluft-Volumenströme nach ÖNORM H 6000 Teil 3 für Räume mit Rauchverbot

Räume mit Rauchverbot	Geringe körperliche Beanspruchung		Normale körperliche Beanspruchung		Schwerarbeit
Gesamtwärmeabgabe in W	100	120	150	200	300
Mindest Außenluft-Volumenstrom in m ³ *Person ⁻¹ *h ⁻¹	20	30	35	45	70

Die ÖNORM H 6038¹¹ legt unter anderem einen zu planenden Außenluft-Volumenstrom für das Schlafzimmer bei Anlagen ohne Bedarfsregelung mit 20 m³ pro Person und Stunde, bei Anlagen mit Bedarfsregelung mit 25 m³ pro Person und Stunde fest. Für Wohnräume werden 25 m³ pro Person und Stunde angegeben.

Angaben, die speziell auf Schulen ausgelegt sind, finden sich in der veralteten ÖNORM H 6039¹², hier werden personenbezogene Außenluftvolumenströme für einzelne Altersklassen angeführt. Empfohlen wird in dieser Norm die Erfüllung des Kriteriums IDA 3, als Mindestanforderung wird (obschon dies "niedriger" Raumluftqualität entspricht und damit nicht mehr den Minimalforderungen der geltenden bautechnischen Regelungen der Länder genügt) zumindest IDA 4 mit einem Maximalwert von 1200 ppm über Außenluftwert (dies entspricht etwa 1600 ppm absolut) gefordert.

In Form einer indirekten Klassifizierung werden in der ÖNORM EN 13779 (2008) Mindestwerte für den Außenluftvolumenstrom angegeben, die sich auf den maximal zulässigen CO₂-Gehalt der Luft gründen (siehe Kapitel 3.3.2, Tabelle 3).

¹⁰ ÖNORM H 6000-3: Lüftungstechnische Anlagen; Grundregeln; hygienische und physiologische Anforderungen für den Aufenthaltsbereich von Personen. 1989 01 01

¹¹ ÖNORM H 6038 (2014): Lüftungstechnische Anlagen – Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung

¹² ÖNORM H 6039 (2008): Lüftungstechnische Anlagen. Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Unterrichts- Schul- oder Gruppenräumen sowie Räumen mit ähnlicher Zweckbestimmung

In den Schulbaurichtlinien des Instituts für Schul- und Sportstättenbau werden im Kapitel „Bauphysik, Raumklima und Energieeffizienz“ und „Heizungs-, Klima-, Lüftungs- und Sanitäranlagen“ Hinweise zu Schullüftung geben (ÖISS 2016a, b).

Die Möglichkeiten der Lüftung von Schulen werden in der VDI 6040 Blätter 1 und 2¹³ beschrieben. Dabei werden neben freier und maschineller Lüftung auch Varianten hybrider Lüftung aufgezeigt. Ausgehend von den Anforderungen an den Schulraum (Blatt 1) werden Anwendungsbeispiele (Blatt 2) dargestellt, mit denen die gestellten Anforderungen einhaltbar sind. Dazu werden personenbezogene Luftvolumenströme zur Dimensionierung in Abhängigkeit von Jahrgangsstufe und Aktivität angegeben, sowie die Auslegungsgrundsätze für freie und maschinelle Lüftung erläutert.

In der DIN 1946-6 Beiblätter 1 und 2¹⁴ werden allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung beschrieben. Insbesondere werden hier Beispielberechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme und ein Lüftungskonzept (allerdings primär nicht für den hygienischen Luftwechsel, sondern zur Vermeidung erhöhter Feuchte gedacht) behandelt.

¹³ VDI 6040 Blatt 1 (2011): Raumluftechnik - Schulen - Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien). 2011 06

VDI 6040 Blatt 2 (2015): Raumluftechnik - Schulen - Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien). 2015 09

¹⁴ DIN 1946-6 Beiblatt 1 (2012): Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung - Beiblatt 1: Beispielberechnungen für ausgewählte Lüftungssysteme. 2012 09

DIN 1946-6 Beiblatt 2 (2013): Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung - Beiblatt 2: Lüftungskonzept. 2013 03

5 BEURTEILUNG VON CO₂-KONZENTRATIONEN

5.1 ALLGEMEINES

CO₂ dient als Indikator für als schlecht empfundene Raumluft bzw. den damit verbundenen Befindlichkeitsstörungen und Leistungsreduktionen. Die Konzentration dieses Parameters ist auch eine Maßzahl für die Menge der von Menschen abgegebenen flüchtigen Stoffe. Eine genaue Trennung der Wirkungen von CO₂ als Stoff selbst und der Wirkungen anderer von Menschen abgegebenen Substanzen ist auf Grund fehlender diesbezüglicher wissenschaftlichen Studien nicht möglich. Wegen der Besonderheiten dieses komplexen Substanzgemisches ist es nicht möglich, das im „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie vorgestellte, für die Ableitung von Wirkungsbezogenen Innenraumrichtwerten (WIR) entwickelte Basisschema anzuwenden.

Zur Abschätzung der Innenraumluft-Qualität wird im Folgenden ein Klassifizierungsschema für die CO₂-Konzentration mit angeschlossener Bewertung angegeben. Diese Bereiche beruhen auf den in Kapitel 2.3 angeführten Untersuchungen, Erfahrungen der Praxis und dem Stand der Technik. Es handelt sich auf Grund der Eigenschaft von CO₂ als Indikator anderer, in ihrer Zusammensetzung variierender Stoffe um keine toxikologische Bewertung bzw. Ableitung streng im Sinne des Basisschemas (siehe „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie).

Die CO₂-Konzentration eignet sich nicht als alleiniges Kriterium für eine allfällige gesundheitliche Bewertung, sondern ist vielmehr als einer der Indikatoren für die Gesamtsituation anzusehen. Bei der Beurteilung von Innenräumen ist vor allem die in den Räumen durchgeführte Aktivität mit zu berücksichtigen (z.B. geistige Arbeit, körperliche Tätigkeit, Schlaf).

Es ist bei der Klassifizierung zu berücksichtigen, dass die Konzentration an CO₂ zwar mit den von Menschen abgegebenen Stoffen korreliert, zusätzlich vorhandene Raumluftinhaltsstoffe jedoch nicht berücksichtigt werden. Diese Stoffe (organische und anorganische Substanzen) sind daher einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen.

5.2 DEFINITIONEN

Der Beurteilungszeitraum ist in Kapitel 3.1.2 definiert. Ein Momentanwert ist die absolut gemessene CO₂-Konzentration, die abhängig vom jeweils angewandten Messverfahren für ein Intervall von maximal einer Minute als repräsentativ angesehen wird.

Als „Innenräume, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden“, versteht man solche Räume, in denen zumindest von einer Person überwiegend geistige Tätigkeiten wie Büroarbeit verrichtet wird, weiters Schul-, Unterrichts- und Vortragsräume. Als „Räume, die zur Regeneration dienen“, werden vor allem Schlafräume, Hotelzimmer und Räume ähnlicher Nutzung verstanden.

Als dauernd benutzt gilt ein Raum dann, wenn er während des Beurteilungszeitraumes regelmäßig und über einen längeren Zeitraum von Menschen benutzt wird. Eine „geringe Nutzungsdauer eines Raumes“ liegt vor, wenn der jeweilige Raum insgesamt nicht mehr als eine halbe Stunde pro Tag von der gleichen Person benutzt wird, bspw. Archive, Gänge oder Nassräume. Auch wenn mehrere Personen über kurze Zeiträume (< 0,5 h/Tag) den Raum benutzen, ist der Raum dieser Kategorie zuzuordnen.

Im Folgenden werden die Angaben für die Konzentrationen an CO₂ in der Einheit „ppm“ angegeben. Die Umrechnung in andere Einheiten erfolgt laut der Umrechnungsfaktoren in Kapitel 2.1.

5.3 BEWERTUNG DER RAUMLUFTQUALITÄT

Die Bewertung der Raumluftqualität in Hinblick auf CO₂ erfolgt vor allem für Innenräume, die zum nicht nur vorübergehenden, sondern zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen (Wohn- oder Büroräume, Ausbildungs- und Vortragsräume insbesondere Schulräume, Gasträume usw.) bestimmt sind. Nebenräume, die nur fallweise betreten werden, können jedoch ebenfalls mit dem vorliegenden Schema beurteilt werden. Bei der Bewertung wird nicht zwischen natürlich (ausschließlich über Fenster) und mechanisch be- und entlüfteten Innenräumen sowie Innenräumen mit Hybridlüftung unterschieden.

CO₂-Emissionen, deren Quelle weder in der Außenluft noch bei den in den Innenräumen anwesenden Lebewesen liegt, können ebenfalls mit dem gegebenen Schema beurteilt werden. Die Bewertung der Raumluftqualität laut Tabelle 7 gilt daher auch für Fälle, in denen CO₂ auch aus anderen Quellen wie Verbrennungsvorgängen (Gasherde, Ethanolöfen) stammt.

Es werden die arithmetischen Mittelwerte (Beurteilungswerte) aller gemessenen, absoluten Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum herangezogen und in Anlehnung an die im informativen Anhang der ÖNORM EN 13779 dargestellten Kategorien den einzelnen Klassen „bis 800 ppm“, „801-1000 ppm“ und „1001-1400 ppm“ bzw. abweichend von der Norm in die Klassen „1401-5000 ppm“ und „über 5000 ppm“ zugeordnet.

Tabelle 7: Richtwerte und Ziele für die Raumlufqualität, Konzentrationsangaben der CO₂-Konzentration in ppm

Klasse	Beschreibung	Arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte für CO ₂ [ppm]
Klasse 1	Ziel für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 800
Klasse 2	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen	≤ 1000
Klasse 3	Allgemeiner Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 1400
Klasse 4	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen	≤ 5000
Außerhalb der Klassen	Für die Nutzung durch Personen nicht akzeptabel	> 5000

Ziel ist, dass in Innenräumen, die zum dauerhaften Aufenthalt von Personen dienen, der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 800 ppm CO₂ absolut liegt.

In Innenräumen, die für den dauerhaften Aufenthalt von Personen vorgesehen sind und in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen (bspw. Schul- und Unterrichtsräume, Vortragsräume, Büros, Schlafräume, Hotelzimmer), sollte der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 1000 ppm CO₂ absolut liegen.

Um niedrige Luftfeuchte in der Innenraumluf bei niedrigen Außentemperaturen und damit niedriger Luftfeuchte der Innenraumluf (innen < 30% rel. Luftfeuchte) zu

vermeiden, können bei fehlender Raumluftbefeuchtung an derartigen Tagen bzw. bei derartigen Situationen erhöhte Konzentrationen an CO₂ akzeptiert werden.

In sonstigen Innenräumen, die für den dauerhaften Aufenthalt von Personen verwendet werden (bspw. Wohnräume mit Ausnahme von Schlafräumen, Verkaufsräume, Gasträume von Gastgewerbebetrieben, Arbeitsräume, in denen keine geistige Tätigkeit verrichtet wird) sollte der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 1400 ppm CO₂ absolut liegen.

In Innenräumen mit geringer Nutzungsdauer durch Personen (bspw. Gänge, Nassräume, Nebenräume, selten benutzte Räume) sollte der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 5000 ppm CO₂ absolut (MAK-Wert laut Grenzwertverordnung) liegen. Eine geringe Nutzungsdauer liegt vor, wenn der jeweilige Raum insgesamt nicht mehr als eine halbe Stunde pro Tag von der gleichen Person benutzt wird.

Liegt eine Überschreitung der angeführten Richtwerte vor, dann sind Maßnahmen einzuleiten, um zu erreichen, dass die Vorgaben eingehalten werden. Im Vordergrund stehen dabei – wenn möglich – Maßnahmen zur Intensivierung der Fensterlüftung. Unabhängig davon sind den Nutzern Empfehlungen hinsichtlich wirkungsvoller belastungsmindernder Maßnahmen (bspw. Verwendung spezieller Fensterbeschläge in Schlafräumen zur Nachtlüftung, Einbau und fachgerechter Betrieb mechanischer Lüftungseinrichtungen, Verringerung der Raumbelegung, usw.) mitzuteilen.

Um zu einer Einschätzung der zu erwartenden Konzentrationen bei anderen Randparametern – bspw. bei der Option eines Einbaues mechanischer Lüftungssysteme – zu gelangen, kann ein Lüftungskonzept erstellt werden. Unter Voraussetzung des Raumvolumens sowie der Lüftung der Räume (Fenster- und Fugenlüftung sowie gegebenenfalls mechanische Lüftungsanlagen) unter Berücksichtigung der geplanten Belegung mit Personen können mittels eines CO₂-Rechenprogrammes¹⁵ die Häufigkeiten der CO₂-Momentanwerte ermittelt werden.

Das Lüftungskonzept zeigt unter Berücksichtigung bauphysikalischer, Lüftungstechnischer und hygienischer Gesichtspunkte, ob in einem gegebenen Fall die freie Lüftung über Fugen und Fenster ausreicht oder ob gegebenenfalls ventilatorgestützte Lüftungssysteme (Abluftsysteme, Zu- und Abluftsysteme mit Wärmerückgewinnung) erforderlich sind und welcher Außenluftvolumenstrom (Luftwechsel) zu wählen ist.

¹⁵ bspw. Tappler (2015): <http://raumluft.linux47.webhome.at/rlt-anlagen/co2-rechner/>

5.4 ABDECKUNG GESETZLICHER VORGABEN

Bei Einhaltung der Mindestvorgaben für dauernd von Menschen genutzte Innenräume laut Kapitel 5.3 ist davon auszugehen, dass unter anderem auch folgende gesetzliche Vorgaben in Hinblick auf anthropogene Emissionen erfüllt sind:

- Vorgaben laut § 26 Abs. 1, Arbeitsstättenverordnung – AstV 1998 i.d.g.F. (Auszug):
„Als Arbeitsräume dürfen nur Räume verwendet werden, denen ausreichend frische, von Verunreinigungen möglichst freie Luft zugeführt und aus denen verbrauchte Luft abgeführt wird“.
- Vorgaben laut § 22 Abs. 3, ArbeitnehmerInnenschutzgesetz – AschG 1994 i.d.g.F.:
„In Arbeitsräumen muss unter Berücksichtigung der Arbeitsvorgänge und der körperlichen Belastung der Arbeitnehmer ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein und müssen raumklimatische Verhältnisse herrschen, die dem menschlichen Organismus angemessen sind.“
- Vorgaben der bautechnischen Vorschriften der Länder zur Gewährleistung eines gesunden Raumklimas bzw. für „ausreichende Lüftung“ in Hinblick auf anthropogene Emissionen.

Einem Lüftungskonzept kommt eine zentrale Bedeutung zu – nur damit kann die vor allem bei Neu- und Umbauten zu stellende Frage fachlich begründet beantwortet werden, ob in einem bestimmten Gebäude zusätzlich zur Fensterlüftung mechanische Lüftungsmaßnahmen erforderlich sind oder nicht. Ein Lüftungskonzept bietet den Nachweis, dass die dem Gebäude bzw. den einzelnen Räumen zugeführten Luftvolumina den Erfordernissen der OIB-RL 3 (als Richtwert für die Frischluftzufuhr zu Wohnräumen werden 25 m³ pro Person und Stunde genannt) bzw. den wortgleichen jeweiligen bautechnischen Regelungen der Länder entsprechen.

6 LITERATUR

Eine Auflistung innenraumrelevanter Regelwerke findet sich im Anhang III der Richtlinie, die nicht im Anhang aufgeführten Regelwerke sind in den Fußnoten bei Erwähnung der Regelwerke aufgeführt.

Ad-hoc AG (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Ad-hoc Arbeitsgruppe „Innenraumrichtwerte“ der Innenraumluft-hygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 51: 1358 -1369

AK Lüftung (2017): Anforderungen Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen. AK Lüftung des Umweltbundesamtes bestehend aus der Kommission Nachhaltiges Bauen (KNBau) und der Innenraumluft-hygiene-Kommission (IRK), Deutschland

Allen J, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD (2016): Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. Environ Health Perspect 124: 805-812

Amt der OÖ. Landesregierung (2003): Innenraumsituation in Oberösterreichischen Pflichtschulen, Berufsschulen und Landwirtschaftlichen Fachschulen, Erhebungs- und Messprogramm: Kohlenstoffdioxid und Raumklima. Eigenverlag

Apte MG, Fisk WJ, Daisey JM (2000): Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: An analysis of the 1994-1996 BASE study data. Indoor Air 10: 246-257

ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (1994 i.d.g.F.): Bundesgesetz über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz - ASchG). BGBl. Nr. 450/1994

Arbeitsstättenverordnung (1998 i.d.g.F.): Verordnung der Bundesministerin für Arbeit, Gesundheit und Soziales (Arbeitsstättenverordnung - AStV). BGBl. II, Nr. 368/1998

ASHRAE (1989): ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) Standard 62 – 1989: Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta, GA

Batterman S, Peng CY (1995): TVOC and CO₂-concentrations as indicators in indoor air quality studies. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 56: 55-65

Bischof W, Witthauer J (1993): Mixed gas sensors – strategies in non-specific control of IAQ. In Indoor Air '93 – Proc. 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, Finland, Vol. 5: 39-44

- Brandl A, Tappler P, Twrdik F, Damberger B (2001): Untersuchungen raumluft-hygienischer Parameter in oberösterreichischen Schulen. In: AGÖF Tagungsband des 6. Fachkongresses 2001 – Umwelt, Gebäude und Gesundheit, Nürnberg: 355-366
- BUWAL (1997): Luftqualität in Innenräumen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287
- Corsi RL, Torres VM, Sanders M, Kinney KA (2002): Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools: Results of the Tesias Study. In Indoor Air '02 – Proc. 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, USA, Vol. 2: 74-79
- CR 1752 (1998): Lüftung von Gebäuden – Auslegungskriterien für Innenräume (CEN CR 1752: Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment, Final Draft)
- Daisey J, Angell W and Apte M (2003): Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. Indoor Air 13: 53-64
- ECA (1992): Ventilation Requirements in Buildings, Report No 11. European Concerted Action – Indoor Air Quality & its Impact on Man. Commission of the European Communities, Joint Research Centre
- Erdmann CA, Steiner KC, Apte MG (2002): Indoor carbon dioxide concentrations and sick building syndrome symptoms in the base study revisited: Analyses of the 100 building dataset. In Indoor Air '02 – Proc. 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, USA, Vol. 3: 443-448
- Fehlmann J, Wanner HU, Zamboni M (1993): Indoor air quality and energy consumption with demand controlled ventilation in an auditorium. In Indoor Air '93 – Proc. 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, Finland, Vol. 5: 45-50
- Fehlmann J, Wanner HU (1993): Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. Indoor Air 3: 41-50
- Ferng SF, Lee LW (2002): Indoor air quality assessment of day care facilities with carbon dioxide, temperature, and humidity as indicators. J. Environ. Health 65: 14-18
- Friedberger E (1923): Untersuchungen über Wohnungsverhältnisse insbesondere über Kleinwohnungen und deren Mieter in Greifswald. Fischer, Jena
- Greim H (Hrsg) (1994): Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-Arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten, Kapitel: Kohlendioxid. VCH, Weinheim
- Grenzwerteverordnung (2011): BGBl. II Nr. 253/2001 i.d.g.F.: Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz über Grenzwerte für Arbeitsstoffe sowie über krebserzeugende und fortpflanzungsgefährdende (reproduktionstoxische) Arbeitsstoffe (GKV 2011)
- Hoskins JA, Brown RC, Levy LS (1993): Current levels of air contaminants in indoor air in Europe: a review of real situations. Indoor Environ. 2: 246-256

- Huber G, Wanner HU (1982): Raumluftqualität und minimale Lüftungsraten. Ges. Ing. 103: 207-210
- Johnson R (1993): UK regulations and practice for reducing soil gas in dwellings. In Indoor Air '93 – Proc. 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, Finland, Vol. 5: 549-553
- Kajtár L, Bánhidi L, and Leitner A (2005): Air quality and thermal comfort in kitchens. In Proceedings Indoor Air '05, Vol. 2: 2371-2375
- Keskinen J, Kulmala V, Graeffe G, Hautanen J, Janka K (1987): Continuous monitoring of air impurities in dwellings. In Indoor Air '87 – Proc. 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Berlin, Deutschland, Vol. 2: 242-246
- Kim CS, Lim YM, Yang JK, Hong CS, Shin DC (2002): Effects of indoor CO₂-concentrations on wheezing attacks in children. In Indoor Air '02 – Proc. 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, USA, Vol. 1: 492-497
- Knaus C, Spitzer MH, Hartmann T (2017): Forschungsprojekt zu Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung. Forschungsprogramm Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Internet vom 22.08.2017:
<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2016/lueftungskonzepte/01-start.html?nn=436654>
- Leech JA, Raizenne M, Gusdorf J (2004): Health in occupants of energy efficient new homes. Indoor Air 14: 169-173
- Lindgren T, Norbäck D (2002): Cabin air pollutants and climate in an aircraft with recirculated air on intercontinental flights. In Indoor Air '02 – Proc. 9th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, USA, Vol. 4: 788-793
- Moriske H-J (2002): Luftqualität in Innenräumen von Verkehrsmitteln. Zusammenfassung der Ergebnisse der 9. WaBoLu-Innenraumtage vom 6. bis 8. Mai 2002 im Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 45: 722-727
- Müller-Limroth W (1977): zit. in Luftqualität in Innenräumen (1997). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287
- Müller D (2017): Auswertung und Bewertung von Messungen zur Raumluftqualität bzgl. der CO₂-Konzentration und Raumluftfeuchte in verschiedenen Schulen in Deutschland, Friedrich-Alexander-Universität & Hochbauamt der Stadt Nürnberg, Kommunales Energiemanagement und Bauphysik, Eigenverlag
- NLGA (2004): Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen. NLGA - Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Internet vom 21.08.2017:
http://www.nlga.niedersachsen.de/ps/tools/download.php?file=/live/institution/dms/mand_20/psfile/docfile/32/nlga_sth3_4bc2db24b5d2c.pdf&name=Schulprojektbericht&disposition=attachment

- ÖISS (2016a): Bauphysik, Raumklima und Energieeffizienz (Unterkapitel der Schulbaurichtlinien). Erstellt durch den Arbeitskreis „Schulraum“ im Österreichischen Institut für Schul- und Sportstättenbau, Eigenverlag
- ÖISS (2016b): Heizungs-, Klima-, Lüftungs- und Sanitäreanlagen (Unterkapitel der Schulbaurichtlinien). Erstellt durch den Arbeitskreis „Schulraum“ im Österreichischen Institut für Schul- und Sportstättenbau, Eigenverlag
- Pettenkofer M von (1858): Über den Luftwechsel in Wohnungen. Cotta, München
- Pluschke P (1996): Luftschadstoffe in Innenräumen. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- Prescher K-E (1982): Auftreten von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Stickstoffoxiden beim Betrieb von Gasherden. In: Aurand K, Seifert B, Wegner J (Hrsg): Luftqualität in Innenräumen. Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene Nr. 53. Fischer, Stuttgart New York: 191-198
- Recknagel W, Sprenger E, Schramek E-R (1999): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Herausgegeben von Ernst Rudolf Schramek, 69. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München, Wien
- Rietschel H (1994): Raumklimotechnik, Band 1 Grundlagen. 16. Auflage, herausgegeben von Horst Esdorn, Springer-Verlag Berlin
- Rigos E (1981): CO₂-Konzentration im Klassenzimmer. Umschau 81: 172-174
- Rudnick S, Milton D (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. Indoor Air 13: 237-245
- Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WJ (2012): Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. Environ Health Perspect; DOI:10.1289/ehp.1104789. Internet vom 05.04.16: <http://ehp.niehs.nih.gov/1104789/>
- Salthammer T, Uhde E, Schripp T, Schieweck A, Morawska L, Mazaheri M, Clifford S, He C, Buonanno G, Querol X, Viana M, Kumar P (2016): Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. Environment International 94, 196–210
- 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
- Shaughnessy R, Haverinen-Shaughnessy U, Nevalainen A and Moschandreas D (2006): The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children. Indoor Air 16, 465–468.
- Sohn JR, Choi DW, Kim YS, Roh YM and Lee CM (2005): A survey of indoor air quality within public transport vehicles operating in Seoul. In Indoor Air '05 – Proc. 10th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China, Vol. 1: 802-805
- Tappler P, Damberger B (1996): Interzonal airflow from garages to occupied zones as one reason for building related illness: three case studies using tracer gas

measurements. In Indoor Air '96 – Proc. 7th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Nagoya, Japan, Vol. 4: 119-124

Tappler P, Muñoz-Czerny U, Damberger B, Hengsberger H, Ringer W, Twrdik F, Torghele K, Kundi M, Wanka A, Wallner P, Hutter HP (2014): Lüftung 3.0. Bewohnergesundheit und Raumluftqualität in neu errichteten, energieeffizienten Wohnhäusern. FFG, 1. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020 Projektnummer: 819037

Tappler P, Muñoz-Czerny U, Damberger B, Twrdik F, Schlager R, Hutter HP (2015): Innenraumschadstoffe durch Verbrennungsprozesse: Ethanol- und Speicheröfen.

Tappler P (2015): Rechenblatt zur Berechnung der CO₂-Konzentrationen in Schulräumen. Internet vom 20.08.2017 unter <http://www.raumluft.org>

Turiel I, Rudy JV (1982): Occupant-generated CO₂ as an indicator of ventilation rate. ASHRAE Transactions 88:197-210

UBA (1998): Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen. Hrsg: Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene. Eigenverlag, Berlin

VDI-Bildungswerk GmbH (Hrsg) (1991): Analytik bei Abfallentsorgung und Altlasten. VDI, Düsseldorf: 130

Wallner P, Muñoz-Czerny U, Tappler P, Wanka A, Kundi M, Shelton JF, Hutter H-P (2015): Indoor environmental quality in mechanically ventilated, energy-efficient buildings vs. conventional buildings. International Journal of Environmental Research and Public Health 2015 (11):14132-14147.

Wallner P, Tappler P, Muñoz-Czerny U, Damberger B, Wanka A, Kundi M, Shelton JF, Hutter H-P (2017): Health and wellbeing of occupants in highly energy efficient buildings: a field study. International Journal of Environmental Research and Public Health 2017 (14).

Wang TC (1975): A study of bioeffluents in a college classroom. ASHRAE Transactions 81: 32-44

Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO (2000): The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity. Indoor Air 10: 222-236

VDI 4300 Blatt 7 (2001): Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Beuth-Verlag

VDI 4300 Blatt 9 (2005): Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid. Beuth-Verlag

Witthauer J, Horn H, Bischof W (1993): Raumluftqualität – Belastung, Bewertung, Beeinflussung. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe