

## Wie misst man Kohlendioxid?

*Kohlendioxidmessungen werden in vielen Anwendungen benötigt: von Gebäudeautomation über Gewächshäuser und Life-Science bis hin zur Sicherheit.*

*In diesem Dokument werden die folgenden Themen behandelt:*

- Funktionsprinzip von Infrarot-CO<sub>2</sub>-Sensoren
- Ideale Gasgleichung und wie sie verwendet wird, um Umgebungsfaktoren bei der CO<sub>2</sub>-Messung auszugleichen
- Optimale Montagepositionen für CO<sub>2</sub>-Messwertgeber
- Mit CO<sub>2</sub> verbundene Sicherheitsprobleme



## Funktionsprinzip von Infrarotsensoren

Kohlendioxid und andere Gase, die aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Atomen bestehen, absorbieren Infrarotstrahlung (IR) auf charakteristische und einzigartige Weise. Diese Gase sind mit IR-Geräten nachweisbar. Wasserdampf, Methan, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid sind Gase, die mit einem IR-Sensor gemessen werden können. Ihre charakteristischen Absorptionsbanden werden in

Abb. 1 gezeigt.

IR-Messung ist die gängige Technologie für CO<sub>2</sub>-Nachweise. IR-Sensoren haben gegenüber chemischen Sensoren viele Vorteile. Sie sind stabil und in hohem Maße selektiv gegenüber dem gemessenen Gas. Sie haben eine lange Lebensdauer und da das gemessene Gas mit dem Sensor nicht direkt interagiert, sind IR-Sensoren widerstandsfähig gegen hohe Feuchte, Staub, Schmutz und sonstig raue Bedingungen.

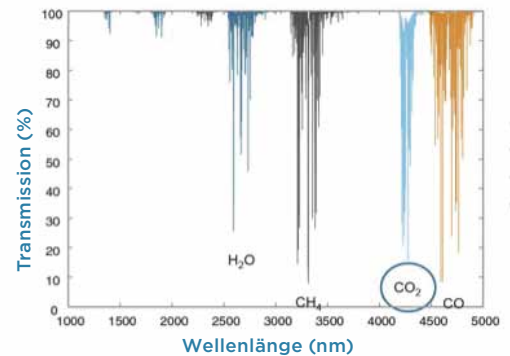


Abb. 1. IR-Absorption von CO<sub>2</sub> und einigen anderen Gasen.

### Optimale Montagepositionen für CO<sub>2</sub>-Messwertgeber

- Vermeiden Sie Positionen, wo Personen direkt auf den Sensor atmen könnten. Positionieren Sie den Fühler auch nicht zu nah an Einlass- bzw. Auslassrohren oder in der Nähe von Türen bzw. Fenstern.
- Raumfühler liefern einer bedarfsgeregelten Lüftung genauere Daten zur Belüftungseffektivität als in Kanälen installierte Fühler. Kanalfühler eignen sich für Einzelbereichssysteme und sollten so nahe wie möglich an Räumen mit Personen und zu Wartungszwecken leicht zugänglich angeordnet werden.
- Bei der CO<sub>2</sub>-Messung für die Personensicherheit sollten die Fühler in der Nähe potenzieller Leckstellen installiert werden, um eine Früherkennung zu gewährleisten. Die Geometrie, Belüftung und Luftströmung des überwachten Raums sollten dabei berücksichtigt werden. Die Anzahl und Position der CO<sub>2</sub>-Fühler sollte auf einer Risikoanalyse beruhen.

Die Hauptkomponenten eines IR-CO<sub>2</sub>-Fühlers sind Lichtquelle, Messkammer, Interferenzfilter und IR-Sensor. IR-Strahlung wird von der Lichtquelle durch das gemessene Gas zum Sensor geleitet. Ein an der Vorderseite angebrachter Filter sorgt dafür, dass alle anderen Wellenlängen als die des gemessenen Gases den Detektor nicht erreichen können. Die Lichtintensität wird ermittelt und in einen Gaskonzentrationswert konvertiert.

Der Vaisala CARBOCAP™-Kohlendioxidssensor misst die Volumenkonzentration des CO<sub>2</sub> mithilfe von IR-Messtechnologie. Er ist mit einem einzigartigen elektrisch abstimmbaren Fabry-Perot-Interferometer (FDI) ausgestattet, um anhand von Bifrequenzmessungen zu filtern. Dies bedeutet, dass der CARBOCAP-Sensor neben der CO<sub>2</sub>-Absorptionsmessung auch eine Referenzmessung durchführt, die alle Änderungen der Lichtquellenintensität sowie Verunreinigungen ausgleicht. Hierdurch ist der Sensor langfristig besonders beständig. Eine vollständige Übersicht über die Vaisala-Produkte für CO<sub>2</sub>-Messungen finden Sie unter [www.vaisala.de/kohlendioxid](http://www.vaisala.de/kohlendioxid)

## Die allgemeine Gasgleichung

Die ideale Gasgleichung ist nützlich, wenn es darum geht, die Auswirkung von Temperatur- und Druckänderungen auf CO<sub>2</sub>-Messungen abzuschätzen. Mit ihr können die CO<sub>2</sub>-Messergebnisse kompensiert werden.

Das ideale Gas ist ein hypothetisches Gas, das aus sich wahllos bewegenden identischen Punktpartikeln besteht, die vernachlässigbare Größen und intermolekulare Kräfte aufweisen. Es gilt dabei die Annahme, dass die idealen Gasmoleküle sich

untereinander und an der Wand des Behälters elastisch abstoßen.

In der Praxis verhalten sich Gase nicht exakt dieser Modellannahme entsprechend. Sie ist jedoch häufig ausreichend, um reale Gase zu beschreiben. Die ideale Gasgleichung gibt die Abhängigkeit der Zustandsgrößen Druck, Volumen und Temperatur einer bestimmten Menge dieses Gases wie folgt an:

$$pV = nRT$$

mit

$p$  = Druck [Pa]

$V$  = Gasvolumen [m<sup>3</sup>]

$n$  = Gasmenge [mol]

$R$  = universelle Gaskonstante  
(= 8.3145 J/mol K)

$T$  = Temperatur [K]

## Auswirkung von Temperatur und Druck auf die CO<sub>2</sub>-Messung

Die meisten Gassensoren erzeugen Signale, die der molekularen Dichte (Moleküle/Gasvolumen) entsprechen, auch wenn die Werte als ppm (Volumen/Volumen) angezeigt werden. Bei einer Veränderung

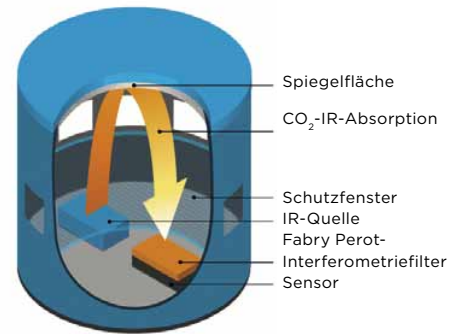
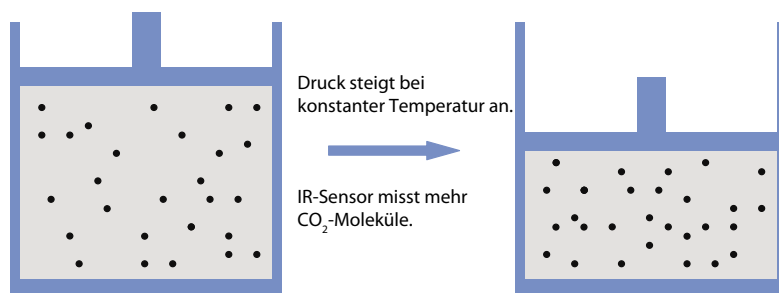


Abb. 2. Der Aufbau des Vaisala CARBOCAP-CO<sub>2</sub>-Sensors.

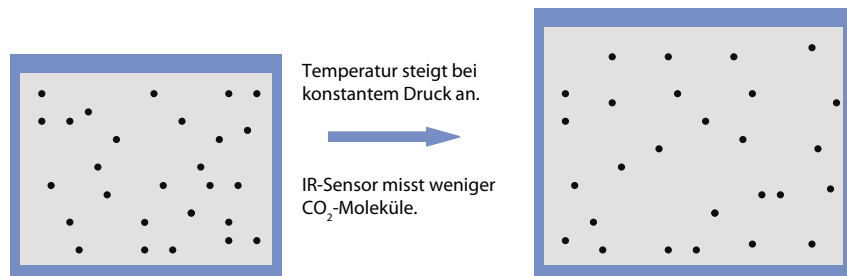
von Druck und/oder Temperatur verändert sich nach der allgemeinen Gasgleichung die molekulare Dichte des Gases. Dieser Effekt wird durch die ppm-Messung des Fühlers ersichtlich.

In den folgenden Abbildungen wird gezeigt, wie ein Anstieg der Temperatur oder des Drucks den Zustand des Gases verändert und wie er sich auf die CO<sub>2</sub>-Messung auswirkt.

### Druckanstieg bei konstanter Temperatur



### Temperaturanstieg bei konstantem Druck



Mit der allgemeinen Gasgleichung kann die molekulare Dichte eines Gases bei gegebenen Temperatur- und Druckwerten errechnet werden, wenn die Dichte für Temperatur und Druck unter Normalbedingungen (SATP) bekannt ist. Durch Ersetzen der Gasmenge (n) durch pV/M und unter der Annahme, dass die molare Masse M unter den beiden verschiedenen Bedingungen konstant ist, lässt sich die Gleichung wie in Gleichung 1 darstellen:

$$\rho(t, p) = \rho(25^{\circ}\text{C}, 1013\text{hPa}) \times \frac{p}{1013} \times \frac{298}{(273 + t)}$$

mit

- $\rho$  = Gasvolumenkonzentration [ppm oder %]
- $p$  = Umgebungsdruck [hPa]
- $t$  = Umgebungstemperatur [°C]

Formel 1. Berechnung der Gaskonzentration bei gegebener Temperatur und Druck.

Anhand der Dichteformel kann geschätzt werden, wie sehr sich die Messwerte bei Temperatur- und/oder Druckschwankungen verändern.

Mit der Dichteformel können bei der CO<sub>2</sub>-Messung die Temperatur- und Druckabweichungen kompensiert werden. Die meisten CO<sub>2</sub>-Fühler messen den Druck nicht und können daher auch Druckabweichungen nicht automatisch kompensieren. Beim Kalibrieren im Herstellerbetrieb werden die Geräte gewöhnlich auf die Druckbedingungen auf Meereshöhe (1013 hPa) eingestellt. Für Messungen auf anderen Höhen wird empfohlen, eine Druckkompensation vorzunehmen. Hierbei wird entweder der korrekte Druck für die interne Kompensation eingegeben (konstanter Druck) oder die Kompensation in ein Automationssystem bzw. einen PC einprogrammiert (veränderter Druck).

Dieselben Kompensationsregeln gelten für die Temperatur. Allerdings sind immer mehr CO<sub>2</sub>-Messgeräte auf dem Markt, die

sowohl die Temperatur messen als auch für eine Kompensation der Temperaturschwankungen sorgen, weshalb eine externe Kompensation nicht mehr erforderlich ist.

Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für die Änderungen der CO<sub>2</sub>-Messwerte (Gas enthält 1.000 ppm CO<sub>2</sub> bei SATP) bei veränderter Temperatur/Druck, gemäß der allgemeinen Gasgleichung.

### Trocknen feuchter Gasproben

Stellt man die allgemeine Gasgleichung etwas weiter um, wird klarer was passiert, wenn sich Druck, Temperatur und Volumen in der Zusammensetzung eines Gasgemischs verändern. Damit kann man bspw. die Auswirkung einer sich ändernden Feuchte auf die CO<sub>2</sub>-Messung ermitteln.

Alle Moleküle eines Gasgemischs nehmen bei der gleichen Temperatur den gleichen Raum im System ein (V ist für alle Gase gleich). Die allgemeine

Gasgleichung lässt sich umstellen nach:

$$p = (n_{\text{gas1}} + n_{\text{gas2}} + n_{\text{gas3}} + \dots n_{\text{gasn}}) \times \frac{RT}{V}$$

mit

- $n_{\text{gas1}}$  = Menge des Gases 1 [mol]
- $n_{\text{gas2}}$  = Menge des Gases 2 [mol], usw.
- und

$$p = p_{\text{gas1}} + p_{\text{gas2}} + p_{\text{gas3}} + \dots p_{\text{gasn}}$$

mit

- $p$  = Gesamtdruck des Gas-Gemischs
- $p_{\text{gas1}}$  = Partialdruck des Gases 1
- $p_{\text{gas2}}$  = Partialdruck des Gases 2 usw.

Die zweite Gleichung ist als das Daltonsche Gesetz der Partialdrücke bekannt. Es besagt, dass in einem Gasgemisch der Gesamtgasdruck die Summe der Partialdrücke der einzelnen Gaskomponenten ist.

Diese Information ist nützlich, wenn man den Einfluss von Wasserdampf auf die Anzeige eines CO<sub>2</sub>-Sensors berücksichtigt. Setzt man beispielsweise einem trockenen Gas bei konstantem Druck, Temperatur und Volumen noch Wasserdampf zu, verdrängt das Wasser einige der anderen Gasmoleküle im Gemisch. Ähnlich verhält es sich, wenn man eine Gasprobe aus einer Hochfeuchte-Umgebung entnimmt und diese vor dem Eintritt in die Messkammer eines CO<sub>2</sub>-Messgeräts trocknen lässt. Der Verlust an Wassermolekülen verändert dann die Zusammensetzung des Gases und wirkt sich somit auf die CO<sub>2</sub>-Messung aus.

|             |      | Temperatur (°C) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             |      | -20             | -10  | 0    | 10   | 20   | 25   | 30   | 40   | 50   | 60   |
| Druck (hPa) | 700  | 814             | 783  | 754  | 728  | 703  | 691  | 680  | 658  | 638  | 618  |
|             | 800  | 930             | 895  | 862  | 832  | 803  | 790  | 777  | 752  | 729  | 707  |
|             | 900  | 1046            | 1007 | 970  | 936  | 904  | 888  | 874  | 846  | 820  | 795  |
|             | 1000 | 1163            | 1119 | 1078 | 1039 | 1004 | 987  | 971  | 940  | 911  | 883  |
|             | 1013 | 1178            | 1133 | 1092 | 1053 | 1017 | 1000 | 983  | 952  | 923  | 895  |
|             | 1100 | 1279            | 1230 | 1185 | 1143 | 1104 | 1086 | 1068 | 1034 | 1002 | 972  |
|             | 1200 | 1395            | 1342 | 1293 | 1247 | 1205 | 1185 | 1165 | 1128 | 1093 | 1060 |
|             | 1300 | 1512            | 1454 | 1401 | 1351 | 1305 | 1283 | 1262 | 1222 | 1184 | 1148 |

Tabelle 1. Die Messwerte eines CO<sub>2</sub>-Sensors bei einer Gaskonzentration von 1.000 ppm unter verschiedenen Temperatur- und Druckbedingungen.

Dieser sogenannte Dilutionseffekt kann mit Tabelle 2 ermittelt werden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Hochfeuchteumgebung kann berechnet werden, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration des trockenen Gases bekannt ist. Hierfür müssen der Taupunkt (Td bei 1013 hPa) oder die Wasserkonzentration (ppm) des feuchten und trockenen Zustands bekannt sein. Die Feuchte der Hochfeuchteumgebung wird an der horizontalen Achse und die des trockenen Gases an der vertikalen Achse abgelesen.

| T <sub>d</sub> (°C) | T <sub>d</sub> (°C)  | -40    | -30    | -20   | -10   | 0     | 10     | 20     | 30     | 40     | 50      | 60      |
|---------------------|----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| T <sub>d</sub> (°C) | ppm H <sub>2</sub> O | 127    | 377    | 1 020 | 2 580 | 6 060 | 12 200 | 23 200 | 42 000 | 73 000 | 122 000 | 197 000 |
| -60                 | 11                   | 0.9999 | 0.9996 | 0.999 | 0.997 | 0.994 | 0.988  | 0.977  | 0.958  | 0.927  | 0.878   | 0.803   |
| -50                 | 39                   | 0.9999 | 0.9997 | 0.999 | 0.997 | 0.994 | 0.988  | 0.977  | 0.958  | 0.927  | 0.878   | 0.803   |
| -40                 | 127                  | 1.0000 | 0.9997 | 0.999 | 0.998 | 0.994 | 0.988  | 0.977  | 0.958  | 0.927  | 0.878   | 0.803   |
| -30                 | 377                  |        | 1.0000 | 0.999 | 0.998 | 0.994 | 0.988  | 0.977  | 0.958  | 0.927  | 0.878   | 0.803   |
| -20                 | 1 020                |        |        | 1.000 | 0.998 | 0.995 | 0.989  | 0.978  | 0.959  | 0.928  | 0.879   | 0.804   |
| -10                 | 2 580                |        |        |       | 1.000 | 0.997 | 0.990  | 0.979  | 0.961  | 0.930  | 0.880   | 0.805   |
| 0                   | 6 060                |        |        |       |       | 1.000 | 0.994  | 0.983  | 0.964  | 0.933  | 0.884   | 0.809   |
| 10                  | 12 200               |        |        |       |       |       | 1.000  | 0.989  | 0.970  | 0.939  | 0.890   | 0.815   |
| 20                  | 23 200               |        |        |       |       |       |        | 1.000  | 0.981  | 0.950  | 0.901   | 0.826   |
| 30                  | 42 000               |        |        |       |       |       |        |        | 1.000  | 0.969  | 0.920   | 0.845   |
| 40                  | 73 000               |        |        |       |       |       |        |        |        | 1.000  | 0.951   | 0.876   |
| 50                  | 122 000              |        |        |       |       |       |        |        |        |        | 1.000   | 0.925   |
| 60                  | 197 000              |        |        |       |       |       |        |        |        |        |         | 1.000   |

Tabelle 2. Dilutionskoeffizienten beim Trocknen von Gasproben.

Beispiel: Eine Gasprobe wird von einer Umgebung mit Taupunkt 40 °C (73.000 ppm Wasser) in eine Umgebung mit 20 °C Td (23.200 ppm Wasser) gebracht. Die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration von 5,263 % bei 20 °C Td entspricht 5,00 % in der Umgebung mit 40 °C Td (5,263 % × 0,950 = 5,00 %). Die niedrigere Messung ist auf Dilution zurückzuführen, die wiederum das Ergebnis eines erhöhten Feuchteanteils bei 40 °C Td zur Folge hat.

### Kohlendioxid und Sicherheit

Kohlendioxid ist ein nicht-toxisches und nicht-brennbares Gas. Dennoch können erhöhte Konzentrationen für einen Menschen lebensgefährlich sein. Wenn CO<sub>2</sub>-Gas oder Trockeneis verwendet, produziert, versendet oder gelagert werden, erreicht die CO<sub>2</sub>-Konzentration oft gefährliche Werte. Da CO<sub>2</sub> geruch- und farblos ist, kann ein Gasaustritt nur erkannt werden, wenn die Sicherheit des Personals durch geeignete Sensoren gewährleistet wird.

#### Wirkung verschiedener CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

| KONZENTRATION      | WIRKUNG   |
|--------------------|---|
| 350 - 450 ppm      | Typische atmosphärische Konzentration             |
| 600 - 800 ppm      | Zulässige Qualität der Raumluft                   |
| 1.000 ppm          | Noch zulässige Qualität der Raumluft              |
| 5.000 ppm          | Maximale Arbeitsplatzkonzentration über 8 Stunden |
| 6.000 - 30.000 ppm | Bedenklich, nur kurzzeitige Belastung             |
| 3 - 8 %            | Erhöhte Atemfrequenz, Kopfschmerzen               |
| > 10 %             | Übelkeit, Erbrechen, Bewusstlosigkeit             |
| > 20 %             | Schnell eintretende Bewusstlosigkeit, Tod         |

**VAISALA**

Kontaktieren Sie uns:  
[www.vaisala.com/requestinfo](http://www.vaisala.com/requestinfo)



Code scannen für  
mehr Informationen

Ref. B211228DE-A ©Vaisala 2012

Das vorliegende Material ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte hierfür liegen bei Vaisala und ihren jeweiligen Partnern. Alle Rechte vorbehalten. Alle Logos und/oder Produktnamen sind Markenzeichen von Vaisala oder ihrer jeweiligen Partner. Die Reproduktion, Übertragung, Weitergabe oder Speicherung von Informationen aus den vorliegenden Unterlagen in jeglicher Form ist ohne die schriftliche Zustimmung von Vaisala verboten. Alle Spezifikationen, einschließlich der technischen, können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Der vorliegende Text ist eine Übersetzung aus dem Englischen. Bei Widersprüchen zwischen Übersetzung und Original ist die englische Fassung des Textes maßgebend.

[www.vaisala.com](http://www.vaisala.com)