Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter

Wien, 2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien
Projektleitung aktuelle Ausgabe: DI Peter Tappler
Autoren (in alphabetischer Reihenfolge):
Mst. SV Friedrich Althuber, Dipl.-Ing. Bernhard Damberger, Dipl.-Ing. Andreas Greml,
Assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans-Peter Hutter, Univ.-Prof. Dr. Michael Kundi,
Dr. Ilse Mauritz, Priv.-Doz. Dr. Hanns Moshammer, DI Christoph Tallian, Dipl.-Ing. Felix Twrdik, Mag. Dr. Maria Uhl, Priv.-Doz. Dr. Peter Wallner
Mitglieder des Arbeitskreises Innenraumluft im BMK
Wien, 2024. Stand: 1. März 2024

Vorwort

Der Arbeitskreis Innenraumluft im BMK erstellt und veröffentlicht unterschiedliche Typen von Dokumenten: Die einzelnen Teile der „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft“ werden zum Teil unter Mitwirkung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften erstellt und definieren Richt- und Referenzkonzentrationen für häufig auftretende Schadstoffe in Innenräumen.

Beim „Wegweiser für eine gesunde Raumluft“ handelt es sich um eine Konsumentenbroschüre, in der in leicht verständlicher Form Empfehlungen zum Thema „Innenraumluft“ gegeben werden. Zu einzelnen Themen werden Positionspapiere veröffentlicht, die gegebenenfalls durch Leitfäden ergänzt werden, in denen in umfangreicherer Form Informationen bereitgestellt werden.

Die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, aber auch Leitfäden und Positionspapiere legen prinzipielle Vorgangsweisen für Expertinnen und Experten fest und schneiden offene Fachfragen an. Sie spiegeln die Fachmeinung der im Arbeitskreis vertretenen Fachleute (Umwelthygiene, Messtechnik, Verwaltung usw.) zu einem aktuellen Problemkreis im Themenbereich „Innenraumluft“ wider. Sie haben normativen Charakter und können gegebenenfalls nach einer Evaluierung auch erneut bearbeitet werden.

Zum Zeitpunkt der Drucklegung sind durch den Arbeitskreis Innenraumluft im BMK folgende Dokumente erschienen.

Richtlinienteile der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft:

- Übernahme deutscher Richtwerte
- Allgemeiner Teil
- VOC-Allgemein
- Styrol
- VOC-Summenparameter
- Toluol
- Kohlenstoffdioxid – CO_2 als Lüftungsparameter
- Formaldehyd
- Alpha-Pinen
- Ethylbenzol
- Phenol
- Butan-1-ol

Leitfäden und Konsumentenbroschüren:

- Leitfaden Gerüche in Innenräumen
- Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden („Schimmelleitfaden“)
- Leitfaden zur technischen Bauteiltrocknung
- Wegweiser für eine gesunde Raumluft

Positionspapiere:

- Positionspapier zu Luftströmungen in Gebäuden
- Positionspapier zu Schimmel in Innenräumen
- Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Gebäuden
- Positionspapier zu Formaldehyd in Saunaanlagen
- Positionspapier zu technischer Bauteiltrocknung
- Positionspapier zu Verbrennungsprozessen und Feuerstellen in Innenräumen
- Positionspapier zur Sanierung von Schimmelbefall nach Wasserschäden in Krankenanstalten
- Positionspapier zu lüftungsunterstützenden Maßnahmen zur Infektionsprophylaxe – Einsatz von Luftreinigern und Einbringung von Wirkstoffen in die Innenraumluft
- Positionspapier zur Bewertung von Innenräumen in Hinblick auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2

- Positionspapier zur Beurteilung der maschinellen Kühlung von Innenräumen in Hinblick auf SARS-CoV-2
- Positionspapier zu Auswirkungen energiesparender Maßnahmen auf die Innenraumluft
- Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Bildungseinrichtungen

Online Rechner:

- Corona-Rechner VIR-SIM: Tool zur Berechnung des Infektionsrisikos durch SARS-CoV-2 über Aerosolpartikel in Innenräumen: corona-rechner.at
- Lüftungsrechner CO2-SIM, verfügbar unter raumluft.org

Die Publikationen sind – wenn nicht anders angegeben – auf der Website des BMK zum Download verfügbar: bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum.html

Inhalt

Vorwort 3

1 Präambel 7

2 Kohlenstoffdioxid in Innenräumen 8

2.1 Chemisch-physikalische Eigenschaften, Allgemeines 8

2.2 CO_2 als Lüftungsparameter 9

2.3 Vorkommen und Verbreitung 11

2.3.1 Verbreitung in der Umwelt 11

2.3.2 Der Mensch als Quelle von CO_2 in Innenräumen 11

2.3.3 Abiotische Quellen von CO_2 in Innenräumen 15

2.3.4 Studien zu CO_2 in Innenräumen 17

2.3.5 Studien zu CO_2 speziell in Bildungseinrichtungen 20

3 Messstrategie, Analytik und Prüfbericht 24

3.1 Messstrategie 24

3.1.1 Allgemeines 24

3.1.2 Zeitpunkt der Messung, Beurteilungszeitraum 24

3.1.3 Randbedingungen der Messung, Messstrategie 25

3.1.4 Lüftungssituation 27

3.1.5 Messposition und weitere Vorgaben 27

3.1.6 Eignung von CO_2 als Indikator für den Infektionsschutz 28

3.2 Analytik 30

3.3 Prüfbericht 31

4 Toxikologie und weitere Wirkungen 32

4.1 Allgemeine Wirkungen auf den Menschen 32

4.2 Wirkungen auf die Leistungsfähigkeit 35

4.3 Vorschriften und Regelungen 36

4.3.1 Gesetzliche Regelungen für die Lüftung von Räumen 36

4.3.2 Weitere österreichische Regelwerke für CO_2 und Luftvolumenströme 39

4.3.3 Internationale Regelwerke für CO_2 und Luftvolumina 41

5 Beurteilung von CO_2-Konzentrationen 44

5.1 Allgemeines 44

5.2 Definitionen 45

5.3 Bewertung der Raumluftqualität 46

5.4 Abdeckung gesetzlicher Vorgaben 49

Literaturverzeichnis 50

1 Präambel

Die Konzentration von CO_2 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 CO_2-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 oder auch Haustiere) gehen auch diese Emissionen durch das entstehende CO_2 in die Messung und Beurteilung ein.

Grundsätzlich ist anzustreben, dass das Lüften von Innenräumen über einfach zu öffnende Fenster in den Außenbereich möglich ist – die Unmöglichkeit der Fensterlüftung würde dem Ziel eines eigenverantwortlichen Wohn- und Lüftungsverhaltens entgegenstehen. Vor allem in der warmen Jahreszeit und in der Übergangszeit ist vielfach eine Fensterlüftung ohne Einschränkung der Behaglichkeit und des gesunden Raumklimas möglich.

In den Fällen, in denen ein gutes und behagliches Innenraumklima aufgrund der zunehmenden Dichtigkeit von Gebäuden nicht mehr mit zumutbaren Nutzerverhalten erreicht werden kann, ist im Rahmen eines Lüftungskonzeptes eine möglichst einfache, zumutbare und wirksame Lösung für eine hygienische Raumlüftung zu finden, bei der die notwendigen Außenluftvolumina für ein hygienisches Innenraumklima dauerhaft zugeführt werden. In solchen Fällen ist aus Behaglichkeits- bzw. Klimaschutzgründen insbesondere für den Winterfall eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärme- und Feuchterückgewinnung für beheizte Räume empfehlenswert.

Allein aufgrund von Kostenüberlegungen sollten keine Abstriche von den vorgegebenen Richtwerteempfehlungen gemacht werden – dies gilt insbesondere für Schulen und Bildungseinrichtungen. Bei richtiger Planung sind auch bei Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen kostengünstige Lösungen möglich. In jedem Fall ist zu prüfen, ob die Möglichkeit der Hybridlüftung – die Kombination von Fensterlüftung und bedarfsorientierter mechanischer Unterstützung – besteht. Bei der Konzeption von mechanischen Lüftungssystemen sollten die möglichen Lösungen in Hinblick auf Kosten und Aufwendungen für ihren Betrieb (Energieeinsatz und CO_2-Emissionen in die Umwelt, Wartung) optimiert werden.

2 Kohlenstoffdioxid in Innenräumen

2.1 Chemisch-physikalische Eigenschaften, Allgemeines

Tabelle 1 Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid

Systematischer Name	Kohlenstoffdioxid
Synonyme	Kohlendioxid, Kohlensäureanhydrid, Carbon Dioxide, CO_2
CAS–Nummer	124-38-9
EINECS-Nummer	204-696-9
Kennzeichnungen	nicht kennzeichnungspflichtig nach EG-Kriterien, S-9, S-23
Summenformel	CO_2
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 CO_2 in der Einheit „ppm“ (parts per million) angegeben. Die Umrechnung in andere Einheiten erfolgt laut der angegebenen Umrechnungsfaktoren.

2.2 CO_2 als Lüftungsparameter

Der Mensch selbst stellt mit seinen verschiedenen Exhalationsprodukten und Ausdünstungen eine maßgebliche Quelle verschiedener Luftverunreinigungen im Innenraum dar. Zu nennen sind hier zum Teil sehr geruchsintensive Verbindungen wie bspw. Aldehyde, Terpene (Haut) sowie schwefelhältige Substanzen, Methan und Wasserstoff aus dem Verdauungstrakt. CO_2 gilt deshalb als Leitparameter für von Menschen verursachte Luftverunreinigungen, da der Anstieg der CO_2-Konzentration in Innenräumen gut mit dem Anstieg der durch den menschlichen Metabolismus hervorgerufenen Geruchsintensität korreliert. Bei 1.000 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 schon Mitte des 19. Jahrhundets als Richtwert für die maximale CO_2-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen mit 0,1 Vol% CO_2 definiert wurde (Pettenkofer 1858). Huber und Wanner (1982) nahmen an, dass die Belästigungsschwelle durch menschliche Ausdünstungen (nicht aber durch Rauchen oder andere Aktivitäten) in etwa mit einer CO_2-Konzentration von 1.500 ppm zusammenfällt. Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO_2-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) lässt sich rechnerisch annähern (ECA 1992). Eine fixe Grenze, ab wann die Raumluft als unzureichend bezeichnet wird, kann jedoch nicht angegeben werden.

Die von Menschen abgegebene CO_2-Menge korreliert nicht nur mit der stoffwechselbedingten Geruchsintensität, 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. Weiters 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 CO_2 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 CO_2-Konzentration und der Konzentration an flüchtigen organischen Verbindungen 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 keine Bedeutung erlangt, auch da VOC von zahlreichen anderen Quellen stammen kann.

Die Klassifizierung nach der CO_2-Konzentration hat sich bei Räumen etabliert, in denen Rauchen nicht erlaubt ist und Verunreinigungen hauptsächlich durch den menschlichen Stoffwechsel verursacht werden (siehe bspw. ÖNORM H 6039[1] für Schulen und ÖNORM H 6038[2] für Wohngebäude).

Die wesentliche Bedeutung des relativ leicht zu ermittelnden Indikators CO_2 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 raumlufttechnischen Anlagen oder für Lüftungsanweisungen in natürlich belüfteten, dichter belegten Räumen wie Schulklassen oder Versammlungsräumen. Für raumlufttechnische Anlagen wird CO_2 wegen seiner guten Indikatoreigenschaften für die Belastung der Luft mit anthropogenen Emissionen auch als Leitparameter sowie Regelgröße eingesetzt, über die die Menge an zuzuführender Außenluft 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 raumlufttechnischen Anlagen die Folge sind. Weitere Überlegungen gehen daher dahin, außer CO_2 auch andere Parameter wie bspw. die Luftfeuchte über Sensoren mitzuerfassen und somit eine komplexere Basis für die Regelung der Anlagen zu haben (Bischof und Witthauer 1993).

[1] ÖNORM H 6039: Lüftungstechnische Anlagen - Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Schul-, Unterrichts- oder Gruppenräumen sowie Räumen mit ähnlicher Zweckbestimmung - Anforderungen, Dimensionierung, Ausführung, Betrieb und Wartung. 2023 02 01

[2] ÖNORM H 6038: Lüftungstechnische Anlagen – Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung. 2020-02-15

Für Schulen wurde ein einfach zu handhabendes, vereinfachtes Rechenblatt zur Abschätzung der zu erwartenden Konzentrationen an CO_2, 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 und im Anschluss zur Anwendung auch für allgemeine Innenräume weiterentwickelt (Tappler 2023). Eine komplexere Kalkulation, die auch die Feuchtesituation mitberücksichtigt, wird in Rojas et al. (2023) beschrieben.

2.3 Vorkommen und Verbreitung

2.3.1 Verbreitung in der Umwelt

Die CO_2-Konzentration unbelasteter Außenluft ist innerhalb der letzten 100 Jahre von etwa 300 ppm, hauptsächlich aufgrund von anthropogenen Emissionen, auf wesentlich höhere Werte angestiegen und zeigt nach wie vor steigende Tendenz. In der Außenluft ist die CO_2-Konzentration von der Entfernung zu Emittenten abhängig. Als Hintergrundwert in der Außenluft wurde 2022 eine mittlere Konzentration von etwa 417 ppm mit einem jährlichen Anstieg von einigen ppm angenommen (UBA 2023), in intensiv genutzten Stadtzentren können höhere Konzentrationen auftreten.

2.3.2 Der Mensch als Quelle von CO_2 in Innenräumen

In Innenräumen ist der Mensch die bedeutendste Quelle an CO_2. Die CO_2-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 CO_2 wie Menschen, Haustiere bzw. CO_2-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 CO_2-Konzentration in Innenräumen allein durch die von den Nutzern ausgeatmeten Mengen bis zu einer Größenordnung von 10.000 ppm ansteigen.

Das Verhältnis der CO_2-Konzentration in inhalierter zu exhalierter Luft liegt bei ca. 1:140 (Pluschke 1996).

Tabelle 2 Literaturangaben für die CO_2-Emission von Menschen, Abkürzung in der Tabelle: met = metabolic rate, Aktivitätsrate

Literaturstelle	Emission pro Person in Liter CO_2 pro Stunde	Anmerkung
Witthauer, Horn, Bischof (1993)	12	Ruhiger Zustand
	18	Sitzende Tätigkeit
	180	Schwerarbeit
Rietschel (1994)	20,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit, entspanntes Stehen
	27,2	Stehende Tätigkeit
Recknagel, Sprenger, Schramek (1999)	20	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit
VDI 4300 Bl. 9 (2003), VDI 4300 Bl. 7 (2001)	15-20	Sitzende Tätigkeit
	20-40	Leichte Arbeit
	40-70	Mittelschwere Arbeit
	70-110	Schwere Arbeit
ASHRAE (2013), ASTM (2018)	16,2	Frauen (71 kg, met=1)
	17,7	Männer (85 kg, met=1)
Persily & de Jonge (2017)	10,5	Frauen (40-50 Jahre, 77,1 kg, met=1)
	13,7	Männer (40-50 Jahre, 90,5 kg, met=1)

Für die CO_2-Abgabe (Emissionsrate) von Menschen gibt es in der Literatur zum Teil stark voneinander abweichende Angaben. Es wird davon ausgegangen, dass die Emissionsraten an CO_2 linear von der Art und Intensität der Aktivität (met = metabolic rate) sowie vom Alter und von der Körperoberfläche, die eine Funktion der Masse und der Körpergröße darstellt, abhängt.

In der Regel, aber vor allem im englischsprachigen Raum werden Publikationen der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE 2013) sowie der American Society for Testing and Materials (ASTM 2018) zur Berechnung der CO_2-Abgabe herangezogen, in denen ausgehend von der Körperoberfläche durchschnittliche Emissionsraten mittels einer Formel berechnet werden (siehe Formel 1). Deutsche Publikationen, wie z. B. Rietschel (1994) oder Recknagel, Springer & Schramek

(1999), beschreiben ähnlich gelagerte Werte. Niedrigere Emissionsraten bei Erwachsenen und Kindern wurden in der neueren Literatur (z. B. Persily und de Jonge 2017) berechnet. Es ist bei allen Kalkulationen zu beachten, dass die mittlere, altersbezogene Körpermasse (in kg) und damit die Körperoberfläche, die in die Berechnung der Emissionsraten eingeht, von Land zu Land sehr unterschiedlich sein kann.

Formel 1 Formel zur Abschätzung der CO2-Abgabe (Emissionsrate) von Menschen nach (ASHRAE 2013) und (ASTM 2018)

$$V_{CO_2} = V_{O_2}\,RQ = \frac{0.00276 A_D M\,RQ}{(0.23\,RQ + 0.77)}$$

Wobei V_{CO2} = Emissionsrate CO_2 pro Person und Sekunde [l/sec], A_D = Körperoberfläche [m²], M = Aktivitätsrate [met], RQ = 0, 85

Auch für die Aktivitätsrate gibt es in der Literatur zum Teil stark voneinander abweichende Werte. Die Angabe erfolgt üblicherweise – vor allem im deutschsprachigen Raum – in „met“ (metabolische Rate), eine andere verwendete Bezeichnung ist „PAR“ (Physical Activity Rate). Ein Energieumsatz von 58,2 W/m² (Grundumsatz) entspricht dabei 1 met laut Entwurf ÖNORM EN ISO 7730[3]. Im informativen Anhang dieser ÖNORM werden Beispiele für unterschiedliche Aktivitäten mit den dazugehörigen Energieumsätzen und metabolischen Raten angegeben (Abbildung 2). Ein Report der FAO (2001) gibt einen umfassenden Überblick über metabolische Raten bei verschiedenen Aktivitäten (Abbildung 2). Aus einem dort zitierten älteren FAO/WHO-Report stammen Abschätzungen für sportliche Aktivitäten (Abbildung 3).

Widersprüchlich ist bei Durchsicht internationaler Publikationen und Angaben, dass die metabolische Rate in einigen Publikationen nicht unter 1 angegeben wird. Die Aktivität „sleeping“ wird bespielsweise in FAO (2001) mit einem PAR von 1 angegeben, wogegen das in Österreich verwendete international gültige Regelwerk ISO 7730 (ÖNORM EN ISO 7730) für „liegend“ (und damit auch „schlafend“) ein met von 0,8 angibt.

[3] ÖNORM EN ISO 7730 Entwurf: Ergonomie der thermischen Umgebung - analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. 2023-04-15

Abbildung 1 Energieumsätze und metabolische Raten aus der ÖNORM EN ISO 7730 (Entwurf)

Aktivität	Energieumsatz	
	W/m^2	met
Liegend	46	0,8
Sitzend, entspannt	58	1,0
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	70	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,6
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0
Gehen in der Ebene:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Abbildung 2 Metabolische Rate bei verschiedenen Aktivitäten nach FAO (2001)

	Males		Females	
Activity	Average PAR	PAR Range	Average PAR	PAR Range
Aerobic dancing—low intensity	3.51		4.24	
Aerobic dancing—high intensity	7.93		8.31	
Calisthenics	5.44			
Child care (unspecified)			2.5	
Climbing stairs	5.0			
Dancing	5.0		5.09	
Eating and drinking	1.4		1.6	
Housework (unspecified)			2.8	2.5 to 3.0
Office worker—Filing	1.3		1.5	
Office worker—Reading	1.3		1.5	
Office worker—Sitting at desk	1.3			
Office worker—Standing/ moving around	1.6			
Office worker—Typing	1.8		1.8	
Office worker—Writing	1.4		1.4	
Reading	1.22		1.25	
Sleeping	1.0		1.0	
Sitting quietly	1.2		1.2	
Sitting on a bus/train	1.2			
Standing	1.4		1.5	
Walking around/strolling	2.1	2.0 to 2.2	2.5	2.1 to 2.9
Walking quickly	3.8			
Walking slowly	2.8	2.8 to 3.0	3.0	

Abbildung 3 Metabolische Raten (PAR) bei verschiedenen sportlichen Aktivitäten, FAO/WHO-Report (Annex 5) zitiert in FAO (2001) – Auszug

Human energy requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation

ACTIVITY	MALES		FEMALES	
	Average PAR	PAR Range	Average PAR	PAR Range
Sports activities				
Aerobic dancing – low-intensity	3.51		4.24	
Aerobic dancing – high-intensity	7.93		8.31	
Basketball	6.95		7.74	
Batting	4.85			
Bowling	4.21			
Callisthenics	5.44			
Circuit training	6.96		6.29	
Football	8.0	7.5–8.5		
Golf	4.38			
Rowing	6.7		5.34	
Running – long distance[b]	6.34		6.55	
Running – sprinting	8.21		8.28	
Sailing	1.42		1.54	
Swimming	9	8.5–9.4		
Tennis	5.8		5.92	
Volleyball	6.06		6.06	

2.3.3 Abiotische Quellen von CO_2 in Innenräumen

Neben dem biotischen – vor allem dem durch die menschliche Atmung verursachten – Eintrag an CO_2 in die Innenraumluft spielen Verbrennungsprozesse, bei denen die Verbrennungsgase nicht vollständig oder nur langsam aus dem Raum abgeführt werden, als CO_2-Quelle eine Rolle. Dazu sind grundsätzlich das Rauchen von Tabak (allerdings sind beim CO_2 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 CO_2-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, NO_2, PAK, Formaldehyd) für die Einschätzung der davon ausgehenden Risiken eine bedeutsamere Rolle als CO_2, da sie wegen ihrer toxischen Eigenschaften schon bei wesentlich niedrigeren Konzentrationen zu Befindlichkeitsstörungen und Vergiftungserscheinungen führen können (nach Pluschke 1996).

Unter besonderen Umständen kann CO_2 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 % CO_2 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 Konzentration an Methan ansammeln konnte (Johnson 1993). In solch einem Fall kommt der CO_2-Konzentration natürlich keine nennenswerte gesundheitliche Bedeutung mehr zu, aber es kann unter ähnlichen Randbedingungen auch zu einer Anreicherung des Methan-CO_2-Gemisches kommen, die zu unerwünscht hohen CO_2-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 CO_2-Abgabe durch Pflanzen bei Dunkelheit. Die Mengen sind gering und entsprechen bei 1 m² Blattoberfläche etwa 1 % der stündlich von einem Menschen abgegebenen CO_2-Menge. Gegenläufig dazu wird CO_2 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 CO_2 aus der Verbrennung von Treibstoff neben anderen Schadstoffen in die Räume gelangt (Tappler und Damberger 1996). In derartigen Fällen kommt der CO_2-Konzentration natürlich keine nennenswerte gesundheitliche Bedeutung mehr zu, da andereStoffe im Vordergrund stehen.

In Weinkellern, Futtersilos oder ähnlichen Räumen kann es durch das entstehende Gärgas zu erhöhten CO_2-Konzentrationen kommen. Technische Anlagen wie Getränke-Zapfstationen, die in größeren Mengen CO_2 als Arbeitsstoff einsetzen, sind theoretisch ebenfalls als Quelle denkbar, diese Anlagen geben jedoch im Normalbetrieb kein CO_2 an die Umgebung ab.

Neben diesen Quellen können auch (meist schwache) Senken vorhanden sein, beispielsweise alkalisch reagierendes Mauerwerk. Diese sind allerdings für die CO_2-Bilanz in Innenräumen nicht von Bedeutung.

2.3.4 Studien zu CO_2 in Innenräumen

Aufgrund der Vielzahl an mittlerweile durchgeführten Studien zur Konzentration an CO_2 in Innenräumen können in der Folge nur ausgewählte Arbeiten angeführt werden. In dem von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe "Innenraumrichtwerte" der deutschen Innenraumluft-Hygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche bis dahin veröffentlichte Studien zu CO_2 in Innenräumen vorgestellt.

Innerhalb von Gebäuden sind typische zeitliche und räumliche Verteilungsmuster der CO_2-Konzentration festzustellen, die sich aus den Nutzungen ergeben. In Wohngebäuden sind durchschnittliche CO_2-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 CO_2-Konzentrationen von ca. 700 ppm.

Prescher (1982) fand Konzentrationen in der Größenordnung von etwa 1600 ppm bei Kochtätigkeiten über offenem Feuer. Der Autor beobachtete auch den Verlauf der CO_2-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 CO_2-Konzentration während der Schlafphase untersucht. Die Autoren haben in ihrem Messprogramm bei Belegung des Schlafzimmers mit 2 Personen und bei geschlossenen Fenstern und Türen CO_2-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 CO_2-Konzentration im Schlafzimmer deutlich beschränkten und dass damit kaum noch Werte größer als 1.500 ppm auftraten.

Zu erinnern ist in diesem Zusammenhang an die wohnhygienischen Untersuchungen von Friedberger (1923), der in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts in den stark überbelegten Massenwohnquartieren dieser Zeit CO_2-Konzentrationen bis zu 5.500 ppm gemessen hat, die gleichzeitig mit beträchtlichen Geruchsbelastungen verbunden waren. Auch Max von Pettenkofer gibt einen Wert von 0,2 Vol% als Grenze für unzumutbare Geruchsbelastungen an (Pettenkofer 1858).

Auch in Innenräumen von Verkehrsmitteln können relativ hohe CO_2-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 an (Moriske 2002). Während des Fluges wurden durchschnittlich 1.500 ppm gemessen. In einer weiteren Studie über die Raumluftqualität in Flugzeugen des Fabrikates „Boeing“ wurde ebenfalls unter anderem der Parameter CO_2 untersucht (Lindgren und Norbäck 2002). Vor dem Start lag die mittlere Konzentration bei etwa 1.660 ppm und erreichte Werte bis 3.700 ppm. Bei eingeschalteter Lüftungsanlage während des Fluges lagen die Messwerte in 97 % der Fälle unter 1.000 ppm.

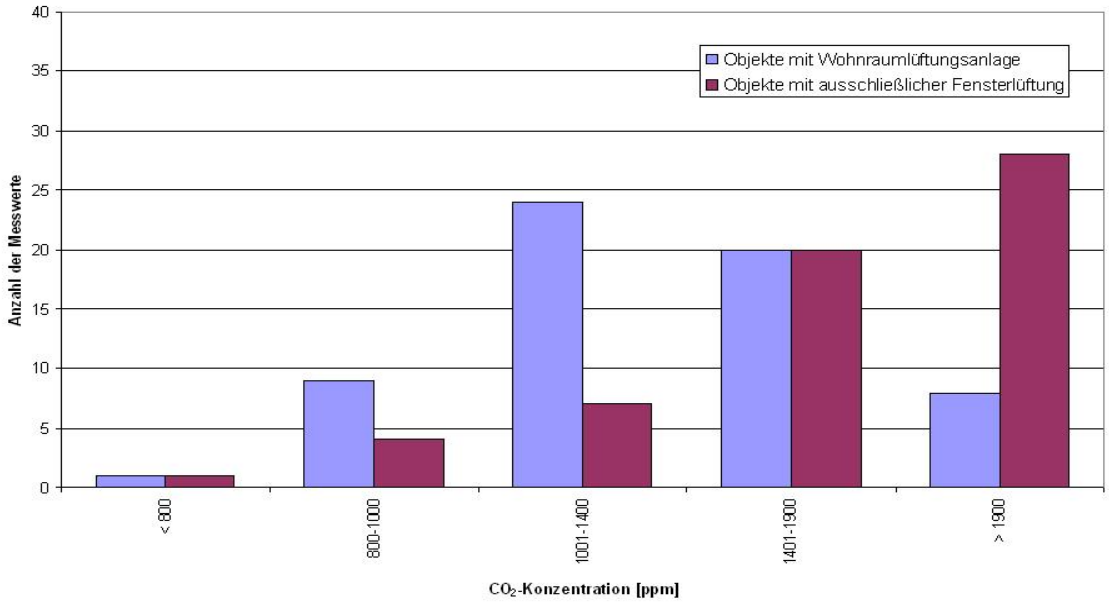
In Hochgeschwindigkeitszügen (ICE der Baureihen III und IV) lag der CO_2-Gehalt der Raumluft in der Regel unter 1.500 ppm. Allerdings stiegen die Werte an, wenn längere Tunnel durchfahren wurden, da dann vermehrt von Frischluft- auf Umluftzufuhr umgestellt wurde. In U-Bahnen wurden CO_2-Konzentrationen bis 1.200 ppm gemessen (Moriske 2002). Sohn et al. (2005) untersuchten ebenfalls unter anderem die CO_2-Konzentrationen in Taxis, öffentlichen Bussen und U-Bahnen. Die mittleren Konzentrationen von jeweils 20 Fahrzeugen lagen bei 2.490 ppm bei Taxis, 2.220 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 (Tappler et al. 2014, Wallner et al. 2015, Wallner et al. 2017).

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. Es ergaben sich unter anderem signifikante Unterschiede in den gemessenen CO_2-

Konzentrationen. Anhand der Studie sollte weiters festgestellt werden, ob sich signifikante Einflüsse der Lüftungsart (mechanische Lüftung ja-nein) auf Veränderungen des Gesundheitsstatus nach einem Jahr auswirken.

Abbildung 4 Anzahl der CO2-Messwerte (maximaler gleitender Stundenmittelwert) in Konzentrationsklassen in Anlehnung an die zurückgezogene ÖNORM EN 13779 , Schlafräume von Objekten der Testgruppe mit Wohnraumlüftungsanlagen (n = 62) und Objekten der Kontrollgruppe m



Die CO_2-Konzentration wurde in den Schlafräumen über einen Zeitraum von einer Woche gemessen. Generell war die CO_2-Konzentration in den Schlafräumen mechanisch belüfteter Objekte signifikant niedriger als in jenen natürlich belüfteter Objekte. Der Stundenmittelwert der CO_2-Konzentration lag bei 80 % der natürlich belüfteten bzw. bei 45 % der mechanisch belüfteten Schlafzimmer zumindest zeitweise über 1400 ppm (Kategorie C laut ISO 16000-41). Der Median der CO_2-Konzentration bei mechanisch belüfteten Objekten lag beim Ersttermin bei 1.400 ppm, bei natürlich belüfteten Objekten bei 1.800 ppm. Die Ursache der erhöhten Werte war in den zu geringen Außenluftvolumenströmen begründet, die den Schlafräumen zugeführt wurden. Dies betraf auch die mechanisch belüfteten Objekte, da zu diesem Zeitpunkt keine raumweisen Überprüfungen der Zuluftvolumina Volumenströme bei Inbetriebsetzung stattfanden.

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 deutlicher 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, wenn die Luft trockener empfunden wurde. Dazu ist anzumerken, dass sich vermutlich seit Publikation der Studie die Situation durch den Einbau von Feuchterückgwinnungsanlagen verändert hat.

Hinsichtlich der Häufigkeit vegetativer Symptome bei den Erwachsenen und der Konzentration von Aldehyden, insbesondere Formaldehyd, ergab sich eine schwache, aber statistisch signifikante Korrelation. Außerdem konnten signifikante Zusammenhänge zwischen der CO_2-Konzentration und dem sensorischen Eindruck „verbrauchte Luft“ gezeigt werden. Die Raumluft wurde in Hinblick auf positive sensorische 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 sensorischen 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.

2.3.5 Studien zu CO_2 speziell in Bildungseinrichtungen

Aufgrund der Tatsache, dass in Räumen von Bildungseinrichtungen eine hohe Personendichte gegeben ist und auch gesteigerte Ansprüche an die geistige Leistungsfähigkeit bestehen, wird dem Thema Raumluftqualität in Schulen, Universitäten etc. großes Augenmerk gewidmet. Schon der bekannte Hygieniker Max von Petterkofer ging Mitte des 19. Jahrhunderts auf das Thema CO_2 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 (1.000 ppm) anwachsen könnte“ (Pettenkofer 1858). Wegen der Vielzahl an mittlerweile durchgeführten Studien zur Konzentration an

CO_2 in Bildungseinrichtungen können nur ausgewählte Arbeiten angeführt werden. Eine Übersicht über Arbeiten zu Raumluft in Schulen findet sich beispielsweise in Salthammer et al. (2016).

In Versammlungsräumen, Lehrsälen und Klassenzimmern (ohne raumlufttechnische Anlagen) mit einer hohen Belegung steigt die CO_2-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 h^{-1} liegt. Diese Fenster können oder dürfen aus Sicherheitsgründen oftmals in den Pausen nicht geöffnet werden. Es ergeben sich dadurch extrem erhöhte CO_2-Konzentrationen – dies betrifft Schulen in der Stadt, aber auch in ländlichen Gegenden. Unter ungünstigen Umständen können dadurch sehr hohe Konzentrationen bis zum Bereich des MAK-Wertes[4] (5.000 ppm) erreicht und überschritten werden.

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. 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 1.370 ppm, der Median der Maximalwerte lag bei 2.090 ppm, die absolute Maximal-Konzentration an CO_2 lag in einem Klassenraum nach etwa 100 Minuten geschlossenen Fenstern bei einer Belegung von 22 bis 23 Schülern bei 6.680 ppm (Brandl et al. 2001).

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

[4] Maximale Arbeitsplatzkonzentration

den Zustand der Fenster und das Alter der Schüler. Das Lüftungsregime war vorgegeben und wurde bei der Messung kontrolliert. 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.

In dieser und in der über mehrere Jahre laufenden Studie „LUKI – LUft und KInder. Einfluss der Innenraumluft auf die Gesundheit von Kindern in Ganztagsschulen“ konnten in praktisch allen untersuchten Räumen schon nach relativ kurzer Zeit (20-25 Minuten) und je nach Belegung, Außenluftklima und Dichtheit der Fensterfugen Konzentrationen an CO_2 nachgewiesen werden, die den Richtwert von 1.000 ppm überschritten. Die Werte stiegen bei geschlossenen Fenstern weiter an (Hohenblum et al. 2008). Dies wurde von den Autoren als Hinweis dafür gewertet, dass das für eine Aufrechterhaltung hygienischer Bedingungen notwendige Außenluftvolumen während der Unterrichtsstunden nicht zugeführt würde. Lüften in den Pausen führte zu einer deutlichen Absenkung der Konzentration an CO_2. 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 CO_2-Konzentration. Die Autoren schlossen aus den Ergebnissen, dass bei durchschnittlich bis dicht belegten Klassenräumen einmaliges Lüften in der Pause nicht ausreiche, die hygienisch erforderlichen Zuluftvolumina sicherzustellen und dass erst bei ständig gekippten Fenstern und geringer Klassenschülerzahl die CO_2-Konzentrationen im hygienisch erforderlichen Zielbereich liegen würden. Die Vorgabe gekippter Fenster wäre jedoch aufgrund einer Reihe von Einschränkungen nur in der warmen Jahreszeit umsetzbar, da bei den Wintermessungen bereits bei einem gekippten Fenster Zugerscheinungen und ein nicht zumutbares Absinken der Raumtemperatur zu beobachten waren. Im Winter wäre der Zustand mit zwei ständig gekippten Fenstern mit einem unverhältnismäßig großen Wärmeverlust im Klassenraum und störenden Zugerscheinungen verbunden.

Aufbauend auf theoretischen Überlegungen wurden Rechenblätter entwickelt, die als Grundlage für Lüftungsanweisungen in bestehenden Schulen bzw. für die Planung von zukünftigen Schulräumen dienen können und die zu erwartenden Konzentrationen an CO_2 berechnen. Das einfache Modell CO2-SIM wurde anhand von im Feld ermittelten Praxisdaten mehrerer Klassenräume überprüft (Tappler 2023). 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 Ergebnisse 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 Metastudie „Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten 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 CO_2 festgestellt.

Eine Studie, deren Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung wie die im deutschsprachigen Bereich durchgeführten Untersuchungen lagen, wurde in 120 repräsentativen Klassenräumen von texanischen Grundschulen durchgeführt. Der Median der Durchschnittskonzentrationen der Messwerte für CO_2 lag bei 1.290 ppm, der Median der Maximalwerte lag bei 2.060 ppm. Die mittlere CO_2-Konzentration lag in 66 % der Räume über 1.000 ppm. 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 (Corsi et al. 2002).

Untersuchungen in 26 Kindertagesstätten im Mittleren Westen Amerikas ergaben, dass in mehr als 50 Prozent die durchschnittlichen CO_2-Werte (der Messzeitraum betrug acht Stunden) über 1.000 ppm lagen (Ferng 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 CO_2-Konzentrationen gerechnet werden muss, kommt der Messstrategie eine große Bedeutung zu. Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik des Teil 1 „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft verwiesen.

3.1.2 Zeitpunkt der Messung, Beurteilungszeitraum

Da aufgrund der bereits beschriebenen Problematik kein eigener Wirkungsbezogener Innenraumrichtwert (WIR) für CO_2 angegeben werden kann, der sich auf einen festgelegten Beurteilungszeitraum bezieht (wie dies im Teil „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft beschrieben wurde), sind die Zeiträume der Messung dem Ziel der Untersuchung 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 3 Beispiele für Beurteilungszeiträume für CO_2-Messungen

Innenraum	Interessierender Zeitraum	Typische Beurteilungs-zeiträume in Stunden
Schulklassen	Unterrichtszeit von Unterrichtsbeginn bis -ende	6-8
	Unterrichtszeit einer Schulstunde Unterrichtsbeginn bis -ende ohne Pause	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 Randbedingungen der Messung, Messstrategie

Wird die Einhaltung eines Richtwertes überprüft oder allgemein die CO_2-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 CO_2-Konzentration der Raumluft der Außenluftkonzentration annähert. Anschließend wird bei der üblichen Nutzung des Raumes die CO_2-Konzentration kontinuierlich gemessen.

Unter statischen Bedingungen stellt sich die CO_2-Konzentration langsam auf einen konstanten Wert (Ausgleichskonzentration) ein. Bei typischen realen (dynamischen) Situationen wird durch eine Veränderung des Luftwechsels (Öffnen von Türen oder Fenstern) bzw. durch Veränderung der CO_2-Quellen im Raum die Raumluftkonzentration beeinflusst. In der Regel wird die Ausgleichskonzentration nicht erreicht, sondern durch Lüftungsvorgänge unterbrochen. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte, die zumindest alle Minuten erfasst werden sollen, wird der Konzentrationsverlauf dokumentiert und ermöglicht in weiterer Folge die Interpretation allfällig dokumentierter Ereignisse.

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. Die Anzahl der Raumnutzer hat – wenn möglich – den üblichen Gegebenheiten zu entsprechen, bei Schulklassen und Unterrichtsräumen sollte die Belegung in der Regel (außer der Raum ist für eine geringere Personenanzahl geplant) bei nicht weniger als 25 Personen liegen.

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 CO_2-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 CO_2. 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 zur Abbildung der realen Belastungssituation das übliche, von den Nutzern gepflegte Lüftungsintervall bei der Messung einzuhalten. In Wohnräumen ist grundsätzlich eine zwei- bis dreimalige Lüftung pro Tag zumutbar. Entscheidend ist auch bei Wohnräumen die möglichst genaue Aufzeichnung des tatsächlichen Lüftungsverhaltens, um eine realitätsnahe Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen. Wenn die Lüftungssituation in Schlafzimmern zu bewerten ist, sollte grundsätzlich über den Zeitraum von 8Stunden 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. Ist diese nicht bekannt, dann sollte eine mittlere Leistungsstufe eingestellt werden. Bei raumlufttechnischen Anlagen mit Bedarfsregelung muss die Belegung der Räume dokumentiert werden.

3.1.5 Messposition und 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 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 m^2 reicht dies in der Regel aus. Bei größeren Räumen hingegen oder bei asymmetrischen Quellen sind mehrere Messpunkte erforderlich, um allfällige Konzentrationsunterschiede zu erkennen.

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

Die Sondenöffnung des Messgerätes 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 kann gegebenenfalls eine Vorbelastung der Zuluft z. B. durch einen Umluftanteil auftreten. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. In derartigen Fällen ist die Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Zuluft getrennt zu ermitteln.

3.1.6 Eignung von CO_2 als Indikator für den Infektionsschutz

Die wesentliche Bedeutung des Indikators CO_2 für den Infektionsschutz in nicht medizinisch genutzten Innenräumen liegt darin, dass CO_2 mit bestimmten Einschränkungen als Maßzahl für die Nutzungsintensität eines Raumes durch Menschen herangezogen werden kann. CO_2-Messgeräte, die einen Farbcode aufweisen und die unterschiedliche Konzentrationsbereiche anschaulich durch Farben von grün zu gelb zu rot darstellen, werden auch „Lüftungsampeln“ genannt und sind nur bedingt zur Kontrolle des Infektionsschutzes geeignet.

CO_2 ist jedenfalls eine gute Maßzahl für die Atemaktivität der Nutzer der Räume. Im Fall von Situationen, die der in Müller et al. (2020) beschriebenen Standardsituation in Hinblick auf die Sprachaktivität nahekommen (4 % Sprecher, d. h. eine von 25 Personen), können daher CO_2-Messgeräte einen relativ guten Hinweis auf das Risiko einer Infektion

durch aerosolgebundene Viren geben. Auch die ASHRAE hat technische Regeln zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Luftqualität zum Infektionsschutz vorgelegt[5].

Der Wert von 1.000 ppm wird bei den Infektionsschutz betreffenden Fragestellungen vielfach als praktikable Grenze für die Notwendigkeit von Lüftungsmaßnahmen definiert, da in diesem Konzentrationsbereich eine annähernd lineare Abhängigkeit des Infektionsrisikos von der CO_2-Konzentration besteht – die Situation bei 1.000 ppm CO_2 wird bei der Berechnung als relatives Riskio von 1 definiert (Müller et al. 2020).

In Situationen mit weniger Sprechern, wie bspw. in Theatern, Kinos oder dergleichen, würde das Heranziehen der CO_2-Konzentration zur Risikobewertung das Risiko einer Infektion durch aerosolgetragene Viren leicht überschätzt. Bei Betrieb eines Luftreinigungsgerätes zur Entfernung von Aerosolen (zum Beispiel mittels HEPA-Filter oder UV-Desinfektion) ist die herrschende CO_2-Konzentration zwar ein guter und wichtiger Hinweis auf die allgemeine Lüftungssituation, die Werte sind jedoch zur Beurteilung des Risikos einer Infektion ungeeignet. In diesem Fall würde das Risiko überschätzt, da Luftreinigungsgeräte mit Filter zwar die Menge an Aerosolen, nicht aber die Konzentration an CO_2 verringern. Ähnliches gilt für den Mund-Nasenschutz, speziell für die Verwendung von FFP2-Schutzmasken: Wird eine solche getragen, kommt es bei Verwendung von CO_2 als Beurteilungsgröße zu einer deutlichen Überschätzung des Risikos.

In Situationen, in denen mehr als 4 % der Anwesenden sprechen bzw. wo laut gesprochen oder gar gesungen wird (bspw. in Gastronomiebetrieben, in Bars oder bei Sportveranstaltungen), ist davon auszugehen, dass das Risiko bei Verwendung von CO_2 als Indikator unterschätzt wird. Der Grund liegt darin, dass das Verhältnis der Aerosolabgabe zwischen „Atmen“ und „Sprechen“ gemäß Buonanno et al. (2020) beim Faktor von etwa 5 liegt und das zwischen „Atmen“ und „Laut Sprechen“ bzw. „Singen“ etwa beim Faktor 30. Diese zu erwartende Erhöhung der Aerosolabgabe ist zwar mit einer gewissen Erhöhung der CO_2-Abgabe der Sprechenden oder Singenden verbunden, jedoch bei weitem nicht in diesem hohen Verhältnis im Vergleich zum stillen „Atmen“.

Zusammenfassend eignen sich CO_2-Messgeräte oder Lüftungsampeln zur Bewertung des Risikos, sich in Innenräumen mit pathogenen, aerosolgetragenen Viren anzustecken, für Situationen in Innenräumen, solange keine erhöhte körperliche Aktivität oder lautes

[5] ASHRAE Standard 241, Control of Infectious Aerosols, https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-standard-241-control-of-infectious-aerosols

Sprechen oder Singen mehrerer Personen eine Rolle spielen, aber auch für eine Einschätzung von Räumen im klassischen Kulturbetrieb. In diesen Fällen sollte der Beurteilungswert (arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte an CO_2) im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 1.000 ppm CO_2 absolut liegen. In jedem Fall sollte trotzdem eine individuelle Einzelbetrachtung des betreffenden Raumes erfolgen.

3.2 Analytik

Einführend wird auf die allgemeinen Ausführungen im Teil 1 „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft verwiesen. Die Probenahmestrategie der Raumluft in Hinblick auf CO_2 folgt ÖNORM EN ISO 16000-26[6]. Das am häufigsten verwendete Messprinzip und damit Referenzverfahren ist – wie für Außenluftuntersuchungen – die kontinuierliche Bestimmung mittels nichtdispersiver Infrarot-Spektroskopie (NDIR). Das Verfahren ermöglicht eine Bestimmung in einem Konzentrationsbereich von typischerweise 400 ppm bis 10.000 ppm.

Das angewandte Messverfahren muss geeignet sein, Momentanwerte zu liefern, die für ein Minutenintervall als repräsentativ angesehen werden. Durch die kontinuierliche Registrierung der CO_2-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 raumlufttechnischen Anlagen etc.) zu gewinnen.

Elektrochemische Sensoren und Halbleiter-Gassensoren sind in der Regel nicht für Messungen in Innenräumen geeignet. Diese Methoden sind zu wenig spezifisch (es werden auch andere Raumluftinhaltsstoffe angezeigt). Indirekte Bestimmungen über andere Parameter (z. B. „eCO_2-Sensoren“), bei denen CO_2 nicht direkt detektiert, sondern über andere Parameter berechnet wird, sind zur Messung gänzlich ungeeignet. Wenn andere Messverfahren zum Einsatz kommen sollen, muss jedenfalls deren Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren belegt sein.

[6] ÖNORM EN ISO 16000-26: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 26: Probenahmestrategie für Kohlendioxid (CO_2). 2013 06 15

Messungen in Innenräumen über einen längeren Zeitraum sind prinzipiell anspruchsvoll, da die Messstelle nicht oder nur mit großem Aufwand ständig überwacht werden kann.

3.3 Prüfbericht

Im Prüfbericht 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 und das Alter der anwesenden Personen sowie die Leistungsstufe einer vorhandenen raumlufttechnischen 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 CO_2 neben der Raumbelegung, Raumgröße und Lüftungssituation von unterschiedlichen Randparametern wie der Windgeschwindigkeit außen etc. abhängt, sind alle Faktoren, die im Kapitel 3.1 thematisiert sind, detailliert im Untersuchungsbericht zu beschreiben.

Nachdem aus den Momentanwerten der ermittelten CO_2-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 im Prüfbericht anzugeben. Die Beurteilung erfolgt in Anlehnung an die Empfehlungen der ISO 16000-41 nach Raumluftklassen von A+ bis C, die im Kapitel 5.3 ausführlich definiert werden.

4 Toxikologie und weitere Wirkungen

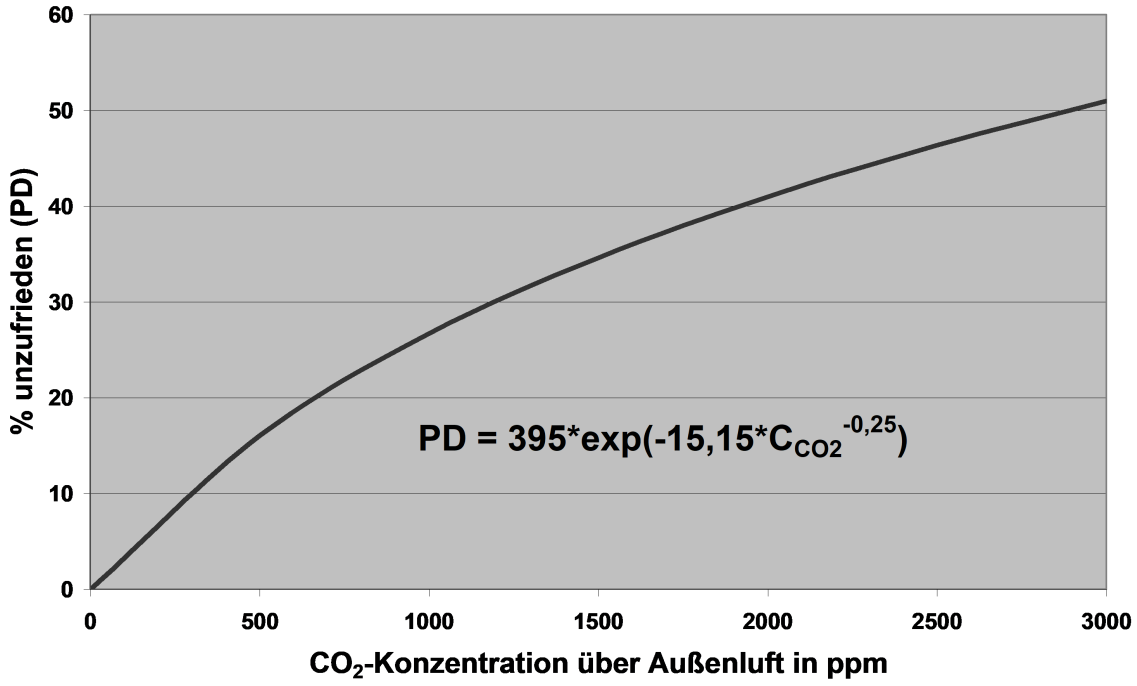
4.1 Allgemeine Wirkungen auf den Menschen

Bei etwa 1.000 ppm empfinden rund 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend (BUWAL 1997). Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Unzufriedenen und der CO_2-Konzentration (als Konzentration über der Außenluftkonzentration) kann mittels folgender Formel abgeschätzt werden (ECA 1992):

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

PD = Anteil der mit der Raumluftqualität Unzufriedenen in % (percentage dissatisfied)
C = Konzentration an CO_2 in ppm über der Außenluftkonzentration

Abbildung 5 Korrelation zwischen der CO2-Konzentration als Indikator für anthropogene Emissionen und der Anzahl an unzufriedenen Personen (PD in %) in einem Raum (nach ECA 1992)



Obwohl CO_2 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 Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft" (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche Studien zu gesundheitlichen Effekten von CO_2 in Innenräumen vorgestellt. Eine Zusammenschau von Studien zu gesundheitlichen Auswirkungen und Kohlendioxid zeigte, dass sich in rund der Hälfte der Untersuchungen mit abnehmender CO_2-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 CO_2-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 CO_2-Konzentrationen nachweisen, dies auch schon im Konzentrationsbereich von unter 1.000 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 CO_2-Anstieg (Erdmann et al. 2002). Kim et al. (2002) fanden in einer Studie mit Kindern einen signifikanten Zusammenhang zwischen erhöhten CO_2-Konzentrationen in den Wohnungen und 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 CO_2-Konzentrationen liegen umfangreiche Erkenntnisse aus der Arbeitsmedizin, aber auch aus luft- und raumfahrtmedizinischen Untersuchungen vor. Als akute Vergiftungszeichen sind bei hohen CO_2-Konzentrationen zunächst u. a. Kopfschmerzen, Schwindel, Ohrensausen, Reflexverlangsamung, motorische Unruhe, Beeinträchtigungen des Visus (z. B. Doppeltsehen, Gesichtsfeldausfälle) zu beobachten (Greim 1994). In einem späteren Stadium, bei etwa 100.000 ppm treten Erstickungserscheinungen und Bewusstseinsverlust auf (Pluschke 1996). Noch höhere CO_2-Konzentrationen in der Atemluft sind letal (bspw. typische Gärkellerunfälle).

Die Exposition gegenüber erhöhten CO_2-Konzentrationen führt zu einem Anstieg des CO_2-Partialdrucks im Blut. Daraus entwickelt sich über die Hydratation des CO_2 ein Anstieg der H+- und HCO_3-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 CO_2-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 CO_2-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 bei dieser Studie keine Wirkung der unterschiedlichen Außenluftvolumina auf typische Beschwerden des Sick Building-Syndrom beobachtet wurden.

Shaughnessy et al. (2006) fanden in einer Untersuchung in 50 Klassenräumen signifikante Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit von Schülern und der CO_2-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 Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) publizierten Richtlinienpapier „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ (Ad-hoc AG 2008) wurden zahlreiche Studien zu Auswirkungen von CO_2 auf die Leistungsfähigkeit vorgestellt.

Bedeutende Studienergebnisse zu Auswirkungen von CO_2 auf die Leistungsfähigkeit wurden vor allem von US-amerikanischen und dänischen Forscherinnen und Forschern veröffentlicht. Satish et al. (2012) fanden in kontrollierten Prüfkammerversuchen direkte Auswirkungen von CO_2 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, 1.000 und 2.500 ppm CO_2 exponiert, wobei die Konzentration mittels synthetischem CO_2 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 CO_2-Konzentration signifikant schlechtere Werte erzielt. Beim Parameter „information search" zeigten sich keine Abhängigkeiten der Leistungsfähigkeit von den CO_2-Konzentrationen. Beim Parameter „focused activity" zeigten sich hingegen signifikant bessere Ergebnisse bei CO_2-Konzentrationen von 2.500 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 Leitungstest (u. a. basic activity level, crisis respondence, information usage, strategy) zu lösen hatten, zeigte bereits bei 1.400 ppm signifikante Effekte von CO_2 auf die Leistungsfähigkeit. Weiters wurde beobachtet, dass sich die kognitive Leistungsfähigkeit der Probanden bei einem Anstieg von CO_2 um 400 ppm durchschnittlich um 21 % verminderte. Auch bei dieser Studie wurden die konstanten Konzentrationen zum Teil mittels synthetischem CO_2 aufrechterhalten.

4.3 Vorschriften und Regelungen

4.3.1 Gesetzliche Regelungen für die Lüftung von Räumen

In Österreich liegt der derzeit gültige MAK-Wert für CO_2 laut GKV-Grenzwerteverordnung (2021) bei 5.000 ppm (9.000 mg/m³) als 8-Stunden-Mittelwert bzw. 10.000 ppm (18.000 mg/m³) als Momentanwert für den Beurteilungszeitraum von 60 Minuten. Diese Werte gelten allerdings nur an Arbeitsplätzen, an denen CO_2 als Arbeitsstoff eingesetzt wird.

Pettenkofer definierte Mitte des 19. Jahrhunderts einen Richtwert für die maximale CO_2-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen mit einem Wert von 0,1 Vol% CO_2 (1.000 ppm), die sogenannte Pettenkofer-Zahl, die auch heute noch als Basis für Berechnungen und Regelungen vor allem im Bereich raumlufttechnischer Anlagen herangezogen wird (Pettenkofer 1858).

Vor allem in der Klimatechnik und in den in diesem Fachgebiet geltenden Regelungen wurden zur Dimensionierung der in raumlufttechnischen Anlagen benötigten Volumenströme Mindest-Außenluftvolumenströme abgeleitet, die sich aus den Vorgaben für bestimmte CO_2-Höchstkonzentrationen ergeben.

Die Arbeitsstättenverordnung-AStV (2017) 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 „ausreichende Luftzufuhr“ gilt, wird nicht gegeben.

Bei ausschließlich mechanisch be- und entlüften 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 2017). Bei den angeführten Außenluftvolumina ist davon auszugehen, dass die in den Arbeitsräumen resultierenden CO_2-Konzentrationen unter 1.000 ppm liegen.

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 Umweltschutz (OIB 2023) als Basis beziehen, wobei die Textteile in Bezug auf Lüftung in unveränderter Form in die jeweiligen Verordnungen übernommen wurden bzw. werden.

Im Folgenden ein Auszug aus den entsprechenden Kapiteln der OIB-Richtlinie 3 zu Lüftung (2023):

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.

In den erläuternden Bemerkungen der OIB-Richtlinie 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz werden folgende Punkte angeführt:

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 öffenbare Fenster und Türen verfügen. Der Begriff „mechanische Lüftung" umfasst nicht nur die kontrollierte Be- und Entfüftung, 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.

4.3.2 Weitere österreichische Regelwerke für CO_2 und Luftvolumenströme

In der ÖNORM EN 16798-1[7] werden im informativen Anhang Standardwerte für Lüftungsraten und die CO_2-Konzentration angegeben. Diese Werte sind einerseits Auslegungswerte des personenbezogenen Zuluftvolumens, die für die Dimensionierung einer Lüftungsanlage vorgesehen sind, andererseits Auslegungswerte der CO_2-Konzentrationen in belegten Wohn- und Schlafzimmern.

Tabelle 4 Auslegungswerte der CO_2-Konzentrationen (über den Außenluftwerten) in belegten Wohn- und Schlafzimmern nach ÖNORM EN 16798-1, informativer Anhang

Kategorie	Auslegungswert der CO_2-Konzentration über Außenluftwert in Wohnzimmern in [ppm]	Auslegungswert der CO_2-Konzentration über Außenluftwert in Schlafzimmern in [ppm]
I	550	380
II	800	550
III	1.350	950
IV	1.350	950

Die ÖNORM H 6038 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.

Die folgende Abbildung 6 zeigt die Vorgaben der ÖNORM H 6039 für erforderliche personenbezogene Außenluftvolumenströme, diese können gegebenenfalls zur Berechnung der Auslegungswerte von RLT-Anlagen in Schul- und Unterrichtsräumen dienen.

[7] ÖNORM EN 16798-1: Energieeffizienz von Gebäuden. Teil 1: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik — Modul M1-6. 2019-11-01

Abbildung 6 Vorgaben der ÖNORM H 6039 für erforderliche personenbezogene Außenluftvolumenströme in Schul- und Unterrichtsräumen

Tabelle 2 — Personenbezogene Außenluftvolumenströme

Kategorie nach Bildungsstufen (Alter der Personen)	Erforderlicher Außenluftvolumenstrom pro Person	
	Mittlere CO_2-Konzentration in der Raumluft von 1 000 ppm[a]	Mittlere CO_2-Konzentration in der Raumluft von 1 400 ppm[b]
	m^3/h	
Elementar- und Primarstufe (in der Regel 0- bis 10-Jährige)	28	17
Sekundarstufen I und II (in der Regel 11- bis 18-Jährige)	33	20
Tertiärbereich, Erwachsenenbildung, Lehrpersonen, Betreuer (in der Regel über 19-Jährige)	36	21

ANMERKUNG 1 Für Kinder der Elementarstufe wird für das metabolische Äquivalent (met) ein Wert von 2 angenommen, da diese in der Regel eine höhere Aktivität zeigen (Spielen, Krabbeln etc.). Bei der Berechnung wurden für Gewicht und Größe die Durchschnittswerte von 2- bis 6-Jährigen (ø 4-jährig) herangezogen.

ANMERKUNG 2 Für Schüler der Primarstufe wird für das metabolische Äquivalent ein Wert von 1,4, für Schüler der Sekundarstufen I und II sowie für Personen im Tertiärbereich ein Wert von 1,2 angesetzt.

ANMERKUNG 3 Für die Berechnung wird eine CO_2-Außenluftkonzentration von 420 ppm angenommen.

ANMERKUNG 4 Der informative Anhang A enthält das Berechnungsmodell zur Ermittlung des erforderlichen Außenluftvolumenstroms.

[a] Werte für Funktionsbereiche mit Schwerpunkt Unterricht/Lernen/Arbeit (z. B. Unterrichtsräume, Kindergartengruppenräume, Hörsäle, offene Lernzonen, Mehrzweckräume, Bibliotheken, Arbeitsbereiche für Lehrende)

[b] Werte für Funktionsbereiche mit Schwerpunkt Freizeit/Erholung (z. B. Speisebereich, Aula, Homebases, Sozialbereiche für Lehrende) und Erschließungsbereiche

In den Schulbaurichtlinien des Österreichischen Instituts für Schul- und Sportstättenbau werden für die entsprechend genannten Räume Hinweise zur Schullüftung gegeben, die sich nur geringfügig von den Vorgaben der ÖNORM H 6039 unterscheiden (ÖISS 2023). Die gravierendste Abweichung in Bezug auf die erforderlichen Außenluftvolumenströme ist die, dass bei Vorliegen eines Lüftungskonzeptes die Auslegungswerte für die Volumina um 10 % reduziert werden können.

Für Turnsäle oder Sporträume sind erhöhte Auslegungswerte für die Außenluftvolumenströme erforderlich, da das metabolische Äquivalent der Sporttreibenden deutlich höher ist als bei einer sitzenden Tätigkeit. Gemäß ÖNORM B 2608[8] wird ein Außenluftvolumenstrom von etwa 40 m^3/h angeführt. Dieser Wert kann für große Kubaturen und fallweiser Belegung ausreichend sein. Laut ÖISS (2023) berechnet sich bei längerfristiger Nutzung und bei kleineren Räumen, in denen sich schneller die Ausgleichskonzentration einstellt, ein Auslegungs-Zuluftvolumenstrom je

[8] ÖNORM B 2608: Sporthallen - Richtlinien für Planung und Ausführung. 2014-04-15

nach Aktivität mit 46 m³ bis 88 m³ pro Person und Stunde, abhängig von Alter und Aktivität (Abbildung 6). Die Außenluftzufuhr ist in allen Fällen der tatsächlich stattfindenden Tätigkeit durch eine Bedarfsregelung anzupassen. Die Werte können zur Berechnung der Auslegungswerte von RLT-Anlagen in Sporthallen oder in Räumen ähnlicher Nutzung dienen.

Abbildung 7 Erforderliche personenbezogene Außenluftvolumenströme in Sporthallen laut ÖISS

Kategorien nach Bildungsstufen (Alter der Personen)	Erforderlicher Außenluft-Volumenstrom m³/h pro Nutzer/in in Sporthallen Angaben für eine mittlere CO_2-Konzentration in der Raumluft von 1400 ppm	
	moderate sportliche Aktivität von 100% der Anwesenden mit met=4,8	schwere sportliche Aktivität von 100% der Anwesenden mit met=6,7
Elementar- und Primarstufe (i.d.R. 0-10 Jährige)	46	64
Sekundarstufe I und II (i.d.R. 11-18 Jährige) Tertiärbereich, Erwachsenenbildung, Lehrpersonen, Betreuer/innen (i.d.R. über 19 Jährige)	63	88
Für alle Anwesenden, die sportlich aktiv sind, wird ein Wert für das metabolische Äquivalent von met=4,8 (moderate Anstrengung) bzw. met=6,7 (starke Anstrengung) angesetzt. Für andere Annahmen für das metabolische Äquivalent met ergeben sich lineare Abhängigkeiten der erforderlichen personenbezogenen Außenluft-Volumenströme. Bei 50% sportlich Aktiven wird für den resultierenden Wert für das metabolische Äquivalent der arithmetische Mittelwert von met=1,6 (stehend) und dem jeweiligen met für die Aktivität herangezogen. Die CO_2-Außenluftkonzentration wird für die Berechnung mit 410 ppm angenommen. Werte für den Zielwert von 1400 ppm sind in Räumen anzusetzen, sofern diese von pädagogischen Bereichen räumlich entkoppelt sind		

Tabelle 3: Personenbezogene Außenluft-Volumenströme für Sporthallen, berechnet nach Persily & de Jonge[16]

4.3.3 Internationale Regelwerke für CO_2 und Luftvolumina

In Deutschland wurden „Hygienische Leitwerte“ für CO_2 von der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) bzw. der Ad-hoc AG (2008) veröffentlicht. Es erfolgt die Differenzierung abhängig vom Beurteilungswert der CO_2-Konzentration in die drei Bereiche „hygienisch unbedenklich“, „hygienisch auffällig“ und „hygienisch inakzeptabel“. Bei einem Beurteilungswert von unter 1.000 ppm absolut wird die Situation als „hygienisch unbedenklich“ bezeichnet und es werden keine weiteren Maßnahmen empfohlen. Bei dieser hygienischen Bewertung handelt es sich dem Sinn nach um einen Zielwert (1.000 ppm absolut).

Tabelle 5 Hygienische Leitwerte für CO_2 laut Ad-hoc AG (2008)

Beurteilungswert als CO_2-Konzentration [ppm absolut]	**Hygienische Bewertung**	**Empfehlungen**
< 1.000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1.000 ... 2.000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluft-volumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen). Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2.000	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 Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) als Richtwert für die CO_2-Konzentration der Raumluft der arithmetische Mittelwert von 1.000 ppm über die Dauer einer Nutzungseinheit (in Schulen eine Unterrichtsstunde ohne Pausen) festgelegt (AK Lüftung 2017).

Die Möglichkeiten der Lüftung von Schulen werden in der VDI 6040 Blatt 1 und Blatt 2[9] beschrieben. Dabei werden neben freier und maschineller Lüftung auch Varianten hybrider Lüftung aufgezeigt. Ausgehend von den Anforderungen an den Schulraum (VDI 6040 Blatt 1) werden Anwendungsbeispiele (VDI 6040 Blatt 2) dargestellt, mit denen die gestellten Anforderungen einhaltbar sind. Dazu werden zur Dimensionierung personenbezogene Luftvolumenströme in Abhängigkeit von Jahrgangsstufe und Aktivität angegeben, sowie die Auslegungsgrundsätze für freie und maschinelle Lüftung erläutert.

[9] VDI 6040 Blatt 1 (2011): Raumlufttechnik - Schulen - Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien). 2011-06
VDI 6040 Blatt 2 (2015): Raumlufttechnik - Schulen - Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien). 2015 09

In der DIN 1946-6 Beiblatt 1 und Beiblatt 2[10] 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.

Im englischsprachigen Raum werden unterschiedliche Regelwerke, bspw. in den USA die zahlreichen Publikationen der ASHRAE verwendet.

Auf internationaler Ebene legt die den österreichischen Richtwerten analoge ISO 16000-41[11] (2023) Messprinzipien und Qualitätsklassen für CO_2 sowie personen- und flächenbezogenen Außenluftvolumina in Form von drei Raumqualitäten fest. Als Erfordernis für die Qualitätsklasse „A“ wird in Table A.2 die Nichtüberschreitung von 1.000 ppm für CO_2 als arithmetischer Mittelwert über den Beurteilungszeitraum genannt.

Abbildung 8 Vorgeschlagene Qualitätsklassen für CO_2 laut Tab. A.2 in ISO 16000-41 (2023)

Table A.2 — Example of quality classes for CO_2

Quality class	Arithmetic mean for class limits for CO_2 ppm absolute	Description of the quality classes
A	≤1 000	Requirements for indoor rooms for the continuous stay of persons in which intellectual activities are carried out or which are used for regeneration
B	1 001 to 1 400	General requirements for indoor rooms for the continuous stay of persons
C	1 401 to 5 000	Requirements for indoor rooms with brief use by persons
Outside the quality classes	>5 000	Not acceptable for use by persons

[10] DIN 1946-6 Beiblatt 1 (2012): Raumlufttechnik - 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): Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung - Beiblatt 2: Lüftungskonzept. 2013 03

[11] ISO 16000-41. Indoor Air – Part 41: Assessment and classification. 2023-08

5 Beurteilung von CO_2-Konzentrationen

5.1 Allgemeines

CO_2 ist ein geeigneter 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 und vermutlich auch von Haustieren abgegebenen flüchtigen Stoffe. Eine genaue Trennung der Wirkungen von CO_2 als Stoff selbst und der Wirkungen anderer von Menschen abgegebenen Substanzen ist aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und fehlender wissenschaftlicher Studien nicht möglich. Wegen der Besonderheiten dieses komplexen Substanzgemisches ist es nicht möglich, das im Teil 1 „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft vorgestellte, für die Ableitung von Wirkungsbezogenen Innenraumrichtwerten (WIR) entwickelte Basisschema anzuwenden.

Die CO_2-Konzentration eignet sich nicht als alleiniges Kriterium für eine allfällige gesundheitliche Bewertung, sondern ist vielmehr als einer der Indikatoren für die Gesamtsituation anzusehen. Es ist bei der Klassifizierung zu berücksichtigen, dass die Konzentration an CO_2 zwar mit den von Menschen abgegebenen Stoffen korreliert, die möglichen Wirkungen dieser zusätzlich vorhandenen Raumluftinhaltsstoffe jedoch nicht zur Gänze berücksichtigt werden können. Diese Stoffe (organische und anorganische Substanzen) sind daher einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen. Bei der Beurteilung von Innenräumen ist auch die in den Räumen durchgeführte Aktivität mitzuberücksichtigen (z. B. geistige Arbeit, körperliche Tätigkeit, Schlaf).

Zur Abschätzung der Innenraumluft-Qualität wird im Folgenden ein Klassifizierungsschema für die CO_2-Konzentration mit angeschlossener Bewertung angegeben. Diese Bereiche beruhen auf den in den Kapiteln 2.2, 2.3 und 4 angeführten Untersuchungen, Erfahrungen der Praxis und dem Stand der Technik. Aufgrund der Eigenschaft von CO_2 als Indikator für andere, in ihrer Zusammensetzung variierender Stoffe, handelt es sich um keine toxikologische Bewertung bzw. Ableitung streng im Sinne des Basisschemas (siehe „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie).

5.2 Definitionen

Der Beurteilungszeitraum ist in Kapitel 3.1.2 definiert. Ein Momentanwert ist die absolut gemessene CO_2-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“ (Raumklasse A), 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, jedoch keine Sporträume. Alle anderen Innenräume, die dauernd benutzt werden, bspw. Wohnräume mit Ausnahme von Schlafräumen, Verkaufsräume, Gasträume von Gastgewerbebetrieben, Arbeitsräume, in denen keine geistige Tätigkeit verrichtet wird, Sport- und Fitnessräume sowie Fahrgasträume öffentlicher Verkehrsmittel fallen in die Raumklasse B.

Es ist möglich, dass ein Raum währen bestimmter Zeiträume in die Raumklasse A eingeordnet wird (zB. Kinderzimmer während der Nachtstunden, Multifunktionsraum während eines Vortrages), zu anderen Zeiten in die Raumklasse B (Kinderzimmer, in dem nicht gelernt wird während derTagesstunden, Multifunktionsraum während eines geselligen Vereinstreffens).

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“ (Raumklasse C) 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.

Es werden die Angaben für die Konzentrationen an CO_2 in der Einheit „ppm“ angegeben. Die Umrechnung in andere Einheiten erfolgt laut der Umrechnungsfaktoren in Kapitel 2.1.

5.3 Bewertung der Raumluftqualität

Eine hygienisch hochwertige Raumluftqualität ist vor allem für Innenräume, die nicht nur zum vorübergehenden, sondern zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen (Wohn- oder Büroräume, Ausbildungs- und Vortragsräume insbesondere Schulräume, Gasträume usw.) bestimmt sind, von großer Bedeutung. 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 Mischlüftung (Hybridlüftung) unterschieden.

CO_2-Emissionen, deren Quelle weder in der Außenluft noch bei den in den Innenräumen anwesenden Lebewesen liegt, können ebenfalls mit dem gegebenen Schema beurteilt werden, sofern keine andere Regelungen bestehen (bspw. MAK-Wert). Die Bewertung der Raumluftqualität laut Tabelle 6 gilt daher auch für Fälle, in denen CO_2 aus anderen Quellen wie Verbrennungsvorgängen (Gasherde, Ethanolöfen) oder von Haustieren stammt.

Es werden die arithmetischen Mittelwerte (Beurteilungswerte) aller gemessenen, absoluten Momentanwerte für CO_2 im jeweiligen Beurteilungszeitraum herangezogen und in Anlehnung an die im informativen Anhang der ISO 16000-41[12] dargestellten Klassen in die Raumklassen (A+ bis C) zugeordnet.

[12] ISO 16000-41. Indoor Air – Part 41: Assessment and classification. 2023-08

Tabelle 6 Richtwerte und Ziele für die Raumluftqualität, Konzentrationsangaben der CO_2-Konzentration in Anlehnung an ISO 16000-41

Raumklasse	Beschreibung	Arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte für CO_2 [ppm]
A+	Zielwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 800
A	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen	≤ 1.000
B	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen mit Ausnahme von Räumen der Klasse A	≤ 1.400
C	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen	≤ 5.000
Außerhalb der Raumklassen	Für die Nutzung durch Personen nicht akzeptabel	> 5.000

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 CO_2 absolut liegt (Raumklasse A+). Der Wert von 800 ppm kann beispielsweise bei der Belüftung von mechanisch gelüfteten Vortragsräumen oder Schulklassen oder von Wohnräumen als Ziel für die tatsächliche Regelung der Außenluftvolumenströme im täglichen Normalbetrieb gewählt werden, auch wenn dieser Wert bei Vollbelegung aufgrund der Auslegung der Anlage nicht erreichbar ist.

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 1.000 ppm CO_2 absolut (Raumklasse A) liegen.

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, Sporträume sowie Fahrgasträume öffentlicher Verkehrsmittel) sollte der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 1.400 ppm CO_2 absolut (Raumklasse B) liegen.

Wenn ein Raum währen bestimmter Zeiträume in die Raumklasse A eingeordnet wird und zu anderen Zeiten in die Raumklasse B, muss die Lüftungsmöglichkeit der höheren Klasse entsprechen. Bei Vorhandensein mechanischer Lüftungseinrichtungen sollten diese eine geeignete Bedarfsregelung aufweisen, um unterschiedliche, der jeweiligen Nutzung entsprechende Zuluftvolumenströme aufrecht erhalten zu können.

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 5.000 ppm CO_2 absolut (Raumklasse C, MAK-Wert laut Grenzwerteverordnung) 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, sind zielgerichtete Maßnahmen zur Einhaltung der Vorgaben einzuleiten. Im Vordergrund können beispielsweise Maßnahmen zur Intensivierung der Fensterlüftung stehen, in zahlreichen Fällen ist dies jedoch nicht ausreichend, um die Vorgaben zu erfüllen. Beispiele dafür sind Schlafräume ausschließlich fensterbelüfteter Räume mit dichten, modernen Fenstern, in denen die Türe zu anderen Räumen verschlossen wird oder Unterrichtsräume von Schulen. Unabhängig davon sind den Nutzern Empfehlungen hinsichtlich wirkungsvoller belastungsmindernder Maßnahmen (bspw. Einbau und fachgerechter Betrieb mechanischer Lüftungseinrichtungen, Verringerung der Raumbelegung – Vermeidung von Belastungsspitzen, Verwendung spezieller Fensterbeschläge in Schlafräumen zur Nachtlüftung usw.) mitzuteilen.

Um zu einer Einschätzung der zu erwartenden Konzentrationen bei anderen Randparametern – bspw. bei der Option eines Einbaues mechanischer Lüftungssysteme – zu gelangen, ist ein Lüftungskonzept zu erstellen, Näheres dazu findet man in der Publikation „Lüftungskonzept Österreich“ (Rojas et al. 2021). Unter Einbeziehung des Raumvolumens sowie der Lüftung der Räume (Fenster- und Fugenlüftung sowie gegebenenfalls mechanische Lüftungsanlagen) unter Berücksichtigung der geplanten Personen-Belegung sowie weiterer Parameter kann mittels eines CO_2-Rechenprogrammes (Tappler 2024; Rojas et al. 2023) der Verlauf der CO_2-Momentanwerte simuliert und darauf aufbauend Maßnahmen abgeleitet werden.

Das Lüftungskonzept kann unter Berücksichtigung bauphysikalischer, lüftungstechnischer und hygienischer Gesichtspunkte zeigen, ob in einem gegebenen Fall die freie Lüftung über Fugen und Fenster ausreicht oder ob ventilatorgestützte Lüftungssysteme (Abluftsysteme, Zu- und Abluftsysteme mit Wärmerückgewinnung) erforderlich sind und welcher Außenluftvolumenstrom (Luftwechsel) zur Aufrechterhaltung hygienischer Verhältnisse erforderlich ist.

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 (2017) – 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 (2022): „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 (basierend auf OIB RL-3 2023).

Ein Lüftungskonzept (Rojas et al. 2021) bietet den Nachweis, dass die dem Gebäude bzw. den einzelnen Räumen zugeführten Außenluftvolumenströme den Erfordernissen der OIB-RL 3 (als Richtwert für die Frischluftzufuhr zu Wohnräumen werden 25 m³ pro Person und Stunde genannt) bzw. den jeweiligen bautechnischen Regelungen der Länder entsprechen.

Literaturverzeichnis

Die nicht im Anhang aufgeführten Regelwerke sind in den Fußnoten bei Erwähnung der jeweiligen Regelwerke aufgeführt.

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

AK Lüftung (2017): Anforderungen Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen. Arbeitskreis Lüftung des Umweltbundesamtes bestehend aus der Kommission Nachhaltiges Bauen (KNBau) und der Innenraumlufthygiene-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 CO_2 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 (2013): Fundamentals Handbook. Atlanta: GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.

ASTM (2018): ASTM-Standard D 6245-18. Standard Guide for using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

Batterman S, Peng CY (1995): TVOC and CO_2-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.

Buonanno G, Stabile L, Morawska L (2020): Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. Environment International 141, 105794. doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794

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.

FAO (2001): Human Energy Requirements.. Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultationGeneva: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Nutrition Technical Report Series 1.

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-Arbeits-medizinische Begründung von MAK-Werten, Kapitel: Kohlendioxid. VCH, Weinheim.

Grenzwerteverordnung (2021): 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 2021).

Hohenblum P, Kundi M, Gundacker C, Hutter HP, Jansson M, Moosmann L, Scharf S, Tappler P, Uhl M (2008): LUKI – LUft und KInder. Einfluss der Innenraumluft auf die Gesundheit von Kindern in Ganztagsschulen. Report REP-0182. Umweltbundesamt Wien.

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 CO_2-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. Forschungsprogramm Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Internet vom 17.08.2023: 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 CO_2-Konzentration und Raumluftfeuchte in verschiedenen Schulen in Deutschland, Friedrich-Alexander-Universität & Hochbauamt der Stadt Nürnberg, Kommunales Energiemanagement und Bauphysik, Eigenverlag.

Müller D, Rewitz K, Derwein D, Burgholz TM, Schweiker M, Barday J, Tappler P (2020): Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen. Report (white paper). RWTH-EBC 2020-005, Aachen, 2020: doi.org/10.18154/RWTH-2020-11340

NLGA (2004): Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen. NLGA - Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Internet vom 21.08.2017: 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 (2023): ÖISS-Richtlinie Raumluft. Ergänzungspapier zu den ÖISS Richtlinien für den Bildungsbau. Österreichisches Institut für Schul- und Sportstättenbau. Jänner 2023.

Persily, de Jonge (2017): Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air 27: 868-879. doi.org/10.1111/ina.12383

Pettenkofer M von (1858): Über den Luftwechsel in Wohnungen. Cotta, München.

Pluschke P (1996): Luftschadstoffe in Innenräumen. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

Prescher KE (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): CO_2-Konzentration im Klassenzimmer. Umschau 81: 172-174.

Rojas G, Greml A, Pfluger R, Tappler P (2021): Lüftungskonzept Österreich. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 33/2021. nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2021-33-lueftungskonzept-oesterreich.pdf

Rojas G, Greml A, Pfluger R, Tappler P (2023): Assessing the "sufficient ventilation" requirement for Austrian buildings: development of a Monte Carlo based spreadsheet calculation to estimate airing intervals and mould risk in window ventilated buildings. International Journal of Ventilation 1-10. doi: 10.1080/14733315.2023.2198788

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 CO_2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO_2 Concentrations on Human Decision-Making Performance. Environ Health Perspect 120: 1671-1677 doi:10.1289/ehp.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 CO_2 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.

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

Tappler P (2023): CO2-SIM 5.3. Rechenblatt zur Berechnung der CO_2-Konzentrationen in Innenräumen. raumluft.org

Turiel I, Rudy JV (1982): Occupant-generated CO_2 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 (2017): Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden. Teil 1: Bildungseinrichtungen. Hrsg.: Umweltbundesamt Deutschland Dessau-Roßlau.

UBA (2023): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. Umweltbundesamt Deutschland. umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid

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 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 14: 314.

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-Verlag, Karlsruhe.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
+43 (0) 800 21 53 59
servicebuero@bmk.gv.at
bmk.gv.at