

BEWERTUNG DER INNENRAUMLUFT

PHYSIKALISCHE FAKTOREN

KOHLENSTOFFDIOXID ALS LÜFTUNGSPARAMETER

AUTORENVERZEICHNIS

In alphabetischer Reihenfolge

Dipl.-Ing. Dr. Rolf BOOS

Dipl.-Ing. Bernhard DAMBERGER

Dipl.-Ing. Dr. Hans-Peter HUTTER

Univ.-Prof. Dr. Michael KUNDI

Dr. Hanns MOSHAMMER

Dipl.-Ing. Peter TAPPLER

Dipl.-Ing. Felix TWRDIK

Dr. Peter WALLNER

INHALTSVERZEICHNIS

1	Allgemeine Eigenschaften	5
1.1	Chemisch-physikalische Eigenschaften, Allgemeines	5
1.2	Einleitung	6
1.3	CO ₂ als Lüftungsparameter	6
1.4	Vorkommen und Verbreitung	8
1.4.1	Verbreitung in der Umwelt	8
1.4.2	Der Mensch als Quelle von CO ₂ in Innenräumen	8
1.4.3	Abiotische Quellen von CO ₂ in Innenräumen.....	9
1.4.4	Studien zu CO ₂ in Innenräumen	10
2	Messstrategie, Analytik und Prüfbericht.....	14
2.1	Messstrategie, Probenahme	14
2.1.1	Allgemeines	14
2.1.2	Zeitpunkt der Messung und Beurteilungszeitraum.....	14
2.1.3	Ziel der Messung, Messstrategie	15
2.1.4	Ort der Messung, weitere Vorgaben	16
2.2	Analytik	17
2.3	Prüfbericht	18
3	Toxikologie	19
3.1	Allgemeine Wirkungen auf den Menschen	19
3.2	Wirkungen auf die Leistungsfähigkeit	21
3.3	Bestehende Regelungen	22
3.3.1	Regelungen für CO ₂	22
3.3.2	Regelungen für den abgeleiteten Wert „Außenluft-Volumenstrom“	23
4	Beurteilung von CO₂-Konzentrationen.....	25
4.1	Allgemeines	25
4.2	Definitionen	25
4.3	Bewertung der Raumlufthqualität	26
4.4	Natürlich und mechanisch belüftete Innenräume	27
4.5	Beurteilungsschema für natürlich belüftete Räume	28
4.6	Beurteilungsschema für mechanisch belüftete Räume	28
4.7	gesetzliche Vorgaben	29
4.8	Zusammenfassung	30
5	Literatur	32

1 ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

1.1 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)

Massendichte: 1,9769 g/l (273,15 K, 1013,25 hPa)

Rel. Dampfdichte (Luft = 1): 1,53

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%

1.2 EINLEITUNG

Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird im gegenständlichen Kapitel als physikalischer Faktor bezeichnet, da es im wesentlichen als Indikator für die Belüftungssituation aufgefasst wird. Da Kohlendioxid in Innenräumen hauptsächlich ein Produkt des menschlichen Stoffwechsels ist, wird die Verbindung in den üblicherweise auftretenden Konzentrationen nicht als Schadstoff bezeichnet.

1.3 CO₂ ALS LÜFTUNGSPARAMETER

Die Konzentration von CO₂ in Innenräumen dient vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der vom Menschen abgegebenen organischen Emissionen und Geruchsstoffe. Als Produkt der menschlichen Atmung ist der CO₂-Gehalt der Innenraumluft daher unmittelbar Ausdruck der Intensität der Nutzung eines Raumes.

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 1 000 ppm (1 830 mg/m³) 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 (1 000 ppm = 1 830 mg/m³) 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 1 500 ppm (2 750 mg/m³) 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 Innenraumlufte 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 Raumlufteverhältnisse heranzuziehen. Batterman und Peng (1995) haben als Kenngröße für die Innenraumlufteverhältnisse 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 Umgebungslufte. Die Werte sollen vor allem Hinweise darauf geben, ob die Raumlufte 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 (ÖNORM 13779 2005).

Die wesentliche Bedeutung des relativ leicht zu ermittelnden Indikators CO₂ liegt darin, dass durch ihn Konzentrationen definiert werden, die einen Hinweis auf hygienisch unzureichende Raumluftequalität geben. Er eignet sich neben dieser Funktion als Orientierungsmarke auch für andere Regelungsbereiche, so z.B. für die Dimensionierung von raumlufte-technischen Anlagen oder für Lüftungsanweisungen in natürlich belüfteten, dichter belegten Räumen wie Schulklassen oder Versammlungsräumen. Für raumlufte-technische 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 (Turjel 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 raumlufte-technischen 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 der 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 (Amt der OÖ Landesregierung 2003b)

und im Anschluß zur Anwendung auch für allgemeine Innenräume weiterentwickelt. Das Rechenblatt kann unter obu@lebensministerium.at oder Tel: +43(0)800240260 (Stand 2006) bei der Servicestelle des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft als excel[®]-Datenfile bezogen werden.

1.4 VORKOMMEN UND VERBREITUNG

1.4.1 Verbreitung in der Umwelt

Die CO₂-Konzentration unbelasteter Außenluft ist innerhalb der letzten 100 Jahre von etwa 300 ppm (550 mg/m³) 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. In ländlichen Gebieten ohne bedeutende Emissionsquellen liegt die mittlere Jahreskonzentration bei etwa 350 ppm (640 mg/m³). In kleineren Städten liegt die mittlere Jahreskonzentration bei etwa 375 ppm (690 mg/m³), in intensiv genutzten Stadtzentren bei etwa 400 ppm (730 mg/m³) (ÖNORM 13779 2005). Auch deutlich höhere maximale Konzentrationen können auftreten.

1.4.2 Der Mensch als Quelle von CO₂ in Innenräumen

In der Innenraumluft ist die CO₂-Konzentration 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 10 000 ppm (18 300 mg/m³) ansteigen.

In Innenräumen ist der Mensch die bedeutendste Quelle an CO₂. Die Literaturangaben der CO₂-Abgabe für erwachsene Personen schwanken in einem relativ weiten Bereich. Das Verhältnis der CO₂-Konzentration in inhaliertes zu exhalierter Luft liegt bei ca. 1:140 (Pluschke 1996).

Tabelle 1: Literaturangaben für die CO₂-Abgabe von Menschen

Literaturstelle	Wert in l/h ^a	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

^a Angaben in Liter CO₂ pro Stunde

1.4.3 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 mit offener Flamme und ohne Kaminanschluß können die CO₂-Konzentration erheblich erhöhen. Bei diesen offenen, zum Teil unvollständigen Verbrennungsprozessen spielen freilich unter lufthygienischen Gesichtspunkten eine Reihe anderer Schadstoffe (wie CO, NO₂, Formaldehyd, PAK) 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). Eine weitere mögliche Quelle an CO₂ in Verbindung mit undichten Gebäuden kann Nutztierhaltung sein (z.B. Stall unter Wohnraum in älteren Bauernhäusern).

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 Senken vorhanden sein, beispielsweise alkalisch reagierendes Mauerwerk.

1.4.4 Studien zu CO₂ in Innenräumen

Innerhalb von Gebäuden sind typische zeitliche und räumliche Verteilungsmuster der CO₂-Konzentration festzustellen, die sich aus den Nutzungen ergeben. 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 (Rigos 1981) und unter ungünstigen Umständen auch den MAK-Wert (5 000 ppm, 9 000 mg/m³, Stand 2006) überschreiten.

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 1 000 ppm (1 830 mg/m³) lagen (Feng und Lee 2002). Während der Schlafenszeit der Kinder wurden höhere Konzentrationen gefunden als zu Zeiten, in denen sie nicht schliefen.

In Wohngebäuden sind durchschnittliche CO₂-Konzentrationen in der Größenordnung von ca. 400 - 700 ppm (730 - 1 280 mg/m³) 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 (1 280 mg/m³).

Prescher (1982) fand Konzentrationen in der Größenordnung von etwa 1 600 ppm (2 930 mg/m³) 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 hat Konopinski (1989) die höchsten Konzentrationen – in der Größenordnung bis etwa 1 100 ppm (2 010 mg/m³) – in der Phase des Aufwachens und des Aufstehens gemessen. Bei ähnlichen Untersuchungen 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 4 300 ppm (7 870 mg/m³) 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 1 500 ppm (2 750 mg/m³) auftraten.

Zu erinnern ist in diesem Zusammenhang an die wohnhygienischen Untersuchungen von Friedberger (1923), der in den 20er Jahren in den stark überbelegten Massenwohnquartieren dieser Zeit CO₂-Konzentrationen bis zu 5 500 ppm (10 100 mg/m³) gemessen hat, die gleichzeitig mit beträchtlichen Geruchsbelastungen verbunden waren.

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 CO₂-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 CO₂ lag bei 1 370 ppm (2 510 mg/m³), der Median der Maximalwerte lag bei 2 090 ppm (3 820 mg/m³), die absolute Maximalkonzentration an CO₂ lag in einem Klassenraum nach etwa 100 Minuten geschlossenen Fenstern bei einer Belegung von 22 bis 23 Schülern bei 6 680 ppm (12 200 mg/m³).

Im Rahmen einer umfassenden Erhebung von Schadstoffen in oberösterreichischen Schulen wurde unter anderem der Parameter CO₂ in ausgewählten Schulklassen erfasst (Amt der OÖ. Landesregierung 2003a). 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 CO₂ nachgewiesen werden, die den Bereich von 1 000 bis 1 500 ppm (entspricht 1 830 - 2 750 mg/m³, 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 CO₂-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 Zugerscheinungen 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 Zugerscheinungen verbunden.

Aufbauend auf theoretischen Überlegungen wurde ein Rechenblatt (Amt der OÖ Landesregierung 2003b) entwickelt, das als Grundlage für Lüftungsanweisungen in bestehenden Schulen bzw. für die Planung von zukünftigen Schulräumen dienen sollte 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.

Eine Studie, deren Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung wie die in Österreich durchgeführte Untersuchung lagen, wurde in 120 repräsentativen Klassenräumen von texanischen Grundschulen durchgeführt. Der Median der Durchschnittskonzentrationen der Messwerte für CO₂ lag bei 1 286 ppm (2 350 mg/m³), der Median der Maximalwerte lag bei 2 062 ppm (3 770 mg/m³). Die mittlere CO₂-Konzentration lag in 66 % der Räume über 1 000 ppm (1 830 mg/m³). Die maximale Konzentration überschritt in 88 % der Räume den Wert von 1 000 ppm und in 21 % der Räume den Wert von 3 000 ppm (5 490 mg/m³) (Corsi et al. 2002).

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 2 000 ppm (3 660 mg/m³) an (Moriske 2002). Während des Fluges wurden durchschnittlich 1 500 ppm (2 740 mg/m³) 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 1 660 ppm (3 040 mg/m³) und erreichte Werte bis 3 700 ppm (6 770 mg/m³). Bei eingeschalteter Lüftungsanlage während des Fluges lagen die Messwerte in 97% der Fälle unter 1 000 ppm (1 830 mg/m³).

In modernen Hochgeschwindigkeitszügen (ICE der Baureihen III und IV) lag der CO₂-Gehalt der Raumluft in der Regel unter 1 500 ppm (2 740 mg/m³) (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 1 200 ppm (2 200 mg/m³) 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 (4 560 mg/m³) bei Taxis, 2220 ppm (4 060 mg/m³) bei Bussen und 900 ppm (1 650 mg/m³) bei U-Bahnen.

2 MESSSTRATEGIE, ANALYTIK UND PRÜFBERICHT

2.1 MESSSTRATEGIE, PROBENAHEME

2.1.1 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 im „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie verwiesen.

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 Umrechnungsfaktoren in Kapitel 1.1.

2.1.2 Zeitpunkt der Messung und 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 sein. Bei Büros ist der Beurteilungszeitraum in der Regel ein durchschnittlicher Tag von Betriebsbeginn bis Betriebschluss. Für Wohnungen ist insbesondere der Zeitraum der durchgehenden Belegung relevant.

Tabelle 2: Beispiele für Beurteilungszeiträume für CO₂-Messungen

Innenraum	Interessierender Zeitraum	Typische Beurteilungszeiträume in h
Schulklassen	Unterrichtszeit von Unterrichtsbeginn bis -ende	6 - 10
Arbeitsstätten, Büros	Arbeitszeit von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss	8
Vortragssäle, Veranstaltungsräume, Theater	Dauer der Veranstaltung inkl. Pausen	2 - 6
Wohnungen	Nachtsituation	8
Wohnungen	Gesamtsituation bei dauernd benutzten Räumen	24
Verkehrsmittel	Situation in Flugzeugen, Nachtsituation z.B. in Liege- und Schlafwagenabteilen von Zügen	6 - 8

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 Kategorie 3 nach Beaufort (Bereich 3,6 - 5,4 m/s, entspricht „Schwache Brise“ – Blätter und dünne Zweige bewegen sich) nicht überschreiten.

2.1.3 Ziel der Messung, Messstrategie

Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten der Durchführung von CO₂-Messungen:

- die Messung der durchschnittlichen Konzentration eines Innenraumes bei möglichst vollständiger Durchmischung der Raumlufte oder
- die Messung an bestimmten Messpunkten in einem Raum ohne eigens für die Messung vorgenommene Durchmischung der Raumlufte.

Soll die durchschnittliche Konzentration eines Innenraumes bei möglichst vollständiger Durchmischung der Raumlufte ermittelt werden, muss die Raumlufte vor der Messung mit einem Ventilator vollständig durchmischt werden. Insbesondere bei großen oder verwinkelten Räumen ist die Bildung von „Totzonen“, in denen die Luft

weniger ausgetauscht wird, zu erwarten. Für detaillierte Informationen wird auf die Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 verwiesen (Messung des Luftwechsels).

Wird hingegen die Einhaltung eines Richtwertes überprüft oder allgemein die CO₂-Konzentration unter hygienischen Gesichtspunkten ermittelt, ist keine künstliche Durchmischung vor und während der Probenahme erforderlich. Vielmehr wird an einem repräsentativen oder 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 mehr oder weniger schnell auf einen konstanten Wert ein, der nur durch eine Veränderung des Luftwechsels (Öffnen von Türen oder Fenstern) bzw. durch Veränderung der CO₂-Quellen im Raum verändert wird. Durch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte können diese Ereignisse dokumentiert werden.

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.

Fünf 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).

In jedem Fall sind in einem zeitlich engen Zusammenhang mit der Raumluftmessung stichprobenartige oder kontinuierliche Messungen der Außenluft vorzunehmen. Aufgrund des Tagesganges der CO₂-Außenluftkonzentration und des Einflusses von lokalen Emittenten können derartige Messungen nicht durch allgemeine Literaturdaten ersetzt werden.

2.1.4 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 anzubringen. 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 jedenfalls die Vorbelastung der Zuluft zu ermitteln, die von der Konzentration in der Außenluft abweichen kann. Diese Vorbelastung kann z.B. durch einen Umluftanteil hervorgerufen werden.

2.2 ANALYTIK

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

Für die Bestimmung von CO₂ in Luftproben stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das am häufigsten verwendete Messprinzip und Referenzverfahren ist – wie für die Außenluftuntersuchungen – die kontinuierliche Bestimmung mittels nicht-dispersiver Infrarot-Spektroskopie (NDIR). Hierbei erfolgt eine aktive Probenahme mit einer Probenpumpe, die selektive Detektion in einer Messzelle und die Kalibrierung mit Prüfgasen.

Eine ebenfalls kontinuierliche CO₂-Bestimmung ist durch die photoakustische Spektroskopie (PAS) möglich. Hierbei wird die im infraroten Bereich absorbierte Anregungsenergie in ein akustisches Signal umgewandelt. Beide Verfahren ermöglichen eine zuverlässige Bestimmung in einem Konzentrationsbereich von etwa 1 ppm bis 10 000 ppm und erfordern einen Abgleich gegen Quereinflüsse (Wasserdampf).

Das angewandte Messverfahren muss geeignet sein, Einzelwerte¹ zu liefern, die für ein Bezugsintervall von maximal 10 Minuten als repräsentativ angesehen werden.

¹ Definition des Begriffes Einzelwert im Kapitel 4.2

Durch die kontinuierliche Registrierung der CO₂-Konzentrationen kann die zeitliche Veränderung verfolgt werden, um Hinweise für Empfehlungen (z.B. für das Lüften, Einbau von raumlufftechnischen Anlagen etc.) zu gewinnen.

Für die Ermittlung von Orientierungswerten können auch Prüfröhrchen verwendet werden. Bei aktiven Kurzzeitprobenahmen wird die Raumluff mit Hilfe einer Pumpe durch das Prüfröhrchen gesaugt und unmittelbar ein Messwert gewonnen. Bei direkt anzeigenden Diffusionsprüfröhrchen sind jedoch einige Stunden für die Probenahme erforderlich, was sie für die Ermittlung von Konzentrationsgängen ungeeignet macht. Darüber hinaus sind die mit einer passiven Probenahme verbundenen Randbedingungen zu beachten.

Die für die Regelung von raumlufftechnischen Anlagen eingesetzten selektiven CO₂-Fühler arbeiten meist nach dem 2-Kanal-Infrarot-Absorptionsprinzip, einkanalige Fühler sind ebenfalls in Gebrauch.

Elektrochemische Sensoren und Halbleiter-Gassensoren sind nicht für Messungen in Innenräumen geeignet, da auch andere Raumluffinhaltsstoffe angezeigt werden; diese Methoden sind daher zu wenig spezifisch.

Darüber hinaus gibt es weitere Messverfahren (z.B. Gaschromatographie). Diese können nach Maßgabe des Messzieles und unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen in Innenräumen zum Einsatz kommen.

Probenahmen in Innenräumen über einen längeren Zeitraum sind prinzipiell problematisch, 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.

2.3 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, die Aktivität sowie das Alter der anwesenden Personen sowie die Leistungsstufe einer vorhandenen raumlufftechnischen Anlage zu protokollieren. Veränderungen dieser Parameter sind mit der Angabe des Zeitpunktes der Veränderung aufzunehmen.

Bauseitig sind die Anzahl, Art und der Wartungszustand der Fenster und Türen sowie die jeweilige Fugenlänge zu erfassen. 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 Zustand der Fenster, Fugenlänge der Fenster und Türen, Windgeschwindigkeit außen etc. abhängt, sind

alle Faktoren, die im Kapitel 2.1 thematisiert sind, so weit wie möglich detailliert im Untersuchungsbericht zu beschreiben.

3 TOXIKOLOGIE

3.1 ALLGEMEINE WIRKUNGEN AUF DEN MENSCHEN

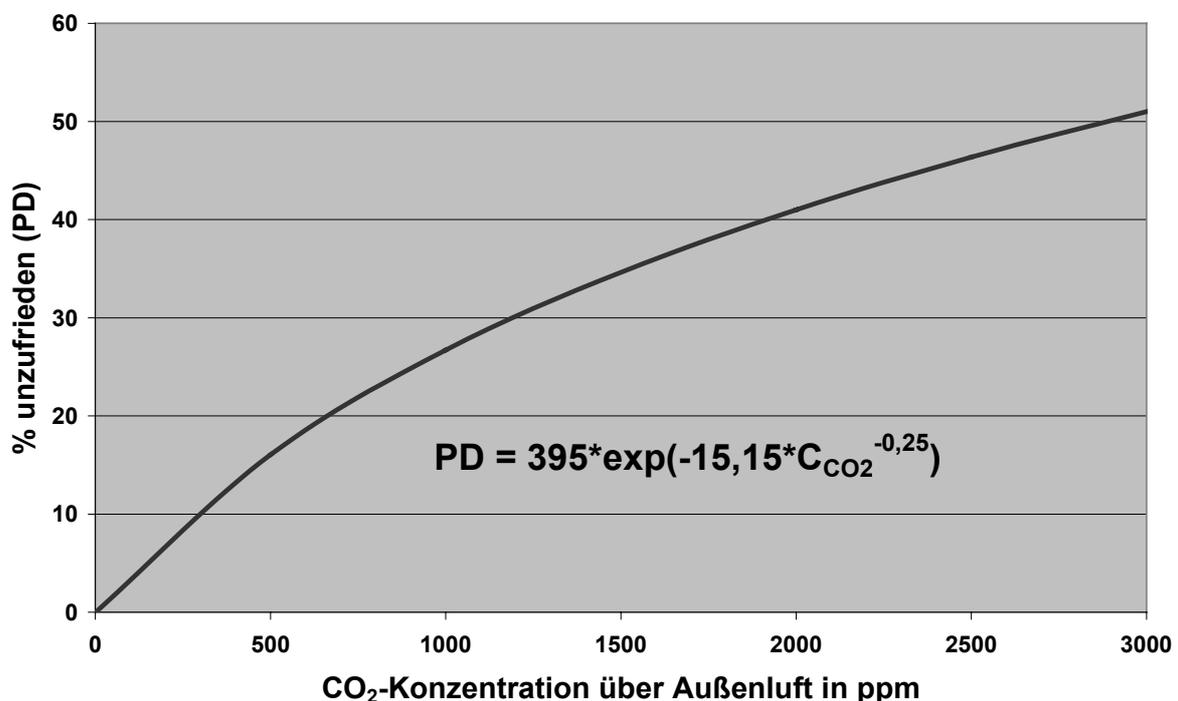
Bei etwa 1 000 ppm (1 800 mg/m³) empfinden rund 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend (BUWAL 1997). Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO₂-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) kann nach folgender Formel abgeschätzt werden (ECA 1992):

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

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

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).

Eine Zusammenschau von Studien zu gesundheitlichen Wirkungen und Kohlendioxid zeigte, dass sich in 50 Prozent der Untersuchungen mit abnehmender CO₂-Konzentration die sogenannten Sick-Building-Syndrom-assoziierten Beschwerden (z.B. Reizungen und Trockenheit von Schleimhäuten, Müdigkeit, Kopfschmerzen) verringern (Seppänen et al. 1999). In etwa der Hälfte der betrachteten Studien wurden statistisch signifikante, positive Korrelationen mit dem Auftreten einer oder mehrerer Beschwerden des Sick-Building-Syndroms festgestellt. In keiner einzigen Arbeit nahmen die Symptome mit abnehmender CO₂-Konzentration zu.

Eine amerikanische Studie in Gebäuden mit raumlufttechnischen 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 1 000 ppm absolut (Apte et al. 2000). Eine Folgestudie mit einer erweiterten Datengrundlage ergab Ergebnisse, die in die gleiche Richtung wiesen. Die odd-ratios lagen 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 an 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 Zuluftvolumenströmen aus und befragten sie hinsichtlich Befindlichkeitsstörungen. Es ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen den personenbezogenen Frischluftvolumenströmen und Berichten über diverse Befindlichkeitsstörungen. Höhere Ventilationsraten reduzierten signifikant den Anteil der Personen, die mit der Luftqualität und der Geruchsintensität unzufrieden waren, und erhöhten die subjektiv empfundene Frische der Luft. Weiters reduzierten sie den 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 in 52 energieoptimierten Gebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung und 53 vergleichbaren, natürlich belüfteten Gebäuden wurde die Häufigkeit von verschiedenen gesundheitlichen Beschwerden und Befindlichkeitsstörungen unmittelbar nach Bezug des Gebäudes und ein Jahr danach abgefragt (Leech et al. 2004). Es ergaben sich zwischen den beiden Gruppen von Häusern signifikante Unterschiede in der Verringerung des Auftretens bestimmter innenraumtypischer Beschwerden im Beobachtungszeitraum. Dem Innenraum zugeordnete Beschwerden wie Reizungen der Kehle, Müdigkeit und Husten verringerten sich in den Gebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung signifikant

stärker als in den natürlich belüfteten Gebäuden, nicht innenraumlufthbezogene Beschwerden wie z.B. Durchfall oder Übelkeit zeigten 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. In den bisher angesprochenen Konzentrationsbereichen deutlich unterhalb von 10 000 ppm (18 300 mg/m³) sind keine unmittelbaren physiologischen Wirkungen durch CO₂ zu erwarten. Als Vergiftungszeichen werden bei hohen CO₂-Konzentrationen zunächst u. a. Kopfschmerzen, Schwindel, Ohrensausen, Reflexverlangsamung, motorische Unruhe, Doppeltsehen, Verlust der Augenbewegung, Gesichtsfeldausfälle und schließlich Bewusstseinsstörungen, Bewusstlosigkeit und ein Anstieg der Körpertemperatur sowie eine allgemeine Hypoxie genannt (Greim 1994). Weiters treten Erstickungserscheinungen auf und ab ca. 100 000 ppm (183 000 mg/m³) sind Schwindel und Bewusstseinsverlust dokumentiert, bei noch höheren Konzentrationen tritt vollständige Bewusstlosigkeit ein (Pluschke 1996). Bei extrem hohen CO₂-Konzentrationen in der Luft kann es auch zu Todesfällen kommen (typische Gärkellerunfälle).

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

3.2 WIRKUNGEN AUF DIE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Wargocki et al. (2000) setzten Probanden in Prüfräumen unterschiedlichen personenbezogenen Außenluftvolumenströmen 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 resultierenden Konzentrationen an CO₂) und der Leistungsfähigkeit, der in Bezug auf die 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 - 4 %.

Shaughnessy et al. (2005) fanden in einer Untersuchung in 50 Klassenräumen signifikante Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit von Schülern und der Konzentration an CO₂. Höhere CO₂-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.

3.3 BESTEHENDE REGELUNGEN

3.3.1 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 (1 000 ppm = 1 830 mg/m³), die sogenannte Pettenkofer-Zahl (Pettenkofer 1858), die als Basis für Berechnungen und Regelungen vor allem im Bereich raumluftechnischer Anlagen herangezogen wurde (siehe z.B. ÖNORM H 6000).

In Österreich liegt der derzeit gültige MAK-Wert für CO₂ laut Grenzwertverordnung (2003) bei 5 000 ppm (9 000 mg/m³) bzw. 10 000 ppm (18 000 mg/m³) als Momentanwert für den Beurteilungszeitraum von 60 Minuten. Die deutsche MAK-Werte-Kommission legte einen MAK-Wert von 5 000 ppm fest (MAK- und BAT-Werte-Liste 2003).

In der ÖNORM EN 13779 (2005) 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“² zugeordnet.

Tabelle 3: Klassifizierung der Raumlufqualität nach ÖNORM EN 13779 (2005)

Kategorie	Beschreibung der Raumlufqualität	CO ₂ -Konzentration über Außenluftwert (ppm)	Außenluftrate pro Person und Stunde – Nichtraucher (m ³ *Person ⁻¹ *h ⁻¹)	Luftqualität (decipol)
RAL 1	Speziell	≤ 400	> 54	≤ 1,0
RAL 2	Hoch	400 - 600	36 - 54	1,0 - 1,4
RAL 3	Mittel	600 - 1000	22 - 36	1,4 - 2,5
RAL 4	Niedrig	> 1000	< 22	> 2,5

² 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.

In der deutschen DIN 1946 wird im Teil 2 (Gesundheitstechnische Anforderungen) gefordert, dass der mittlere Volumengehalt an CO₂ 0,15 Vol% (1 500 ppm = 2 750 mg/m³) nicht überschreiten soll (DIN 1946-2 1994).

In einem deutschen Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden (UBA 2003) wird die Meinung vertreten, dass zur Einhaltung des hygienischen Bereiches von unter 1 500 ppm CO₂ (2 750 mg/m³) ein 3- bis 4-facher Luftwechsel pro Stunde erforderlich ist, dies würde allerdings in der Praxis nur durch eine raumluftechnische Anlage mit hohem Luftwechsel erreicht werden können.

3.3.2 Regelungen für den abgeleiteten Wert „Außenluft-Volumenstrom“

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) definiert allgemeine Anforderungen an die Qualität der Raumlufte: 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).

Die ÖNORM H 6000, Teil 3 legt den hygienisch wünschenswerten Mindest-Außenluftvolumenströmen unter anderem eine explizit erwähnte, zu erreichende CO₂-Konzentration von absolut 1 000 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 4: Mindest-Außenluft-Volumenströme nach ÖNORM H 6000 Teil 3 für Räume mit Rauchverbot

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

Angaben, die speziell auf Schulen ausgelegt sind, finden sich in den Richtlinien für den Schulbau des ÖISS (1999), in denen in Unterrichtsräumen für bis 10-jährige eine Frischluft rate von 15 m³ pro Person und Stunde und für über 10-jährige 20 m³ pro Person und Stunde empfohlen werden.

In der DIN 1946 werden im Teil 2 (Gesundheitstechnische Anforderungen) unter anderem Vorgaben für Mindest-Außenluftvolumenströme in unterschiedlich genutzten Räumen gemacht, die eine maximale CO₂-Konzentration von 0,15 Vol % als Basis haben (DIN 1946-2 1994).

Die erforderlichen Mindest-Außenluft-Volumenströme für Wohnungen und Büros werden in ECA (2003) in Form einer Grafik dargestellt, sie unterscheiden sich beträchtlich. Das CEN TC 156 legte Kategorien für Innenraumluf tqualität mit der Bezeichnung „A“, „B“ und „C“ fest. Kategorie A entspricht einem Mindest-Außenluft-Volumenstrom von 36 m³ pro Person und Stunde, Kategorie B von 25,2 m³ pro Person und Stunde und Kategorie C von 14,4 m³ pro Person und Stunde (jeweils für Nichtraucher als Raumbenutzer) (CEN 1998).

In Form einer indirekten Klassifizierung werden in der ÖNORM EN 13779 (2005) Mindestwerte für den Außenluftvolumenstrom angegeben, die sich auf den maximal zulässigen CO₂-Gehalt der Luft gründen, für eine Stoffwechselrate von 1,2 met³ definiert sind und mit den gleichen Bezeichnungen wie die Klassifizierungen über den CO₂-Gehalt versehen wurden (siehe Kapitel 3.3.1, Tabelle 3).

³ Met ist die Einheit für die Stoffwechselrate Ein "met" entspricht der Stoffwechselrate eines normal bekleideten, entspannt sitzenden Menschen.

4 BEURTEILUNG VON CO₂-KONZENTRATIONEN

4.1 ALLGEMEINES

CO₂ dient als Indikator für als schlecht empfundene Raumlufte bzw. den damit verbundenen Befindlichkeitsstörungen und Leistungsreduktionen. Die Konzentration dieses Parameters unter Berücksichtigung der Außenluftkonzentration ist eine Maßzahl für die Menge der von Menschen abgegebenen Stoffe. Wegen der Besonderheiten, die bei einem so entstandenen komplexen Substanzgemisch zu berücksichtigen sind, ist es nicht möglich, das im Teil „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie vorgestellte, für die Ableitung von Wirkungsbezogenen Innenraumrichtwerten (WIR) entwickelte Basisschema anzuwenden.

Zur Abschätzung der Innenraumlufte-Qualität wird im Folgenden ein Klassifizierungsschema für die CO₂-Konzentration mit angeschlossener Bewertung angegeben. Diese Bereiche beruhen auf den in Kapitel 1.4.4 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 Raumlufteinhaltsstoffe jedoch in keiner Weise berücksichtigt werden. Diese Stoffe sind daher einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen. CO₂, dessen Quelle nicht in der Außenluft sowie bei den in den Innenräumen anwesenden Lebewesen liegt (z.B. Verbrennungsvorgänge) ist ebenfalls gesondert zu behandeln.

4.2 DEFINITIONEN

Der Beurteilungszeitraum ist in Kapitel 2.1.2 definiert. Als dauernd benutzt gilt ein Raum dann, wenn er während des Beurteilungszeitraumes regelmäßig von Menschen benutzt wird.

Ein Einzelwert ist die absolut gemessene CO₂-Konzentration, die vom jeweils angewandten Messverfahren für ein Bezugsintervall von maximal 10 Minuten als repräsentativ angesehen wird.

Der Beurteilungswert dCO₂ stellt die Differenz zwischen einem gemessenen CO₂-Einzelwert im Innenraum und jeweilig aktueller CO₂-Konzentration in der Außenluft dar. Ist die Außenluftkonzentration nicht für alle Zeitpunkte, in denen im Innenraum gemessen wurde, bekannt, wird der arithmetische Mittelwert aller im Bezugszeitraum gemessenen Einzelwerte (durchschnittliche Außenluftkonzentration) zur Berechnung des jeweiligen Beurteilungswertes herangezogen. Wenn die Außenluftkonzentration nicht gemessen wird, ist der Wert von 400 ppm anzunehmen.

Als gleitender Stundenmittelwert wird der gleitende arithmetische Mittelwert der einzelnen Beurteilungswerte der letzten Stunde bezeichnet.

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 1.1.

4.3 BEWERTUNG DER RAUMLUFTQUALITÄT

Die Bewertung der Raumlufqualität in Hinblick auf CO₂ im vorliegenden Papier erfolgt laut Tabelle 5. Die Bewertung der Raumlufqualität ist bis auf den zusätzlich eingeführten Bereich größer 1 500 ppm (1 900 ppm absolut) und dem dadurch eingeschränkten Bereich der „niedrigen Raumlufqualität“ mit dem Schema der ÖNORM EN 13779 (2005) ident. Innenräume mit CO₂-Werten größer 1 500 ppm (1 900 ppm absolut) werden mit der zusätzlich eingeführten Klassifikation „sehr niedrige Raumlufqualität“ bezeichnet.

Tabelle 5: Klassifizierung der Raumlufqualität, Konzentrationsangaben als Erhöhung der CO₂-Konzentration gegenüber der Außenluft (dCO₂)

Beschreibung der Raumlufqualität	Beurteilungswert dCO ₂ als CO ₂ -Konzentration über der Außenluft	Entspricht Klassifizierung nach ÖNORM EN 13799
Spezielle Raumlufqualität	≤ 400 ppm	RAL 1
Hohe Raumlufqualität	401 - 600 ppm	RAL 2
Mittlere Raumlufqualität	601 - 1 000 ppm	RAL 3
Niedrige Raumlufqualität	1 001 - 1 500 ppm	RAL 4
Sehr niedrige Raumlufqualität	> 1 500 ppm	

4.4 NATÜRLICH UND MECHANISCH BELÜFTETE INNENRÄUME

Bei der Bewertung wird zwischen natürlich und mechanisch belüfteten Innenräumen unterschieden. Innenräume mit dezentralen raumluftechnischen Anlagen, die konstruktionsbedingt so ausgelegt sind, dass sie nur einen Teil der Zuluft bereit stellen können, sind wie natürlich belüftete Innenräume zu klassifizieren.

Die unterschiedliche Bewertung begründet sich darauf, dass in der Regel der zeitliche Verlauf der CO₂-Konzentrationen in natürlich und mechanisch belüfteten Innenräumen stark voneinander abweichen. In natürlich belüfteten Innenräumen werden Perioden des Anstiegs der Konzentration an CO₂ von Perioden unterbrochen, in denen es zu einem starken Abfall kommt (Lüftungsphasen). Der Raumnutzer hat weiters die Möglichkeit, durch sein Verhalten (Lüften, Türen öffnen etc.) aktiv auf die Qualität der Innenraumluft Einfluss zu nehmen. In mechanisch belüfteten Räumen liegt dagegen die Konzentration an CO₂ meist auf einem relativ konstanten Niveau. In diesen Räumen kann zudem oftmals durch den Nutzer kein Einfluss auf die Qualität der Innenraumluft in Bezug auf CO₂ (und die mit CO₂ assoziierten Luftinhaltsstoffe) genommen werden.

Mechanisch belüftete Innenräume sind aus den oben angeführten Gründen strenger zu klassifizieren als natürlich belüftete Räume. Bei der Bewertung von natürlich belüfteten Innenräumen fließt auch die Praktikabilität und der Stand der Technik in die Bewertung mit ein.

Das Beurteilungsschema ist nicht für Personen anwendbar, die sich weniger als etwa eine Stunde in den betreffenden Räumen aufhalten (z.B. Kunden in Verkaufsräumen).

4.5 BEURTEILUNGSSCHEMA FÜR NATÜRLICH BELÜFTETE RÄUME

Ziel ist, dass in dauernd benutzten, natürlich belüfteten Innenräumen sowohl die Beurteilungswerte als auch die gleitenden Stundenmittelwerte im Beurteilungszeitraum⁴ unter dem Wert von 600 ppm liegen (etwa 1 000 ppm absolut, spezielle bis hohe Raumlufqualität).

Die gleitenden Stundenmittelwerte dürfen in dauernd benutzten, natürlich belüfteten Innenräumen im Beurteilungszeitraum den Wert von 1 000 ppm nicht überschreiten (etwa 1 400 ppm absolut, mindestens mittlere Raumlufqualität).

Kein Beurteilungswert in dauernd benutzten, natürlich belüfteten Innenräumen darf im Bezugszeitraum den Wert von 1 500 ppm überschreiten (etwa 1 900 ppm absolut, mindestens niedrige Raumlufqualität).

4.6 BEURTEILUNGSSCHEMA FÜR MECHANISCH BELÜFTETE RÄUME

Ziel ist, dass in dauernd benutzten, mechanisch belüfteten Innenräumen sowohl die Beurteilungswerte als auch die gleitenden Stundenmittelwerte im Beurteilungszeitraum unter dem Wert von 400 ppm liegen (etwa 800 ppm absolut, spezielle Raumlufqualität).

Die gleitenden Stundenmittelwerte dürfen in dauernd benutzten, mechanisch belüfteten Innenräumen im Beurteilungszeitraum den Wert von 600 ppm nicht überschreiten (etwa 1 000 ppm absolut, mindestens hohe Raumlufqualität).

Kein Beurteilungswert in dauernd benutzten, mechanisch belüfteten Innenräumen darf im Bezugszeitraum den Wert von 1 000 ppm überschreiten (etwa 1 400 ppm absolut, mindestens mittlere Raumlufqualität).

⁴ Definitionen für die Begriffe Beurteilungswert, Stundenmittelwert und Beurteilungszeitraum siehe Kapitel 4.2

4.7 GESETZLICHE VORGABEN

Bei Einhaltung der Mindestvorgaben für dauernd von Menschen genutzte Innenräume laut Kapitel 4.5 und 4.6 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 (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: „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 Bauordnungen der Länder in Hinblick auf Innenraumlufthygiene (Zusammenfassung in „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie, Kap. 3.10.3).

4.8 ZUSAMMENFASSUNG

Tabelle 6: Klassifizierung der Raumlufthqualität in Anlehnung an ÖNORM EN 13779 (2005), Konzentrationsangaben als Erhöhung der CO₂-Konzentration gegenüber der Außenluft

Beschreibung der Raumlufthqualität	Beurteilungswert als CO ₂ -Konzentration über der Außenluft (dCO ₂)	Entspricht Klassifizierung nach ÖNORM EN 13779
Spezielle Raumlufthqualität	≤ 400 ppm	RAL 1
Hohe Raumlufthqualität	401 - 600 ppm	RAL 2
Mittlere Raumlufthqualität	601 - 1 000 ppm	RAL 3
Niedrige Raumlufthqualität	1 001 - 1 500 ppm	RAL 4
Sehr niedrige Raumlufthqualität	> 1 500 ppm	

dCO₂ = Differenz Innenraumlufthkonzentration minus Außenluftkonzentration

Tabelle 7: Zielvorgaben und Mindestanforderungen an dauernd benutzte Innenräume in Hinblick auf CO₂, Konzentrationsangaben als dCO₂

Raumlufthqualität	dCO ₂	Natürlich belüftete Innenräume	Mechanisch belüftete Innenräume
Speziell	≤ 400 ppm	Zielbereich: Beurteilungswerte < 600 ppm	Zielbereich: Beurteilungswerte < 400 ppm
Hoch	401 - 600 ppm		Mindestvorgabe: 1-MWg < 600 ppm
Mittel	601 - 1 000 ppm	Mindestvorgabe: 1-MWg < 1 000 ppm	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte < 1 000 ppm
Niedrig	1 001 - 1 500 ppm	Mindestvorgabe: Alle Beurteilungswerte < 1 500 ppm	
Sehr niedrig	> 1 500 ppm		

1-MWg = maximaler gleitender Stundenmittelwert

dCO₂ = Differenz Innenraumlufthkonzentration minus Außenluftkonzentration

Tabelle 8: Zielvorgaben und Mindestanforderungen an dauernd benutzte Innenräume in Hinblick auf CO₂, Konzentrationsangaben als Innenraumluftkonzentrationen

Natürlich belüftete Innenräume	Mechanisch belüftete Innenräume
Zielbereich: Einzelwerte < etwa 1 000 ppm ⁵	Zielbereich: Einzelwerte < etwa 800 ppm
Mindestvorgabe: 1-MWg < etwa 1 400 ppm	Mindestvorgabe: 1-MWg < etwa 1 000 ppm
Mindestvorgabe: Alle Einzelwerte im Beurteilungs- zeitraum < etwa 1 900 ppm	Mindestvorgabe: Alle Einzelwerte im Beurteilungs- zeitraum < etwa 1 400 ppm

1-MWg = maximaler gleitender Stundenmittelwert

Liegt eine Überschreitung der oben angeführten Mindestvorgaben vor und sind die erhöhten Werte auf anthropogene Emissionen zurückzuführen, dann sind Maßnahmen einzuleiten, um zu erreichen, dass die Mindestvorgaben eingehalten werden. Unabhängig davon sind den Bewohnern Empfehlungen hinsichtlich belastungsmindernder Maßnahmen (Lüften, Verringerung der Raumbelegung, Einbau und fachgerechter Betrieb mechanischer Lüftungsanlagen usw.) mitzuteilen.

⁵ abhängig von Außenluftkonzentrationen

5 LITERATUR

Eine Auflistung innenraumrelevanter Regelwerke finden sich im Anhang III der Richtlinie, die nicht im Anhang aufgeführten Regelwerke sind nachstehend aufgeführt.

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

Amt der OÖ. Landesregierung (2003b): Rechenblatt zur Berechnung der CO₂-Konzentrationen in Schulräumen. 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): Bundesgesetz über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz - ASchG) und mit dem das Allgemeine Sozialversicherungsgesetz, das Arbeitsvertragsrechts-Anpassungsgesetz, das Arbeitsverfassungsgesetz, das Berggesetz 1975, das Bauern-Sozialversicherungsgesetz, das Arbeitsmarktförderungsgesetz, das Arbeitslosenversicherungsgesetz 1977 und das Ausländerbeschäftigungsgesetz geändert werden. BGBl. Nr. 450/1994

Arbeitsstättenverordnung (1998): Verordnung der Bundesministerin für Arbeit, Gesundheit und Soziales, mit der Anforderungen an Arbeitsstätten und an Gebäuden auf Baustellen festgelegt und die Bauarbeiterschutzverordnung geändert wird (Arbeitsstättenverordnung - AStV). BGBl. II, Nr. 368/98

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

CEN (1998): CEN CR 1752. Ventilation for Buildings: Design criteria for the indoor environment. CEN, Brüssel

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): Lüftungs 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. In *Indoor Air* 13(1): 53-64

DIN 1946-2 (1994): Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Berlin, Beuth Verlag

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

ECA (2003): Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy, Report No 23. Prepared by Working Group 16. European Collaborative Action – Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure, European Commission, 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 (2003): BGBl. II Nr. 253/2001 zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 184/2003: Verordnung des BM für Wirtschaft und Arbeit über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und krebserzeugende Arbeitsstoffe

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): Raumlufqualität 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 2005. 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
- Konopinski V (1989): Residential localized carbon dioxide concentrations. In: Brasser LJ, Mulder WC (eds): Man and his Ecosystem. Proceedings of the 8th World clean air congress 1989. Elsevier, Amsterdam New York: 339-344
- 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
- MAK- und BAT-Werte-Liste (2003): Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Mitteilung 39, MAK-Werte-Liste (DFG), Wiley – VCH, Weinheim
- 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 (1977): zit. in Luftqualität in Innenräumen (1997) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287
- ÖISS (1999): Richtlinien für den Schulbau. Erstellt durch den Arbeitskreis „Schulraum“ im Österreichischen Institut für Schul- und Sportstättenbau, Eigenverlag
- ÖNORM EN 13779 (2005): Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen. Ausgabe: 2005-05-01
- 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): Raumklimatechnik, 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

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 (2005): Carbon dioxide concentrations in classrooms and association with student performance: a preliminary study. In *Indoor Air '05 – Proc. 10th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China, Vol. 1: 373-376*

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*

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.

UBA (2003): Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Erarbeitet von der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Berlin. Internet vom 03.05.2004: <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/1824.pdf>

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

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* Vol 10, No. 4: 222-236

VDI 4300 Bl. 7 (2001): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen

VDI 4300 Bl. 9 Entwurf (2003): Messen von Innenraumlufthverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid

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