



Indoor Air Quality

Komplexes Zusammenwirken gesundheitsbeeinflussender Raumluftparameter

Teil 1



Die Innenraumlufthqualität (IAQ: Indoor Air Quality) spielt eine äußerst wichtige Rolle für das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen. Das wird verständlich, wenn man sich bewusst macht, dass die Luft in Innenräumen von Gebäuden bis zu 8-mal stärker verschmutzt ist als die Außenluft. Hinzu kommt, dass die Mehrheit der modernen Menschen sich deutlich länger im Inneren von Gebäuden, in Büros, Werkhallen, Wohnungen usw. aufhält als im Außenbereich. Aber auch die dort vorzufindende „frische Luft“ verdient dieses Prädikat oft nicht. Mit zunehmender Häufigkeit übersteigen besonders in den verkehrsreichen Innenstädten Feinstaub- und Stickstoffdioxidwerte die amtlichen Grenzwerte. In der Regel jedoch hat die IAQ die stärkeren Auswirkungen auf die Gesundheit. Weil für eine hohe IAQ das Zusammenwirken zahlreicher Faktoren eine Rolle spielt, ist deren Erfassung und Umsetzung in charakterisierende Kenngrößen notwendig.



Luftbestandteile

Idealerweise besteht eine schadstoffarme atmosphärische Luft aus den gasförmigen Bestandteilen Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Edelgase, Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H) (Bild 1).

Eine detailliertere Aufstellung ist Bild 2 zu entnehmen. Neben den in der Tabelle genannten Gasen enthält die Luft noch:

- Wasser in wechselnder Konzentration und in allen 3 Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig)
- Staubpartikel (Feinstaub)
- Aerosole
- Schwefel- und Stickstoffverbindungen
- Flüchtige organische Verbindungen (VOCs: Volatile Organic Compounds)
- Ozon
- In der Atmosphäre erzeugte Radikale

Die Tabelle in Bild 3 gibt eine Übersicht über die durchschnittlichen Hintergrundkonzentrationen in Europa. Diese natürlichen Bestandteile der sauberen Außenluft sind zwar mengenmäßig äußerst gering, einige von ihnen können jedoch bei intensiverem Auftreten in der Innenraumluft mehr oder weniger starke Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben.

Luftqualität

Eine qualitativ hochwertige Atemluft ist durch die An- bzw. Abwesenheit bestimmter Stoffe gekennzeichnet. Diese können in Form von Gasen oder Stäuben vorliegen und haben charakteristische Grenzwerte, bei denen die Verträglichkeit für den Menschen endet.

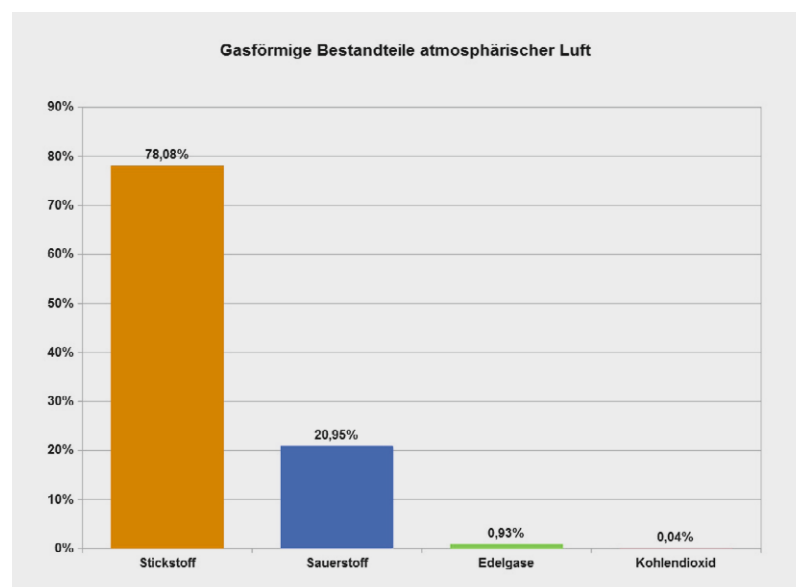


Bild 1: Stickstoff und Sauerstoff sind mit Abstand die beherrschenden Bestandteile der Erdatmosphäre.



Bestandteile	Symbol	Volumenanteil
Stickstoff	N ₂	78,08 %
Sauerstoff	O ₂	20,95 %
= 99,03 % des Gesamtvolumens		
Argon	Ar	0,93 %
Kohlendioxid	CO ₂	0,041 % (0,028 % vorindustriell)
Neon	Ne	0,0018 %
Helium	He	0,0005 %
Methan	CH ₄	0,00018 % (0,00007 % vorindustriell)
Krypton	Kr	0,00011 %
Wasserstoff	H ₂	0,00005 %
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	0,00003 %
Kohlenmonoxid	CO	0,00002 %
Xenon	Xe	0,000009 %

Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen, und Naturschutz Baden-Württemberg

Bild 2: Alle Spurengase zusammen umfassen weniger als 1 % des Atmosphärenvolumens.

Spurengase	Volumenanteil in ppb (parts per billion = 10 ⁻⁹)	
Ozon (O ₃)	30 - 50	
Flüchtige Organische Verbindungen (VOCs)	10 - 100	Ohne Methan, formal auf die Zahl der Kohlenstoffatome bezogen
Stickstoffdioxide (NO _x)	0,01 - 5	
Schwefeldioxid (SO ₂)	0,1 - 2	
Spurengase	Volumenanteil in ppt (parts per trillion = 10 ⁻¹²)	
Schwefelkohlenstoff (CS ₂)	30	
Carbonylsulfid (COS)	500	
Tetrachlorkohlenstoff (CCl ₄)	100 - 200	
Dichlordifluormethan (CF ₂ Cl ₂)	230 - 300	
Trichlorfluormethan (CFCl ₃)	160	
Dimethylsulfid (CH ₃ SCH ₃)	20 - 150	
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	0,5	
Freie Radikale	Anzahl in Radikale pro m ³	
Hydroxyl-Radikal (OH•)	10 ¹²	Wichtig für den Abbau von Luftverunreinigungen
Perhydroxyl-Radikal (HO ₂ •)	10 ¹⁴	Beteiligt am atmosphärischen Ozonabbau
Aerosole	Massenkonzentration in 10 ⁶ g pro m ³	
Sulfate	20 - 50	
Ammoniumsulfate	20 - 50	
Nitrate	20 - 50	
Chloride	20 - 50	

Bild 3: Winzige Anteile, aber große Auswirkungen: Spurengase, freie Radikale und Aerosole

Sauerstoffgehalt in der Atemluft (O ₂)	Gefährdung und Auswirkung
21 – 18 Vol.-%	Keine Symptome erkennbar
18 – 11 Vol.-%	Kaum merkliche Beeinträchtigung der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit
11 – 8 Vol.-%	Ohnmacht ohne Vorwarnung innerhalb weniger Minuten möglich
8 – 6 Vol.-%	Ohnmacht nach kurzer Zeit. Sofortige Wiederbelebung möglich
6 – 0 Vol.-%	Sofortige Ohnmacht. Irreversible Hirnschäden

Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen, und Naturschutz Baden-Württemberg

Bild 4: Auswirkungen der Sauerstoffkonzentration in der Atemluft

Die Einflüsse der Raumluft auf eine gesunde, behagliche Umgebung sind vielfältig. Die meisten auf dem Markt befindlichen Messgeräte erfassen nur einen kleinen Teil der Qualitätskriterien, vorwiegend Temperatur, Luftfeuchte und CO₂-Gehalt. Daneben beeinflussen insbesondere flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und Schwebstoffe in der Luft (Staub) in zunehmender Konzentration Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen, der sie einatmet.

Anders beim Sauerstoff (O₂). Dieser ist in normaler Atemluft mit einem Anteil von knapp 21 Vol.-% enthalten und sollte nach Möglichkeit 18 Vol.-% nicht unterschreiten. Die Folgen geringerer O₂-Konzentrationen sind in Bild 4 zusammengefasst. Dagegen sind erhöhte Sauerstoffkonzentrationen bis zu 50–60 Vol.-% bei Normaldruck für Erwachsene unbedenklich. In der Medizin wird Patienten mit schwacher Lungenleistung im Rahmen von Sauerstofftherapien Atemluft mit erhöhtem Sauerstoffgehalt zugeführt, um ihnen Erleichterung zu verschaffen.

„Ein gesundheitsverträgliches Wohnen und damit eine geringe Innenraumbelastung mit Schadstoffen sollte heutzutage geprägt sein durch die richtige Wahl der Bauprodukte, eine geeignete Be- und Entlüftung von Räumen und dem Benutzen von möglichst schadstofffreien Wohngegenständen.“ Diese Forderung des Bundesumweltamts bringt es auf den Punkt [1].

Übrigens ist der Sauerstoffgehalt „verbrauchter“ Luft nicht signifikant gesenkt. „Frische“ Luft ist also nicht durch das Vorhandensein von deutlich mehr Sauerstoff gekennzeichnet, sondern durch die Abwesenheit oder vernachlässigbare Konzentration von Schadstoffen.

Es ist anzumerken, dass eine Gefährdung der Gesundheit meistens nicht von einem kurzen Schadstoffspitzenwert ausgeht, sondern vom längerfristigen Verweilen in einer anhaltend hohen Schadstoffkonzentration. Ein höherwertiges Messgerät sollte deshalb nicht nur den Momentanwert des betreffenden Luftbestandteils anzeigen, sondern dessen chronologischen Verlauf abspeichern, um daraus energiesparende, adaptive Gegenmaßnahmen einzuleiten.

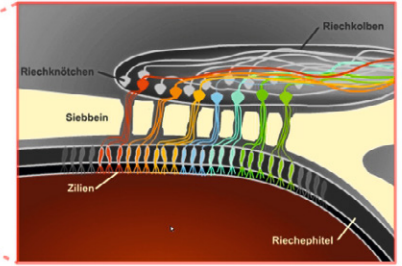
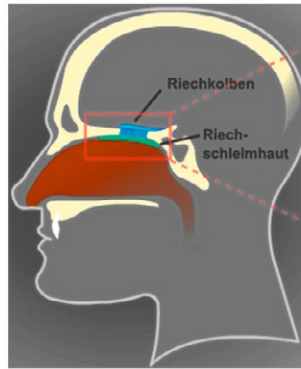
Der ideale Sensor

Weil die Qualität der Atemluft über ein hochkomplexes Zusammenwirken ihrer vielfältigen Bestandteile bestimmt wird, die je nach Typ und Konzentration mehr oder weniger schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, wäre für die Analyse der Atemluft eine Vielzahl von selektiven Sensoren und die Auswertung derer Messergebnisse erforderlich. Ideal wäre eine Sensorbank mit auf die kritischen Atemluftverunreinigungen spezialisierten Fühlern ohne Querempfindlichkeit gegenüber anderen Stoffen. Algorithmen müssten dann die Sensorsignale gewichten, um den von ihnen verursachten schädlichen Auswirkungen gezielt entgegenzuwirken zu können.

Die menschliche Nase in Verbindung mit dem Gehirn kommt mit ihren etwa 350 Chemorezeptortypen (Bild 5) einem derartigen Messsystem schon recht nahe. Sie lässt uns rund 10.000 Gerüche und damit



eng verbundene Geschmackseindrücke unterscheiden, kann aber viele geruchlose und dennoch gefährliche Atemluftkomponenten nicht detektieren (z. B. das hochgiftige Kohlenmonoxid). Für den Ablauf des Riechvorgangs müssen die Riechzellen die Duftmoleküle in der Luft chemisch erkennen und in elektrische Signale zur Weiterleitung an das Gehirn umwandeln, wo sie zu einem komplexen Dufteindruck zusammengefasst werden. Ein derart ausgefeiltes Detektions- und Analysesystem ist mit den Möglichkeiten der heutigen Technik (noch) nicht realisierbar, schon gar nicht mobil. Noch ist also ein portables Analyseinstrument, das zwischen Hunderten von VOCs selektiv unterscheiden kann, Zukunftsmusik.



Quelle: www.planet-schule.de
das gemeinsame Internetangebot des Schulfernsehens von SWR und WDR

<https://www.planet-schule.de/wissenspool/total-phaenomenal-sinne/inhalt/hintergrund/der-geruchssinn/mensch.html>

Bild 5: Die Nase ist ein hoch entwickeltes selektives Detektionsorgan für Gerüche (flüchtige organische Verbindungen).

Flüchtige organische Verbindungen

Mit dem Kürzel VOC (Volatile Organic Compound) werden gas- und dampfförmige Ausscheidungen organischer, also kohlenstoffhaltiger fester oder flüssiger Substanzen zusammenfassend benannt. Sie verflüchtigen sich wegen ihres hohen Dampfdrucks bereits bei niedrigen Temperaturen (Raumtemperatur) und werden zum meist unerwünschten Bestandteil der Umgebungsluft. So können viele hundert verschiedene Einzel-VOCs in der Luft gemeinsam auftreten. Die Gesamtheit der Konzentrationen sämtlicher VOCs wird durch den TVOC-Wert (Total Volatile Organic Compounds) beschrieben. In der Regel wird das Gas Methan (CH₄) nicht zu den VOCs gezählt, was sich in der ebenfalls üblichen Abkürzung NMVOCs (Non Methane VOCs) widerspiegelt.

Die WHO (World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation) hat die organischen Verbindungen in der Innenraumluft wie in Bild 6 dargestellt klassifiziert.

Gruppenbezeichnung	Abkürzung	Siedepunktbereich (Polare Verbindungen sind am oberen Bereichsende zu finden)
Very Volatile Organic Compounds (leichtflüchtige organische Verbindungen)	VVOC	< 0 bis 50 – 100 °C
Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)	VOC	50 – 100 bis 250 – 260 °C
Semivolatile Organic Compounds (schwerflüchtige organische Verbindungen)	SVOC	250 – 260 bis 380 – 500 °C
Organic compounds associated with particulate matter or Particulate Organic Matter (Partikelgebundene organische Verbindungen)	POM	> 380 °C

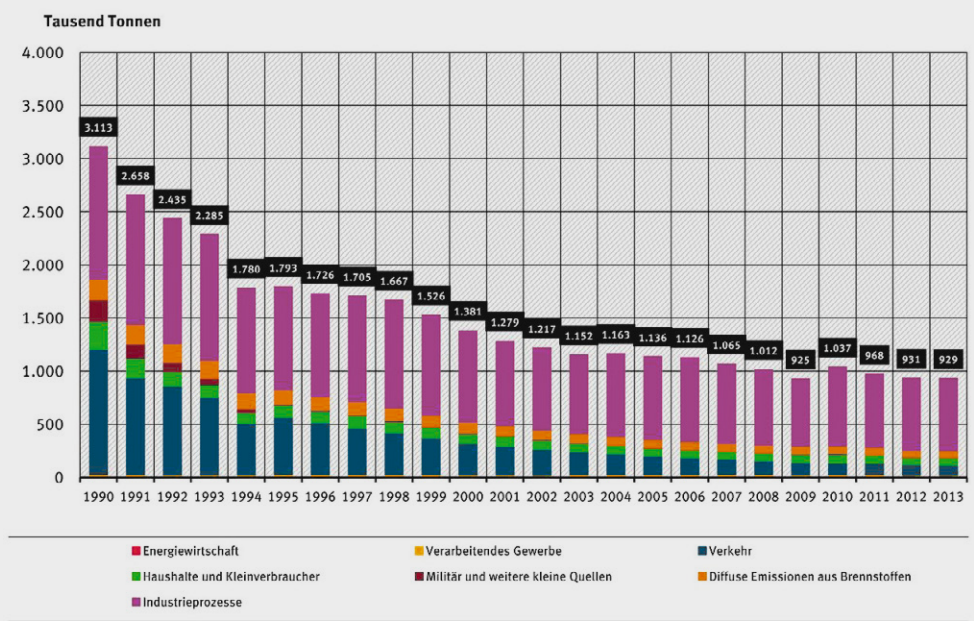
Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/TVOC.pdf>

Bild 6: Die VOCs werden nach ihrem Flüchtigkeitsgrad gruppiert.

VOCs werden bei einer Vielzahl anthropogener (vom Menschen verursachter) und biogener (von Lebewesen verursachter) Prozesse in die Umwelt emittiert. Pflanzen, Tiere, Böden und Meere sind natürliche VOC-Quellen, Verkehr, Kraftwerke und industrielle Lösemittelanwendungen gehören zu den wichtigsten anthropogenen VOC-Quellen.

VOCs können Reizungen hervorrufen und bei relativ hohen Konzentrationen die menschliche Gesundheit negativ beeinflussen. Das sogenannte Sick Building Syndrome (SBS; Gebäudekrankheit) wird als Folge eines langen Aufenthalts in Gebäuden mit Schadstoffen in der Innenraumluft bewertet. Dementsprechend werden giftige VOC-Ausdünstungen der Baumaterialien besonders von Boden- und Teppichklebern, Lacken, Farben, Anstrichen, Dämmmaterialien, Schädlingsbekämpfungsmitteln und Reinigungsprodukten besonders in neu errichteten Gebäuden

Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan (NMVOC) nach Quellkategorien



Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2013 (Stand 03/2015)

Bild 7: Der Anteil des Verkehrs an der VOC-Bilanz ist seit 1990 bemerkenswert zurückgegangen. Heute sind industrielle Prozesse die mit Abstand größten VOC-Emittenten.



als unangenehm empfunden. Unwohlsein, Mattigkeit und Schlaflosigkeit sind eher leichte Symptome des SBS. In schwereren Fällen leiden die Betroffenen unter Allergien, Kopfschmerzen, Reizungen der Augen und Atemwege bis hin zu Schädigungen des Immunsystems sowie Störungen der Nieren- und Leberfunktion. So können VOCs die Lebensqualität der Nutzer eines Gebäudes mehr oder weniger stark einschränken und sind deshalb so weit wie möglich zu vermeiden.

Zwar sind in der Außenluft im Lauf der letzten Jahrzehnte die VOC-Emissionen insbesondere durch Verbesserungen auf den Sektoren Verkehr und Kraftwerke deutlich zurückgegangen (Bild 7), was aber nicht direkt auf die Situation bei der Rauminnenluft übertragbar ist. Hier wirken sich die Energiesparbemühungen bei Wohngebäuden ungünstig aus. Dicht schließende Fenster verhindern das Eintreten der unbelasteten Außenluft und damit eine natürliche Grundlüftung. Hinzu kommt, dass Isoliermaterialien als zusätzliche VOC-Quellen auftreten.

Kohlendioxid

Bereits 1858 hat sich der bayrische Chemiker und Hygieniker Dr. Max Pettenkofer in seinem Referenzwerk „Besprechung allgemeiner auf die Ventilation

CO ₂ -Konzentration [ppm]	Luftqualität
2100	Schlecht Lüftung erforderlich
2000	
1900	
1800	
1700	
1600	Mittel Lüftung empfohlen
1500	
1400	
1300	
1200	
1100	Befriedigend
1000	
900	
800	Gut
700	
600	Hervorragend
500	
400	

Bild 8: Die Klassifizierung der Luftqualität ausschließlich nach dem CO₂-Gehalt greift zu kurz.

Als die normalen Bestandteile der Atmosphäre gelten Sauerstoff, Stickstoff, Wasser und Kohlensäure, deren relative Verhältnisse mit Ausnahme des Wassers fast keinen Schwankungen unterworfen sind. Die Luft enthält allerdings constant noch einige andere Stoffe, z. B. kohlen-saures Ammoniac, organische und unorganische Stoffe, theils als Staub, theils in andern Formen u. s. w., jedoch in so äusserst geringer Menge, dass sie auf unsere Sinne nicht die entfernteste Wirkung hervorzubringen vermögen. Als wesentlichstes Beobachtungsorgan für fremde Stoffe in der Luft dient uns der Geruchssinn; dieser zeigt uns Stoffe an, deren Wahrnehmung uns weder auf physikalischem, noch auf chemischem Wege mehr gelingt. Wir wittern oft noch die geringsten Spuren fremder Beimischungen der Luft (Moschus, viele ätherische Oele und andere riechende Substanzen), welche sich jedem sonstigen Nachweise entziehen. Andere

Bild 9: Max Pettenkofer kann als Vater der Luftqualitätsbestimmung und Lüftungstechnik bezeichnet werden. Er hielt CO₂ noch für die IAQ-bestimmende Komponente.

bezüglicher Fragen“ mit den Fragen der Luftqualitätsklassifizierung und Lüftungsverfahren beschäftigt. Aus seiner Arbeit wurde die Tabelle in Bild 8 abgeleitet, die heute noch internationalen Lüftungsstandards zugrunde liegt.

Pettenkofer machte CO₂ als die alleinige bestimmende Größe für die Raumluftqualität verantwortlich, wie der Auszug aus seinem Werk zeigt (Bild 9), was sicher auch auf den damaligen Stand der Sensorik zurückzuführen ist.

In der Vergangenheit wurde also bei der Bewertung der Innenraumluftqualität deren Kohlendioxidgehalt die maßgebliche Rolle zugeordnet und dabei unberücksichtigt gelassen, dass es zahlreiche andere Luftqualitätskriterien gibt, die realistischere Bedrohungsszenarien für die menschliche Gesundheit darstellen. Aus Bild 10 wird ersichtlich, dass zumindest bei kurzfristiger CO₂-Exposition von 10.000 ppm nicht mit Beeinträchtigungen der Körperfunktionen zu rechnen ist. Dennoch wurde für Kohlendioxid ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 5000 ml/m³ (ppm) entsprechend 0,5 Vol.-% festgelegt. Damit ist ein ausreichender Abstand zur Grenze der Gesundheitsschädlichkeit gewährleistet.

So werden heute noch CO₂-Konzentrationswerte in der Raumluft als Kriterium für die Notwendigkeit einer Lüftung (im Sinne eines Austauschs der belasteten Raumluft durch Außenluft mit einer Grundbelastung von ca. 400 ppm) herangezogen.

Untersuchungen der NASA über die CO₂-Konzentration in der Internationalen Raumstation ISS (Bild 11), bei der es auf Dauer nicht zu Einschränkungen des Wohlbefindens der Astronauten kommt, haben ergeben, dass über längere Zeiträume (26 Tage) ein CO₂-Gehalt in der Atemluft von 10.000 ppm unproblematisch ist [2]. Solche Werte treten aber in der Praxis selbst in stundenlang ungelüfteten, voll belegten Besprechungszimmern nicht auf.

Vielmehr sind es die VOCs aus 2 Quellen, die das Wohlbefinden und die Konzentrationsfähigkeit der im Raum befindlichen Personen herabsetzen:

1. Durch Atmung, Transpiration und Verdauung freigesetzte Stoffwechselprodukte (Metabolismus) und
 2. Ausdünstungen von Baustoffen, Einrichtungsgegenständen, Deodorantien, Reinigungsmittelrückstände usw. (Materialemissionen).
- Im Einzelnen kann es zu Augenreizungen, trockenen Schleimhäuten, Kopfschmerzen bis hin zu Schwindelattacken und Müdigkeit kommen.

CO₂-Äquivalente

Weil bei der Gebäudeklimatisierung (englisch HVAC: Heating, Ventilation, Air Conditioning; deutsch HLK: Heizung, Lüftung, Klimatechnik) immer noch häufig die relativ einfach zu messende CO₂-Konzentration

CO ₂ -Gehalt in der Atemluft	Auswirkungen
0,041 Vol.-% (410 ppm)	Keine negativen gesundheitlichen Auswirkungen (normale CO ₂ -Konzentration im Freien)
0,5 – 1 Vol.-% (5000 – 10.000 ppm)	Bei nur kurzzeitiger Einatmung generell noch keine Beeinträchtigungen der Körperfunktionen
2 – 3 Vol.-% (20.000 – 30.000 ppm)	Zunehmende Reizung des Atemzentrums, Erhöhung der Pulsfrequenz
4 – 7 Vol.-% (40.000 – 70.000 ppm)	Verstärkung der vorgenannten Beschwerden, zusätzlich Durchblutungs-mangel im Gehirn, Aufkommen von Schwindel, Brechreiz und Ohrensausen
8 – 10 Vol.-% (80.000 – 100.000 ppm)	Verstärkung der vorgenannten Beschwerden bis zu Krämpfen und Bewusstlosigkeit mit kurzfristigem Tod
> 10 Vol.-%	Tod tritt kurzfristig ein

Bild 10: Bis zu einer Konzentration von 10.000 ppm CO₂ in der Atemluft ist zumindest bei nicht dauerhafter Exposition nicht mit schädlichen Folgen für den Menschen zu rechnen.



als maßgebliches Lüftungskriterium dient, hat man sich Gedanken darüber gemacht, wie sich aus den Messwerten eines VOC-Sensors äquivalente CO₂-Konzentrationen ableiten lassen.

Die heute meist verwendeten Metalloxid-Semiconductor-Sensoren (MOS) erzeugen ein unspezifisches Messsignal, das keine Rückschlüsse auf die konkrete organische Verbindung zulässt, die es verursacht. Dennoch haben Untersuchungen der Veränderung der Raumluft in dicht besetzten, geschlossenen Räumen ergeben, dass eine deutliche Korrelation der VOC-Mischgaskonzentration (gemessen mit einem MOS-Sensor) mit der CO₂-Konzentration (selektiv gemessen mit einem NDIR-Sensor; NDIR: Nondispersive Infrared) besteht (Bild 12).

Es fällt auf, dass der VOC-Verlauf durch die Überlagerung der vom Menschen erzeugten Anteile sowie zusätzlich auftretender Geruchsereignisse geprägt wird, wogegen der CO₂-Verlauf ausschließlich vom Menschen herrührt. Ein entsprechender Algorithmus ebnet nun die wellige VOC-Kurve ein und skaliert das Resultat so, dass eine weitgehende Ähnlichkeit mit der CO₂-Kurve entsteht. Das Ergebnis ist die gestrichelte blaue Kurve in Bild 12. Abhängig vom CO₂- und VOC-Verlauf sowie dem Umrechnungsalgorithmus können die berechneten äquivalenten CO₂-Werte in der Praxis aber erheblich von den tatsächlichen CO₂-Werten abweichen.

In einem praktischen Beispiel (Bild 13) werden die Eigenheiten des CO₂-Äquivalenzverfahrens demonstriert (Quelle: AppliedSensor). In der linken Grafik sind der von einem Luftgütesensor (AppliedSensor IAQ-100) ermittelte äquivalente CO₂-Verlauf (blau) und der von einem parallel betriebenen NDIR-Sensor gemessene reine CO₂-Verlauf (rot) in einem gut belegten Fitnessstudio abgebildet. Die Korrelation beider Kurven kann als gut bezeichnet werden. Die rechte Grafik zeigt den konstant niedrigen CO₂-Wert (rot) in einer nur gelegentlich frequentierten Toilette. Zwei singuläre Geruchsereignisse (VOC-Emissionen) werden vom CO₂-Sensor nicht erfasst, wohl aber vom IAQ-Sensor (blau). In diesem Fall ist dies von Vorteil, weil sich daraus ein klares Schaltsignal zum Auslösen von Lüftungsmaßnahmen gewinnen lässt.

Im zweiten Teil dieses Artikels zeigen wir weitere, die IAQ beeinflussende Größen sowie Gerätebeispiele zur Ermittlung der Luftgüte. **ELV**



Weitere Infos:

- [1] www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen
- [2] <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090029352.pdf>



Bild 11: In Raumfahrzeugen und Unterseebooten spielt der CO₂-Gehalt der Atemluft eine äußerst wichtige Rolle. Grenzwerte von 10.000 ppm werden als unbedenklich eingeschätzt.

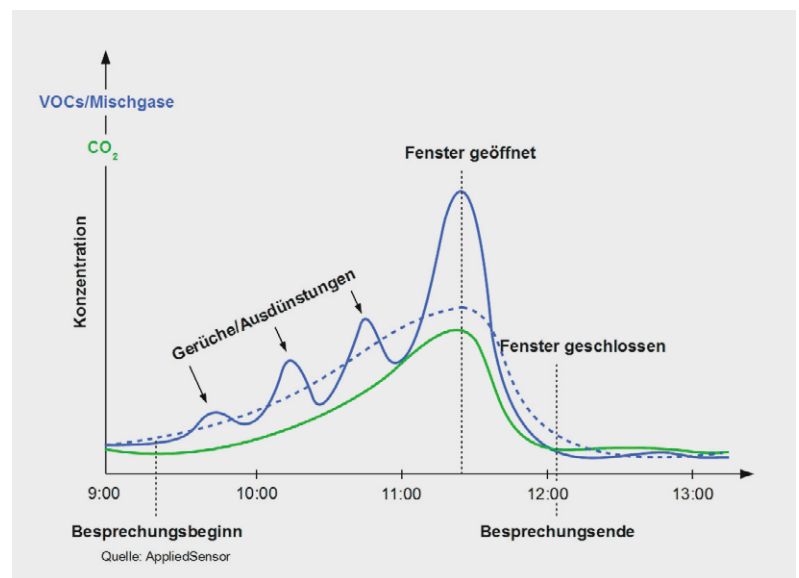


Bild 12: In Ruhe atmet ein Mensch in einer Stunde zwischen 12 und 15 l CO₂ aus. In der gleichen Zeit gibt er eine Vielzahl flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) aus den Stoffwechselprozessen ab. Kein Wunder, dass der Anstieg der Konzentrationen von CO₂ und VOCs in einem besetzten, geschlossenen Besprechungszimmer korreliert ist.

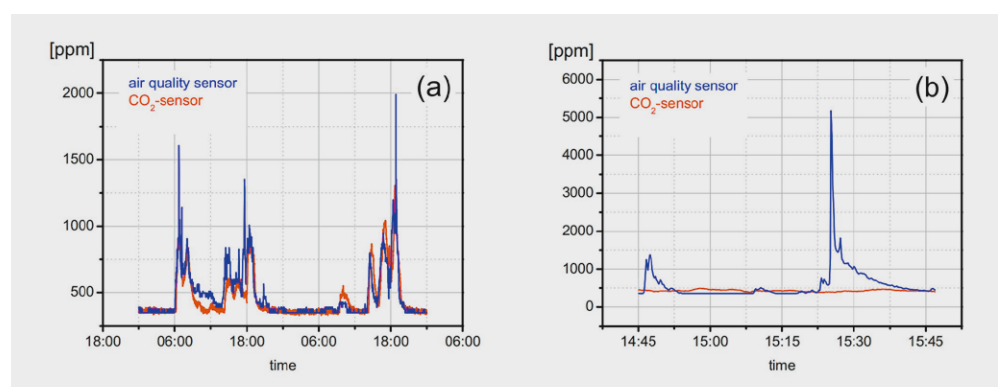


Bild 13: In einer nur gelegentlich frequentierten Toilette bewirkt ein einmaliges Geruchsereignis keinen CO₂-Anstieg.