

Indoor Air Quality

Schlüssel zum gesunden Leben



Schon immer hat der Mensch versucht, sich seine Umgebung so auszuwählen oder einzurichten, dass er gesund, leistungsfähig und behaglich darin leben konnte. Im unmittelbaren körpernahen Bereich sorgt seit jeher die Kleidung dafür, dass Wärme und Trockenheit auf der Hautoberfläche herrschen. Eine Höhle wurde von ihren Bewohnern so gewählt, dass sie trocken ist, im Sommer Schutz vor der Sonnenglut bietet und sich im Winter über ein Feuer heizen lässt, dessen Rauch abzieht und nicht die Atemluft verdirbt. Damit haben sich unsere Vorfahren mit ihren beschränkten Mitteln genau die Bedingungen geschaffen, die sie vor den Unbilden der Natur schützten – eine Voraussetzung, um den Lebenskampf erfolgreich zu bestehen. Heute ist das im Prinzip nicht viel anders, nur dass wir mit den Mitteln der Technik unsere Wohnungen und Arbeitsstätten und die Lebensbedingungen darin vielfältiger gestalten können.



IAQ und HVAC

Für das Wohlbefinden des Menschen ist die Raumluftqualität (Englisch: Indoor Air Quality – IAQ) von entscheidender Bedeutung. Dafür sind Temperatur, Feuchte und Zusammensetzung der Luft die wichtigsten Parameter. Früher wurde mit dem Ofen für warme Luft und durch Lüften für frische gesorgt. Ein sparsamer Umgang mit der Heizenergie war so nicht möglich, und oft genug akzeptierte man eine schlechte Luftqualität zugunsten einer höheren Raumtemperatur nach dem Motto „Erstunken ist noch keiner, erfroren sind dagegen schon viele“. Heute erlaubt die moderne Technik das Heizen, Lüften und Klimatisieren mit einem optimalen Energieeinsatz. „Maximale Lebensqualität zu minimalen Kosten“ ist kein Werbeslogan, sondern im Hinblick auf Nachhaltigkeit und endliche Ressourcen geradezu eine Forderung an die Gebäudetechnik. Die immer höheren Isolationswerte der Gebäudeaußenhaut und dichter schließende Fenster machen es wichtiger denn je, Temperatur, Feuchte und Zusammensetzung der Raumluft zu überwachen und bei für den Menschen unzulässigen Abweichungen ausgleichend einzugreifen. Die Techniksparte, die sich mit dieser Aufgabe beschäftigt, wird im deutschen Sprachraum HLK (Heizung, Lüftung, Klima) und international HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) genannt.

Wir wollen die genannten Parameter etwas genauer betrachten.

Temperatur. Jeder kennt das Gefühl, das man beim Aufenthalt in einem kalten Zimmer hat. Besonders bei einer Tätigkeit mit wenig körperlicher Bewegung, z. B. am Schreibtisch, kühlt der Körper langsam aus. Auch mit warmer Kleidung kriecht die Kälte in die Füße, die Finger werden klamm, die Konzentration lässt nach und irgendwann kündigt sich durch ein erstes Niesen die zugezogene Erkältung an. Ist es dagegen zu heiß im Raum, kommt es zu Schweißbildung und auch zu verringerter geistiger und körperlicher Leistungsfähigkeit, der man nur im begrenzten Maß durch das Entledigen von Kleidungsstücken begegnen kann.

Jeder weiß, dass „trockene“ Kälte als weniger kalt empfunden wird als die nach dem Thermometer gleiche Temperatur bei hoher Luftfeuchte. Ein 18 °C warmes Zimmer scheint nach einem Winterspaziergang angenehm temperiert, nach dem Aufenthalt im überheizten Wohnzimmer des Nachbarn eher kühl. Auch die Bewegung der Luft wirkt sich auf das Temperaturempfinden beim Menschen aus. Sie erzeugt eine Verdunstungskälte auf der Hautoberfläche und verursacht damit einen stärkeren Kälteeindruck.

Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Windchill-Effekt.

Zusammengefasst kann man feststellen, dass es keine „Idealtemperatur“ gibt, weil das Temperaturempfinden von vielen Randbedingungen abhängt und individuell äußerst unterschiedlich und subjektiv ist. Aber eine Raumlufthtemperatur von 19 bis 21 °C wird von der Mehrzahl der Menschen als angenehm empfunden und kommt recht nahe an die von der Medizin als ideal für die Gesundheit der Atemwegsorgane angesehenen 18 °C heran.

Luftfeuchtigkeit. Sie ist ein Maß für die Anzahl der Wassermoleküle in unserer Umgebungsluft. Betrachtet man die unmittelbar an eine Wasseroberfläche angrenzende Luft, wird man hier die sogenannte Sättigungsluftfeuchte vorfinden. Die an dem zu beschreibenden Raumpunkt herrschende Luftfeuchte bezogen auf die Sättigungsluftfeuchte wird als %rF (prozentuale relative Feuchte, Englisch: %rh percentaged relative humidity) bezeichnet.

Physikalisch wird die relative Luftfeuchte über das Verhältnis des sogenannten Partialdrucks p bezogen auf den Sättigungspartialdruck p_s gemäß **Gleichung 1** bei gleicher Temperatur definiert.

$$\%rh = \frac{p}{p_s} \cdot 100\%$$

Gleichung 1

Als Partialdruck bezeichnet man dabei den nach außen gerichteten Druck eines Luftvolumens (air parcel). Er entsteht durch die Brown'sche Molekularbewegung in Gasen und Flüssigkeiten, deren Intensität temperaturabhängig ist. An der Oberfläche einer verdunstenden Flüssigkeit ist diese Bewegung groß genug, um Flüssigkeitsmolekülen das Austreten aus der Flüssigkeit gegen die inneren Anziehungskräfte zu erlauben. Der Physiker sagt, die kinetische Energie der Moleküle an der Grenzfläche Luft – Wasser entspricht dem Sättigungspartialdruck, dem höchstmöglichen Partialdruck bei der gegebenen Temperatur. Durch diese energetische Betrachtungsweise wird auch leicht verständlich, warum sich das verdunstende Medium abkühlt: Ihm wird einfach durch den Austritt von bewegten Flüssigkeitsmolekülen deren kinetische Energie entzogen, was einer Herabsetzung der Temperatur entspricht.

Mit höherer Temperatur nimmt die Zahl der Wassermoleküle zu, die eine ausreichend hohe kinetische Energie haben, um aus der Wasseroberfläche auszutreten. Dadurch steigt die Verdunstungsrate und die Konzentration der Wassermoleküle in der Luft erhöht sich – die Luft wird also feuchter. Die maximale Wassermenge, die Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann (auch Sättigungswassergehalt genannt), zeigt **Bild 1**.

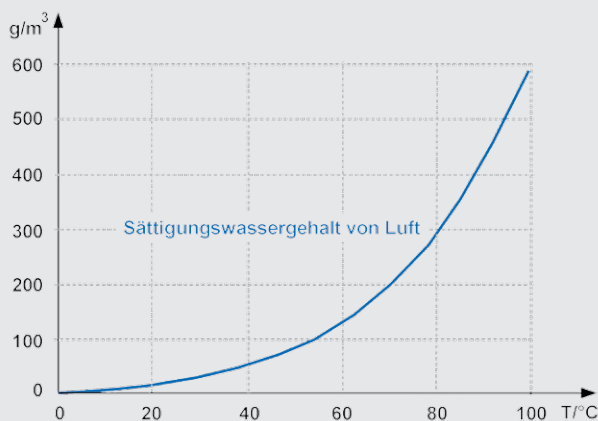


Bild 1: Der Sättigungswassergehalt ist die maximale Wassermenge, die Luft bei einer bestimmten Temperatur enthalten kann, ohne dass Kondensation eintritt.

Um seine Wärmeabfuhr zu steuern, benötigen alle Warmblüter, also auch Menschen, eine gewisse Verdunstung über die Haut. Bei hohen Luftfeuchten (und Temperaturen) kann trotz heftiger Produktion von Schweiß dessen Verdunstung nicht möglich sein. Der Wasserdampfdruck der Luft ist dann höher als der auf der Hautoberfläche und eine Wärmeabgabe findet nicht statt. Der Temperaturregelmechanismus des Menschen ist damit außer Funktion gesetzt, was zum Unwohlsein bis hin zum Hitzschlag und Tod durch Ausfall wichtiger Körperfunktionen führen kann. Weniger dramatisch ist der ständige Aufenthalt in Räumen mit zu niedriger Luftfeuchtigkeit. Dabei trocknen die Nasen- und Mundschleimhäute aus und können ihre Funktion als Abwehrbarrieren gegen Bakterien nicht erfüllen und Infektionen werden begünstigt. Damit ist plausibel, dass sowohl Luftfeuchte als auch Lufttemperatur auf das menschliche Wohlbefinden Auswirkungen haben.

Kohlendioxid (CO₂). Die natürliche Außenluft hat die in **Bild 2** typische Zusammensetzung: Stickstoff, Sauerstoff und in geringen Mengen zahlreiche andere Gase – eines davon ist Kohlendioxid mit der chemischen Formelbezeichnung CO₂. Obwohl CO₂ nur einen Bruchteil unserer Atmosphäre ausmacht, ist sein Einfluss auf Umwelt und Mensch beträchtlich.

CO₂ ist ein unsichtbares und geruchloses Gas, das beim Abkühlen aus der gasförmigen direkt in die Festkörperphase übergeht (Trockeneis). CO₂ entsteht bei jedem Verbrennungsprozess und dem natürlichen Stoffwechsel von Organismen. In niedrigen Konzentrationen ist CO₂ für den Menschen unschädlich, führt in hoher Konzentration dagegen zum Tod.

CO₂ absorbiert Wärmestrahlung und heizt sich dabei auf. Weil der Mensch durch das Verbrennen fossiler Energieträger die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erhöht, hat er zu deren Temperaturanstieg beigetragen (Treibhauseffekt). Messungen der Atmosphärenzusammensetzung seit 1958 auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii sollten Auskunft darüber geben, ob indus-

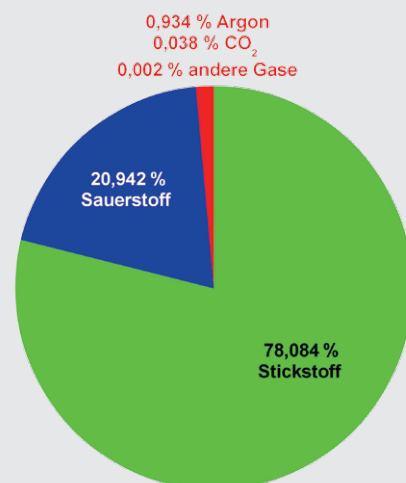
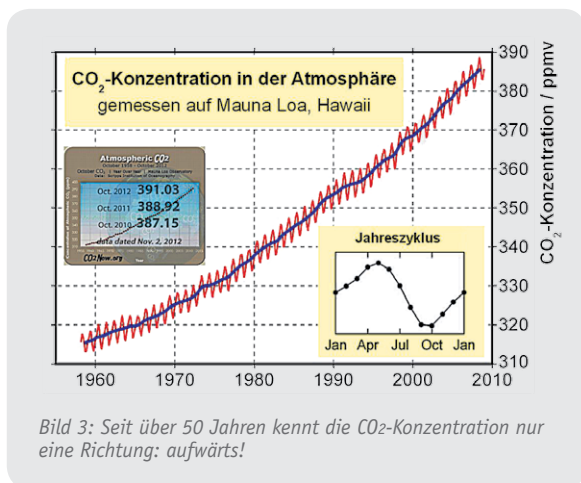


Bild 2: Normale Außenluft besteht zum größten Teil aus Stickstoff, gefolgt von Sauerstoff. In den verbleibenden knapp 1 % (10.000 ppm) dominiert das Edelgas Argon. Kohlendioxid ist nur zu knapp 400 ppm enthalten.



trielle Treibhausgase wie CO₂ in der Atmosphäre zu nehmen oder von den Ozeanen absorbiert werden. Die resultierende Messkurve (Bild 3) dokumentiert einen stetigen Anstieg der CO₂-Konzentration von 315 ppmv (part per million volume, 1000 ppm = 0,1 %) 1958 bis zu heute 392 ppmv. Die typischen Schwankungen im Jahreszyklus werden durch das Wachstum der Pflanzen in der Frühjahrszeit und deren Verrotten im Herbst in der nördlichen Hemisphäre hervorgerufen. Durch den Photosyntheseprozess beim Wachstum der Pflanze entsteht aus Wasser und CO₂ unter Anwesenheit von Licht nämlich Stärke und Sauerstoff, der beim Verrotten oder Verbrennen der abgestorbenen Pflanze wieder unter Freisetzen von CO₂ verbraucht wird. CO₂ ist also für das Wachstum einer Pflanze unverzichtbar und kann durch geringe Steigerung sogar ihr Wachstum beschleunigen. In vielen Gewächshäusern und Pilzkulturen wird übrigens davon Gebrauch gemacht.

Einen letzten Beweis dafür, dass der Mensch für die Steigerungen der weltweiten CO₂-Einträge in die Atmosphäre verantwortlich ist, liefert Bild 4. Die globalen CO₂-Emissionen sind klar mit der Weltbevölkerung und wirtschaftlicher Aktivität korreliert.

Die Auswirkungen von CO₂ auf den menschlichen Organismus sind vielfältig (Bild 5). Sie variieren von Schläfrigkeit über Fehlfunktionen der Sinnesorgane bis zum Exitus.

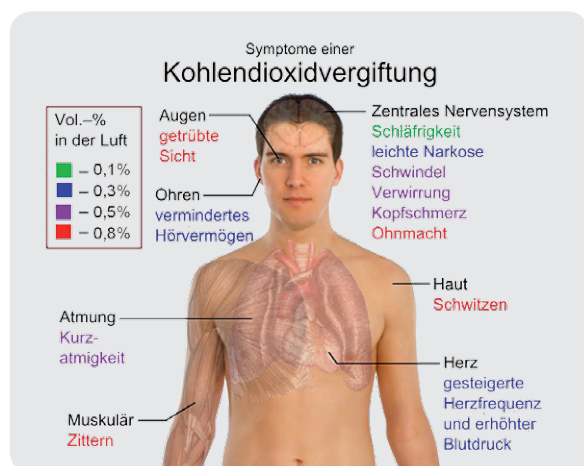
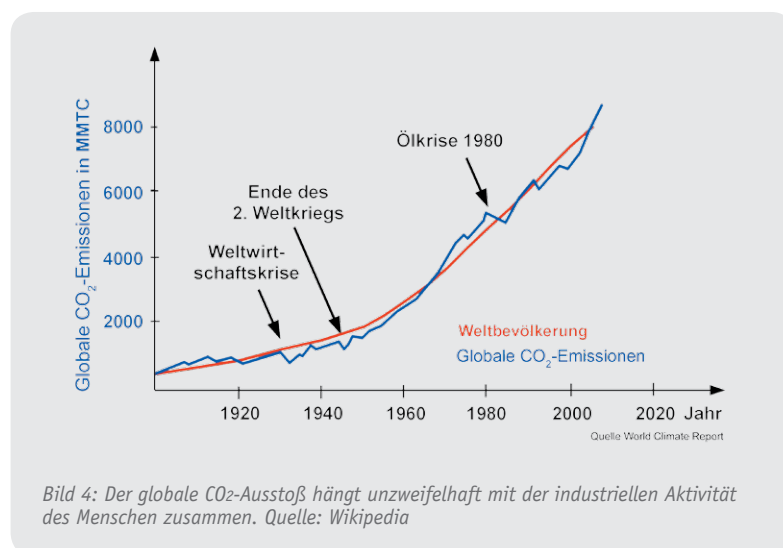


Bild 5: Ab einer Volumenkonzentration von 1000 ppm reagiert der Mensch mit immer heftigeren Symptomen auf Kohlendioxid in der Atemluft. 10.000 ppm (1 %) und mehr sind tödlich! Quelle: Wikipedia

Weitere Luftparameter. Es gibt zahlreiche weitere Kenngrößen für die Qualität der Raumluft: Sauerstoffgehalt, Konzentrationen anderer Schadgase wie Kohlenmonoxid, Ausdünstungen von Kunststoffen, Schwebkörper ...

Wenn das Lüften durch Öffnen des Fensters keine Besserung bringt, haben wir es mit einem echten Umweltproblem zu tun. Exemplarisch war das in der zweiten Januarhälfte in vielen chinesischen Großstädten zu studieren, wo die Feinstaubbelastung der Luft bis über das vierzigfache des von der Weltgesundheitsorganisation festgelegten Grenzwerts anstieg, von den anderen Schadgasen ganz zu schweigen (Bild 6).

Auf diese Schadparameter der Luft und deren Wirkung auf Umwelt und Lebewesen im Einzelnen einzugehen, würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Eines ist jedoch sicher: Wenn die Umweltbedingungen in den betroffenen Ballungsräumen der Welt nicht signifikant verbessert werden, muss eine Lüftungs- und Klimaanlage dort zur chemischen Fabrik



mutieren, die der Luft Schadstoffe entzieht und notwendige Bestandteile wie Sauerstoff hinzufügt, um den Menschen wenigstens in geschlossenen Räumen eine atembare Luft zu bieten.

Messmethoden

Die Methoden zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit durch Thermometer und Hygrometer sind bereits ausführlich in früheren ELV-journalen (www.elvjournale.de) besprochen worden.

Zur Erinnerung: Heute werden in höherwertigen elektronischen Thermometern Platinwiderstände (meist Pt100) oder Thermistoren und in Hygrometern kapazitive Sensoren mit polymerem Dielektrikum verwendet. Hier wollen wir uns auf das Messen von CO₂-Konzentrationen beschränken.



Bild 6: Luftverschmutzung wird in vielen Ballungszentren weltweit zu einem Albtraum mit realer Gesundheitsschädigung. Quelle: Wikipedia

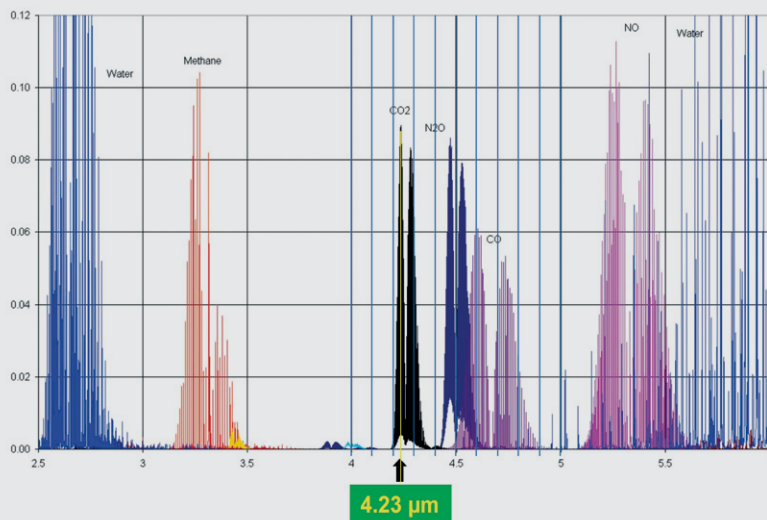


Bild 7: Infrarotes Licht gibt beim Durchlaufen eines Gases Energie an die Gasmoleküle ab. Dieser Absorptionsvorgang ist gas- und wellenlängenspezifisch, woraus ein Dämpfungsspektrum resultiert.

CO₂-Sensoren. Es gibt zahlreiche Sensortypen zum Messen der Kohlendioxidkonzentration in der Luft, z. B. elektrochemische, photoakustische und spektroskopische. Der letztgenannte Typ wird heute am häufigsten verwendet, weil er selektiv misst (d. h. nur auf CO₂ reagiert), eine lange Lebensdauer und relativ hohe Stabilität aufweist und preiswert ist.

Das Messprinzip eines spektroskopischen Sensors beruht auf der Abschwächung von Licht einer spezifischen Wellenlänge beim Durchlaufen des Probengases infolge Absorption. Bild 7 zeigt, wie verschiedene Atmosphäregase Licht in Abhängigkeit von dessen Wellenlänge dämpfen. Man erkennt, dass dieser Effekt für CO₂-Gas bei Infrarotlicht (IR-Licht) mit einer Wellenlänge von 4,23 µm besonders ausgeprägt ist und von keinen anderen Gasen verfälscht wird (man spricht auch von einer geringen Querempfindlichkeit).

Ein solches Absorptionsspektrum erhält man gemäß Gleichung 2. Dabei wird so vorgegangen: Für jede Wellenlänge λ wird die Intensität ohne Messgas (I_0) und mit Messgas (I) gemessen. Der logarithmierte Quotient aus I_0 und I ist dann die Absorption $A(\lambda)$.

$$A(\lambda) = \log \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right)$$

Gleichung 2

Nach dem Gesetz von Lambert-Beer ist die Absorption proportional zur Konzentration des zu messenden Gases gemäß Gleichung 3.

$$A(\lambda) = \log \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right) = \epsilon(\lambda) \cdot c \cdot d$$

Gleichung 3

$\epsilon(\lambda)$ wird auch Extinktionskoeffizient genannt und ist für ein gegebenes Molekül bei einer festen Wellenlänge konstant. Formelzeichen d steht für die Weglänge des Lichtstrahls und ist bei jedem Sensor konstant.

Somit ist bei einer festen Wellenlänge von 4,23 µm die CO₂-Konzentration c proportional zur Absorption A (Gleichung 4).

Gleichung 4

$$c \propto A(4,23 \mu m)$$

Zwei Schwingungsmodi eines CO₂-Moleküls

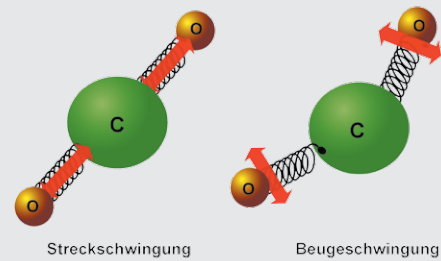
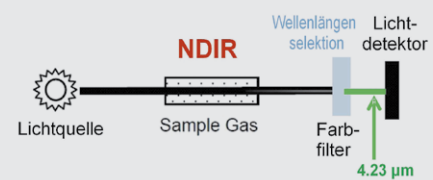


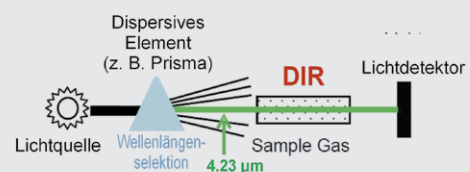
Bild 8: IR-Licht einer Wellenlänge um 4,23 µm regt CO₂-Moleküle zu verschiedenartigsten Schwingungen an und ihm wird dadurch Energie entzogen. Es wird also schwächer.

Deshalb wird in einer CO₂-Messzelle IR-Licht mit dieser spezifischen Wellenlänge 4,23 µm durch das zu messende Gas gestrahlt. Dabei werden die CO₂-Moleküle zu Schwingungen in bestimmten Modi angeregt, genauer gesagt die beiden Sauerstoffatome, die zusammen mit dem Kohlenstoffatom in einer elastischen Verbindung stehen. In Bild 8 sind nur zwei der zahlreichen Schwingungsmodi dargestellt. Unter [1] kann man sich ein Bild von der Komplexität der angeregten, IR-Energie verbrauchenden Schwingungsformen machen. Die absorbierte Lichtenergie ist wie oben beschrieben proportional zur Weglänge des Strahls durch die Probenatmosphäre und zur Konzentration des darin enthaltenen CO₂-Gases. Mit anderen Worten: Je schwächer das IR-Licht mit der CO₂-Wellenlänge 4,23 µm am Ausgang der Probenkammer ist, desto höher ist die CO₂-Konzentration in der Probenkammer.

NDIR-Sensoren. Am häufigsten sind heute sogenannte NDIR-Sensoren im Einsatz. NDIR leitet sich vom englischen „Non-Dispersive IR“ ab, was nahe legt, dass es auch DIR-Sensoren (Dispersive IR) gibt. Das ist tatsächlich der Fall, Bild 9 zeigt den Unterschied zwischen den beiden Sensortypen. Während beim NDIR-Typ eine breitbandige IR-Strahlung durch das



NDIR: Alles Licht geht durch die Probe (sample)



DIR: Nur selektiertes Licht geht durch die Probe (sample)

Bild 9: Je nachdem, ob die Selektion der Messwellenlänge vor dem Eintritt des IR-Lichts in die Gasprobe oder bei ihrem Austritt stattfindet, spricht man vom DIR- oder NDIR-Messverfahren.

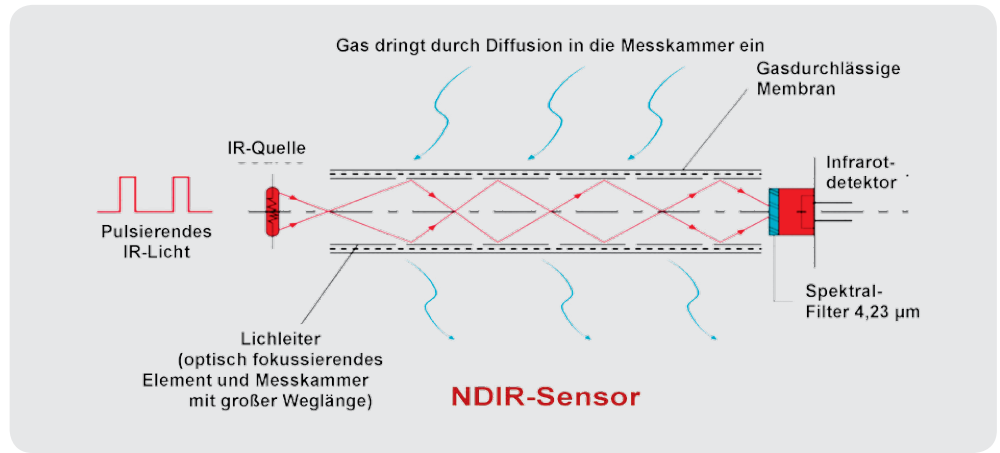


Bild 10: Eine gestreckte NDIR-Messkammer, in die gepulstes IR-Licht eingestrahlt wird. Je länger der Weg durch das Gas, umso stärker seine Dämpfung.

Sample-Gas geschickt und erst nach dessen Austritt die vom Gas geschwächte Wellenlängenkomponente ausgefiltert wird, findet beim DIR-Typ die Ausfilterung der dämpfungsspezifischen Wellenlänge vor dem Lichteintritt in die Messkammer statt.

Bild 10 zeigt eine gestreckte Messkammer, durch deren gasdurchlässige Umwandung die zu messende Atmosphäre in das Innere eindringt. Hier wird sie von gepulstem IR-Licht durchquert, das am Ausgang gefiltert und von einem IR-Detektor gemessen wird. Der Vergleich der Intensitäten am Eingang und am Ausgang der Messkammer lässt nun Rückschlüsse auf die CO₂-Konzentration zu.

Es ist unmittelbar einleuchtend, dass der IR-Strahl umso stärker geschwächt wird, je länger sein Weg durch das Probengas ist. Mit langen Strahlengängen lassen sich somit auch geringe CO₂-Konzentrationen messen. Das führt bei gestreckten Messkammern, wie sie Bild 10 zeigt, aber zu unhandlichen Messgeräten. Einen Ausweg bieten Messkammern, deren reflektierende Wände so geformt sind, dass der Mess-Strahl zwischen IR-Quelle und IR-Detektor mehrfach durch das Probengas gespiegelt wird (Multipath-Sensor). Bild 11 zeigt den Strahlengang eines Sensors der schwedischen Firma SenseAir, der trotz geringer Außenabmessungen von 2,5 x 5 cm eine Mess-Strahlänge von 12,5 cm und damit eine hohe CO₂-Empfindlichkeit aufweist.

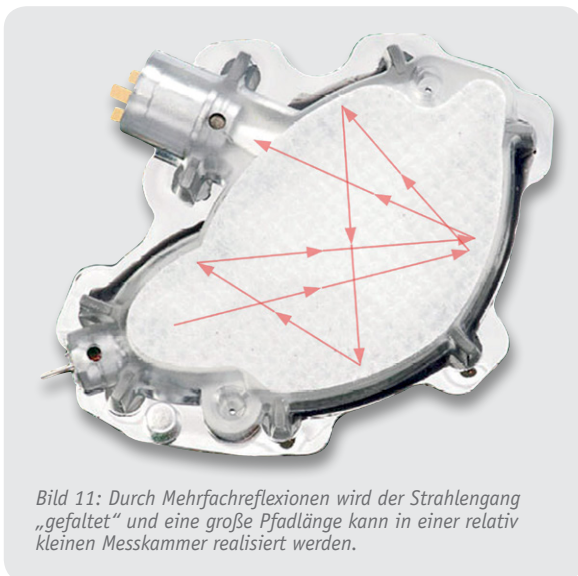


Bild 11: Durch Mehrfachreflexionen wird der Strahlengang „gefaltet“ und eine große Pfadlänge kann in einer relativ kleinen Messkammer realisiert werden.

Luftdruckabhängigkeit. Wie bereits ausgeführt, beruhen Absorptionsmessverfahren auf der Messung der Molekdichte des Messgases in der Probenkammer, also auf der Anzahl der Moleküle des zu messenden Gases in einem bestimmten Volumen. Diese Moleküldichte ist wiederum abhängig von den Werten von Luftdruck und Temperatur, bei denen die Messung stattfindet.

Steigende Temperaturen und abnehmender Luftdruck führen zu einer Ausdehnung der Atmosphärenprobe und damit zu einer geringeren CO₂-Molekdichte und damit einhergehend zu einer schwächeren CO₂-Absorption. Weil die Atmosphäre aber ein Gemisch verschiedener Gase ist, geht deren jeweilige Molekdichte ebenfalls zurück. An der Proportionalität der CO₂-Moleküle zu den anderen Gasmolekülen in der Messkammer ändert sich deshalb nichts, wohl aber am vom Sensor gemessenen Wert! Die druck- und temperaturbedingte Veränderung der Absorption muss deshalb kompensiert, d. h. wieder auf den gleichen ppm-Wert zurückgeführt werden. Die entsprechende Beziehung (Gleichung 5) lässt sich aus dem „Idealen Gasgesetz“ ableiten.

$$\frac{c_{\text{kor}}(p, T)}{\text{ppm}} = \frac{c_{\text{mess}}}{\text{ppm}} \cdot \frac{1013,25 \cdot \left(\frac{T}{^\circ\text{C}} + 273 \right)}{298 \cdot \frac{p}{\text{mbar}}}$$

Gleichung 5

Viele CO₂-Messgeräte erlauben deshalb die Eingabe von Luftdruck und Temperatur und kompensieren dann automatisch deren Einfluss auf das Messergebnis. Weil ein NDIR-Sensor gewöhnlich bei 25 °C und Normaldruck 1013,25 mbar kalibriert und gegebenenfalls justiert wird, liefert Gleichung 5 für diese Werte $C_{\text{kor}} = C_{\text{mess}}$.

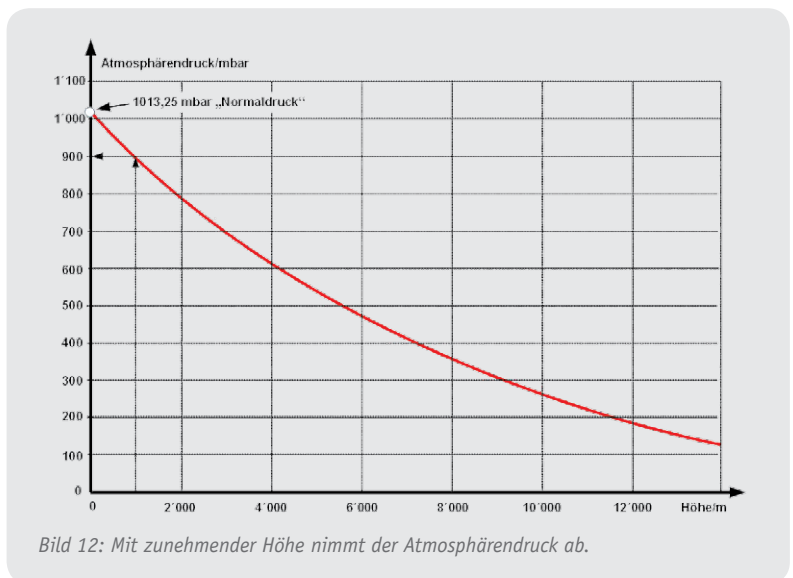
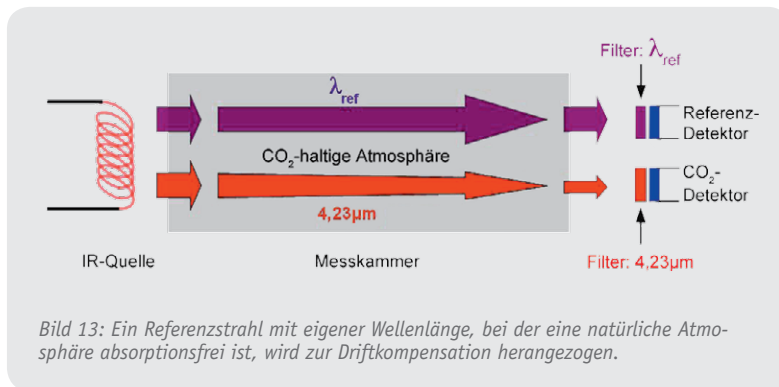


Bild 12: Mit zunehmender Höhe nimmt der Atmosphärendruck ab.



Besonders stark wirkt sich die Höhe des Einsatzortes des Messgeräts bezogen auf Meereshöhe (Höhe über Normalnull; m über NN) auf den luftdruckbedingten Messfehler eines NDIR-Sensors aus. Wie Bild 12 zeigt, fällt der Luftdruck mit wachsender Höhe über NN. In 1000 m Höhe ist der Luftdruck bereits auf ca. 900 mbar abgefallen. Das entspricht etwa 11 % des Anzeigergebnisses unter Normalbedingungen (1013,25 mbar/25 °C) und darf nicht unberücksichtigt bleiben. Idealerweise ermittelt ein CO₂-Messgerät selbstständig Temperatur und Luftdruck und rechnet deren Werte in das angezeigte CO₂-Messergebnis in ppm ein.

Drift. Ein CO₂-Sensor (wie nahezu jeder andere Sensor) unterliegt im Lauf der Zeit einer sogenannten Drift, d. h. er misst nach Ablauf einer gewissen Zeitspanne nicht mehr genau den Wert einer unveränderten Gaskonzentration wie zu Beginn dieser Zeitspanne. Dies kann mehrere Ursachen haben. So kann die Lichtleistung der IR-Quelle im Lauf der Zeit abnehmen. Das wird von dem IR-Empfänger als schwächeres Signal wahrgenommen und von der Elektronik in eine höhere CO₂-Konzentration umgerechnet. Eine zweite Driftquelle kann in einer abnehmenden Reflexivität der Wandung der Multipath-Messzelle liegen. Auch diese wird als zunehmende Gaskonzentration gedeutet. In der Wirkung verschiebt die Drift also die Messwerte des Sensors allmählich nach oben. Wenn diese über der Zeit grafisch aufgetragen werden, wandert die Messkurve (bei gleichen Messbedingungen) im Lauf von Wochen und Monaten also langsam nach oben. Dies wird im Englischen als „baseline drift“ bezeichnet und kann durch eine gelegentliche neue Justierung des Sensors oder Einbeziehung eines Referenzsensors korrigiert werden („baseline correction“).

Drift-Korrektur durch Referenzstrahl. Um eine Langzeitdrift der Messzelle auszugleichen, muss man am Ausgang der Messkammer eine Wellenlänge als Referenz ausfiltern, bei der in einer Probe der natürlichen Atmosphäre keine Dämpfung stattfindet (Referenzwellenlänge) (Bild 13). Am Ausgang wird das Referenzsignal vom CO₂-Signal abgezogen und damit eine eventuelle Drift eliminiert, weil sich diese ja in gleicher Wei-

se sowohl auf das Referenzsignal als auch auf das CO₂-Signal auswirkt. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, dass Referenz- und Mess-Sensor gleich stark driftet.

Um eine mögliche Driftdifferenz zwischen Referenz- und Mess-Sensor auszuschließen, kann man auch denselben Sensor für Referenz- und Messwellenlänge verwenden, indem man ihn abwechselnd mit entsprechend gefiltertem Licht bestrahlt. Dazu wird vor dem Mess-Sensor ein Fabry-Perot-Interferometer als umschaltbares Filter angebracht, das im Betrieb mikromechanisch ständig zwischen Referenz- und Messwellenlänge wechselt.

Driftkorrektur durch ABC. Bei Einstrahl-Sensoren besteht keine Möglichkeit, durch einen Referenzkanal Driften zu kompensieren. Dennoch gibt es ein ABC (Automatic Baseline Correction = Automatische Grundlinienkorrektur) genanntes Verfahren, welches ein manuelles Neujustieren in vielen Fällen erspart.

Anhand von Bild 14 sei ABC kurz erklärt. Es ist der typische Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Klassenzimmer alter Prägung (d. h. ohne CO₂-kontrollierte Lüftung) zu sehen, die in der Spitze 1000 ppm und deutlich mehr erreichen kann.

Dazu ein kleines Rechenbeispiel. Die ausgeatmete Luft eines Menschen enthält ca. 40.000 ppm CO₂. Über die durchschnittliche Atemleistung des Menschen errechnet sich eine CO₂-Produktion von 0,015 m³/h. Die ausgeatmete CO₂-Menge von 20 Schülern beträgt somit 0,3 m³/h. Angenommen das Klassenzimmer hat die Ausmaße 11 x 7 x 3,9 m = 300 m³, dann steigt die CO₂-Konzentration in einer Stunde um 0,3 m³/300 m³ = 0,001 = 1000 ppm. Das sind natürlich nur grobe Abschätzungen, denn die CO₂-Produktion des Menschen ist stark von seinen Aktivitäten abhängig und es wurde kein natürlicher Luftaustausch berücksichtigt.

Betrachtet man nun über eine Messperiode von 8 Tagen die CO₂-Kurve, dann stellt man fest, dass insbesondere an den Wochenenden oder nach einem ausgiebigen Lüften während der Woche die Konzentrationswerte der Außenluft (typ. 400 ppm) als Minimalwerte auftreten. Viele Langzeituntersuchungen haben diese Erfahrung gefestigt und berechtigen dazu, die während einer Messperiode erfassten Minima auf 400 ppm zu setzen und den Fühler damit neu zu justieren. Diese als Automatic Baseline Correction bezeichnete Vorgehensweise setzt natürlich regelmäßiges, restloses Durchlüften während der Messperiode oder Zeitabschnitte ohne Belegung des Raums durch Menschen (im Beispiel die Wochenenden) voraus, in denen der CO₂-Pegel auch ohne explizites Lüften auf den Außenluftwert absinken kann. Ist das nicht gegeben, darf ABC nicht angewendet werden, weil sich sonst die Baseline sukzessive nach oben verschieben würde.

Raumlufttechnische Maßnahmen

Der Messwert eines CO₂-Sensors kann als Steuerkriterium für eine Maßnahme zur Verbesserung der Raumluft herangezogen werden.

Optisch/akustischer Warnhinweis (Alarm). In diesem einfachsten Fall wird durch ein Alarmsignal bei

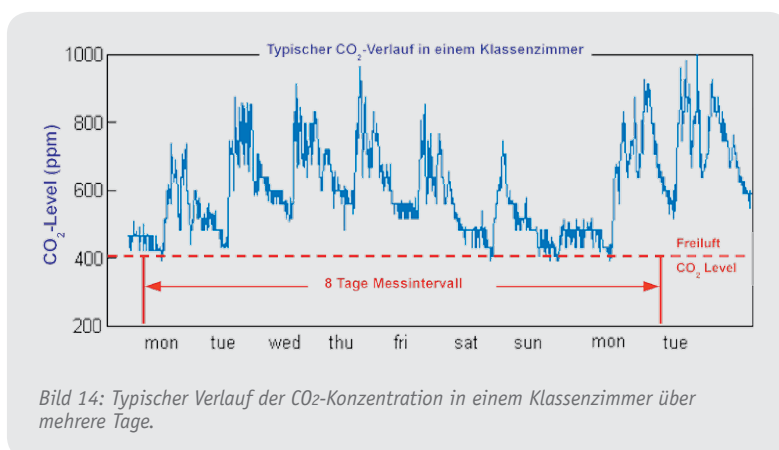




Bild 15: Ideal für die preiswerte Bewertung der „Indoor Air Quality“: CL11 von Rotronic für Temperatur, relative Luftfeuchte und CO₂ mit Aufzeichnungsfunktion.

Number	Date	Time	Humidity %rh	Temperature °C	CO2 PPM	Temp (Ext) °C
1	11.01.2013	16:09:47	44.80	17.06	635	...
2	11.01.2013	17:09:02	29.90	22.94	628	...
3	11.01.2013	17:10:02	29.50	23.06	629	...
4	11.01.2013	17:11:02	29.90	23.06	631	...
5	11.01.2013	17:12:02	29.30	23.06	629	...
6	11.01.2013	17:13:02	29.20	23.06	628	...
7	11.01.2013	17:14:02	29.90	23.11	631	...
8	11.01.2013	17:15:02	30.00	23.22	640	...
9	11.01.2013	17:16:02	29.60	23.44	5925	...
10	11.01.2013	17:17:02	29.10	23.44	2893	...
11	11.01.2013	17:18:02	28.90	23.39	1530	...
12	11.01.2013	17:19:02	29.80	23.44	...	...
13	11.01.2013	17:20:02	29.00	23.39	...	...
14	11.01.2013	17:21:02	29.00	23.33	4746	...
15	11.01.2013	17:22:02	29.10	23.28	2520	...
16	11.01.2013	17:23:02	29.20	23.28	1560	...
17	11.01.2013	17:24:02	29.20	23.22	1082	...
18	11.01.2013	17:25:02	29.20	23.22	852	...
19	11.01.2013	17:26:02	29.20	23.22	752	...
20	11.01.2013	17:27:02	29.30	23.17	715	...
21	11.01.2013	17:28:02	29.40	23.17	689	...

Bild 16: Die CL11-Messergebnisse in Tabellenform mit Datums- und Zeitstempel

Überschreiten eines Schwellenpegels (z. B. 1000 ppm) auf die Notwendigkeit einer Lüftung hingewiesen. Die im Raum befindlichen Personen müssen sich dann selbst um eine Verbesserung der Raumluftsituation kümmern. In der Regel wird durch Stoßlüften der CO₂-Gehalt wieder auf Normalwerte zurückgeführt und in der kalten Jahreszeit der Energieverlust durch Abkühlen in Grenzen gehalten. Der technische Aufwand beschränkt sich also auf das Anbringen eines entsprechenden Messgeräts.

Ein preiswertes Beispiel zeigt Bild 15. Es handelt sich um CL11, ein Multifunktionsmessgerät des Schweizer Herstellers Rotronic [2], welches gleichzeitig CO₂, Feuchte und Temperatur misst und aufzeichnet. Eine

extern anschließbare Temperatursonde erlaubt außerdem, beispielsweise die Außentemperatur zu erfassen.

In der Aufzeichnungsbetriebsart (Logging Mode) speichert das Gerät alle Messwerte (Tint, Text, %rh, CO₂) in wählbaren Intervallen zusammen mit dem Zeitpunkt ihres Auftretens. Liest man die maximal möglichen 40.000 Messwertkombinationen mit der mitgelieferten Software über die USB-Geräteschnittstelle aus, erhält man eine Messwerttabelle (Bild 16) und eine

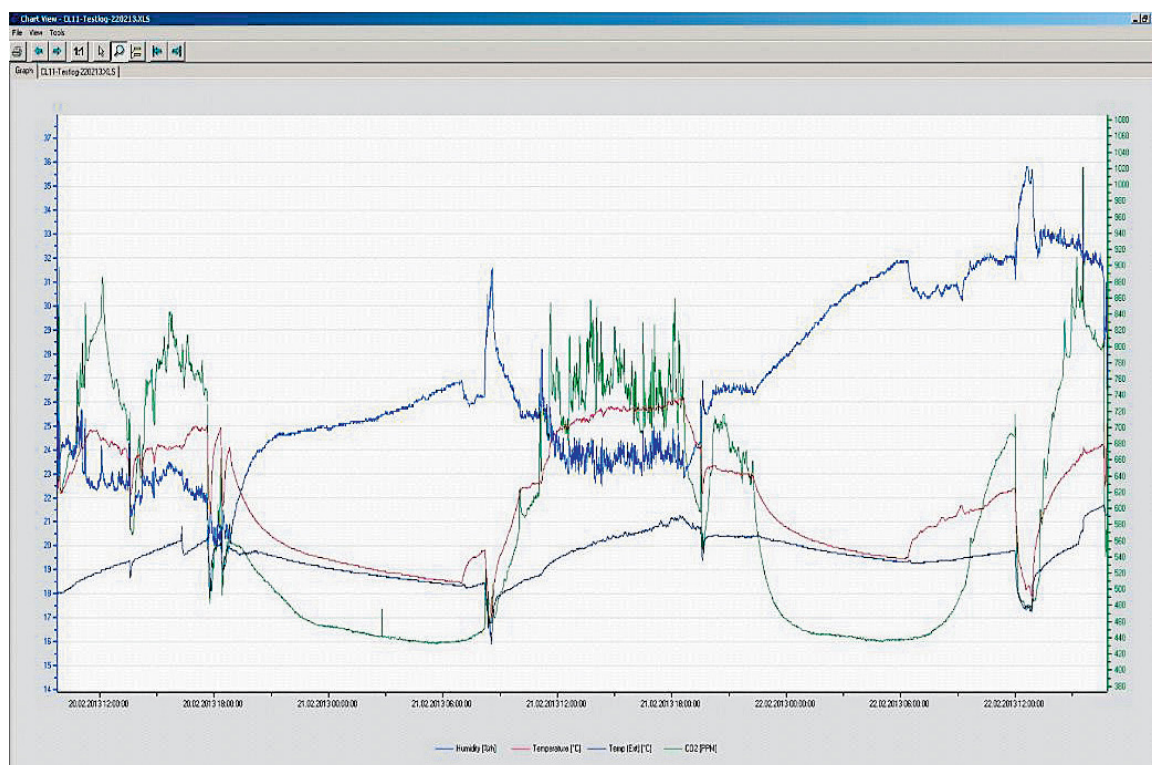


Bild 17: Ein Bild sagt mehr als tausend Worte: CL11-Messergebnisse in grafischer Form.

daraus abgeleitete Grafik (Bild 17), die einen leichten Überblick über den zeitlichen Verlauf der Messgrößen vermittelt.

Intermittierende Ansteuerung eines Lüfters. Da es sich hier um eine selbsttätige mechanische Lüftung und Klimatisierung handelt, ist dafür die Europäische Norm EN 13779 zuständig [3]. Sie regelt die Lüftung von Nichtwohngebäuden und vermittelt die allgemeinen Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme mit dem Zweck der Sicherstellung einer hohen Raumluftqualität.

Wenn das CO₂-Messgerät über einen Schaltkontakt verfügt, der beim Überschreiten der Alarmschwelle aktiviert wird, lässt sich damit ein Lüfter einschalten oder ein Fenster kippen, um durch Austausch der verbrauchten Innenluft gegen frische Außenluft die IAQ (Indoor Air Quality) zu steigern. Beim Unterschreiten der Alarmschwelle wird der Lüfter dann wieder ausgeschaltet und das Fenster geschlossen. Die Effizienz der Lüfterlösung wird bei niedrigen Außentemperaturen gesteigert, indem die abgesaugte warme Innenluft über einen Wärmetauscher die kalte Außenluft vor dem Einbringen vorwärmt.

Stetige Ansteuerung eines Lüfters. Auch hier gilt die EN 13779. Für diesen Fall muss das CO₂-Messgerät ein elektrisches Signal abgeben, dessen Höhe proportional zur CO₂-Konzentration ist. Zum Beispiel könnte das CO₂-Intervall 400...5000 ppm in eine Spannung

zwischen 0 und 10 V_{DC} oder in einen Strom von 4 bis 20 mA (Stromschleife) umgesetzt und zur Steuerung an die Lüftungsanlage übermittelt werden. Diese kann nun die Lüfterdrehzahl proportional zum Messwert einstellen und die Luftwechselrate an die Besetzung des Raums durch Personen (Okkupation) anpassen.

Ein Beispiel für ein Gerät mit den oben genannten Steuersignalen, das in der Klimazone in einer EU-Aufbaudose montiert wird, ist die Rotronic-Type CF3-W-EU-Disp (Bild 18).

CO₂-Messungen in Produktionsbetrieben

Wie früher in diesem Artikel bereits erwähnt, geht von Kohlendioxid in hoher Konzentration (>8000 ppm) eine akute Lebensgefahr aus. Ab ca. 10.000 ppm tritt kurzfristig der Tod ein. Das Heimtückische an CO₂-Gas ist, dass es nicht zu sehen und zu riechen ist. Zudem hat es ein größeres Gewicht als Luft. Das kann zu Ansammlungen in tiefer gelegenen Gebäudeteilen führen, die dann beim Betreten zur tödlichen Falle werden.

Erst vor Kurzem sind innerhalb von 10 Monaten in einer Brauerei jeweils der Seniorchef und sein Braumeister bei der Inspektion eines Gärtanks zu Tode gekommen. Kurz nach dem Einstieg verloren sie das Bewusstsein und konnten sich nicht mehr ins Freie retten. Weil nur wenige Atemzüge genügen, ist auch das Hineinbeugen in eine Atmosphäre mit hoher CO₂-Konzentration extrem gefährlich. Eine Freimessung mit einem CO₂-Messgerät mit Lanzenfühler hätte diese Tragödie sicher verhindert (Bild 19).

Deshalb ist in der Getränkeindustrie, Gastkellern, Brauereien, Weinlagerkellern etc. die permanente Überwachung der Luft auf CO₂ durch ein geeignetes Messgerät vorgeschrieben. Dieses muss regelmäßig gewartet werden und das in den kontrollierten Bereichen arbeitende Personal ist natürlich in die Bedienung und Interpretation der Anzeigewerte einzuweisen.

Die Arbeits-Sicherheits-Information „CO₂ in der Getränkeindustrie“ der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) führt in die Erstellung einer tätigkeitsbezogenen Gefährdungsbeurteilung ein. Sie ist Anfang November 2012 in komplett überarbeiteter Fassung erschienen [4].



Bild 18: Ein CO₂-Wandfühler mit analogem Messausgang zur Steuerung lüftungstechnischer Maßnahmen



Bild 19: CO₂ in hohen Konzentrationen ist absolut tödlich! Kessel, in denen natürliche Gärprozesse stattfinden, dürfen daher nicht ohne vorherige CO₂-Kontrolle betreten werden.



Bild 20: Aus dem Deckenauslass einer Lüftungsanlage sollte eigentlich CO₂-arme Luft mit etwa 400 ppm kommen ... Mit dem Rotronic Handmessgerät CP11 kann man schnell nachweisen, ob hier alles in Ordnung ist.

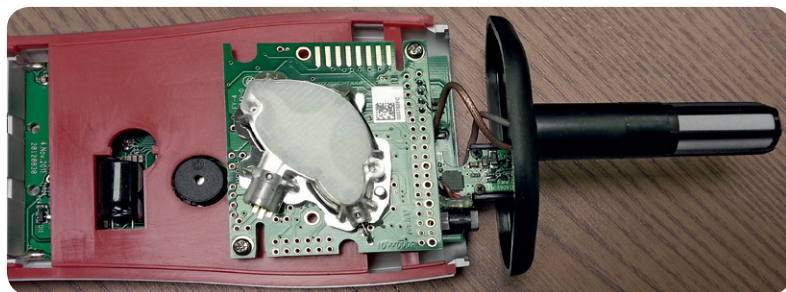


Bild 21: Gedrängte Technik im CP11: Vorne ist der Multipath-CO₂-Sensor zu sehen.

Mobile Messgeräte. Für Gebäudetechniker, Hausmeister, Aufsichtsbehörden, Mitarbeiter in der Getränkeindustrie, Gastronomie usw. ist ein mobiles Messgerät praktisch, mit dem vor Ort schnell und unkompliziert eine Bestandsaufnahme der herrschenden klimatischen Bedingungen vorgenommen werden kann.

Ein Beispiel zeigt Bild 20. Hier wurde mit dem Rotronic-Handmessgerät CP11 um die Mittagszeit in einem klimatisierten Büro der CO₂-Gehalt der eingeblasenen Luft an einer Auslassöffnung der Klimaanlage eines fensterlosen Büros gemessen. Der bedenklich hohe Wert von 1247 ppm weist darauf hin, dass CO₂ offensichtlich kein von dem Errichter dieser „Air Conditioning“ beachtetes Kriterium war. Vielmehr zirkuliert hier die verbrauchte Innenraumlufte und wird dabei nur auf die thermostatisch vorgewählte Temperatur gebracht. Von Frischluftbeimengung keine Spur!

CP11 vereint hochpräzise Messelektronik für Feuchte, Temperatur und Kohlendioxid sowie eine Echtzeituhr mit einem 16.000-Punkte-Datenlogger. Dazu kann es noch aus Temperatur und relativer Feuchte der Luft die Taupunkttemperatur (DP: Dew Point) und die Feuchtkugeltemperatur (WBT: Wet Bulb Temperature) errechnen und anzeigen. Der Multipath-CO₂-Sensor ist auf der quadratischen Platine zu sehen (Bild 21). In der Spitze des Messkopfs sind Temperatur- und Feuchtefühler untergebracht (Bild 22).

CO₂-optimierte Lüftung als Energiesparer

Nach Schätzungen des UN Climate Panels werden 50 bis 60 % des weltweiten Energiebedarfs in Gebäuden verbraucht. Allein die Beachtung einer Direktive der EU für Energieeffiziente Gebäude könnte zu einer jährlichen Verringerung der CO₂-Emissionen um 30 bis 45 Megatonnen führen. Weil aber HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning) etwa 40 bis 65 % des Gebäudeenergieverbrauchs ausmacht, besteht die Herausforderung darin, unter allen Randbedingungen ein optimales Gleichgewicht zwischen gesundem Komfort und sparsamem Energieeinsatz zu finden. CO₂-kontrollierte bedarfsgerechte Lüftung (DCV: Demand-controlled Ventilation) ist dafür eine wichtige Antwort. DCV erzielt in Gebäuden mit schwer vorhersehbarer und stark schwankender Personenbelegung (die ja die Hauptquelle für CO₂ in der Innenluft ist) ihre größte Wirkung. Wegen der Energieeffizienz moderner Gebäude und deren Luftdichtigkeit gibt es keine Alternative zur intelligenten Lüftung.

In einer lesenswerten Zusammenfassung der Grundlagen und Vorteile bedarfsgerechter Lüftung der Firma Sauter [5] wird erklärt, dass die Amortisationszeiten

Bild 22: Im Fühlergehäuse des CP11 sind ein kapazitiver Polymer-Feuchtesensor (links) und ein Thermistor (rechts) zur Temperaturmessung untergebracht.



mit zunehmender Anlagengröße (gemessen am Luftvolumenstrom) abnehmen (Bild 23). Das hängt damit zusammen, dass bei großen Anlagen der zugeführte Luftvolumenstrom bei unveränderter Behaglichkeit besonders stark reduziert werden kann.

So ist die bedarfsgerechte optimierte Gebäudelüftung unter Beachtung des IAQ-Parameters CO₂ ein wichtiger Baustein auf dem Weg zum umfassenden Energie- und Gebäudemanagement für die „Smart Cities“ der Zukunft. **ELV**

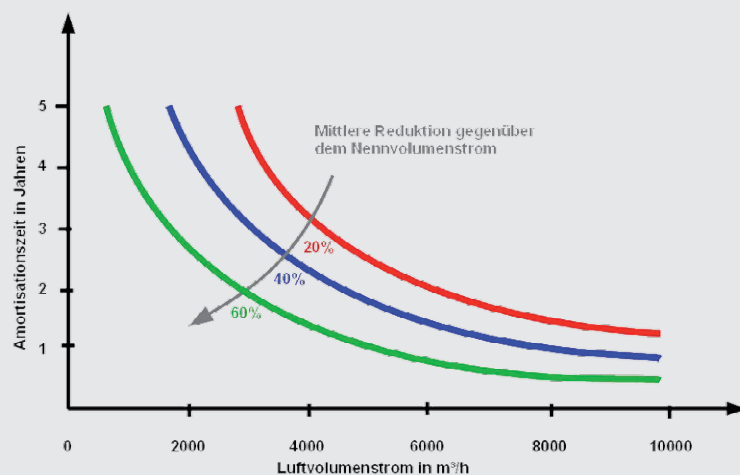


Bild 23: Die Potentiale zur Energieeinsparung und die damit verbundene Reduzierung des CO₂-Ausstoßes durch CO₂-kontrollierte Lüftung sind gewaltig und die Amortisationszeiten einer derartigen Technik erstaunlich kurz.



Weitere Infos:

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotspektroskopie>
- [2] www.rotronic.ch
- [3] http://de.wikipedia.org/wiki/EN_13779
- [4] http://vorschriften.portal.bgn.de/9427?wc_cmt=b2238a16c0a4f0f28dc59f278f0d67c1
- [5] www.sauter-cumulus.de/de/kernkompetenz/kundenspezifische-oem-loesungen/raumluftqualitaet/was-ist-raumluftqualitaet.html#c4864