

Messen von Kohlendioxid



Messungen von Kohlendioxid 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-CO₂-Sensoren
- Ideale Gasgleichung und wie sie verwendet wird, um Umgebungsfaktoren bei der CO₂-Messung auszugleichen
- Optimale Platzierung für CO₂-Messwertgeber
- Mit CO₂ 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 **Abbildung 1** gezeigt.

IR-Messung ist die gängige Technologie für CO₂-Nachweise. IR-Sensoren bieten gegenüber chemischen Sensoren viele Vorteile. Sie sind stabil und in hohem Maße selektiv gegenüber dem gemessenen Gas. Sie haben eine lange

Lebensdauer und weil das gemessene Gas mit dem Sensor nicht direkt interagiert, sind IR-Sensoren widerstandsfähig gegen hohe Feuchte, Staub, Schmutz und sonstige raue Bedingungen.

Die Hauptkomponenten eines IR-CO₂-Sensors 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 nur die Wellenlänge des gemessenen Gases den Sensor erreicht. Die Lichtintensität wird ermittelt und in einen Gaskonzentrationswert umgewandelt.

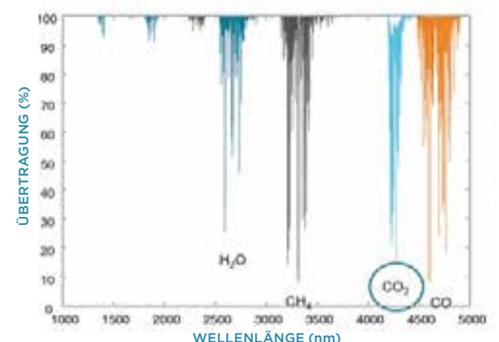


Abbildung 1. IR-Absorption von CO₂ und einigen anderen Gasen.

Der Vaisala CARBOCAP® Kohlendioxidssensor misst die Volumenkonzentration des CO₂ mithilfe von IR-Messtechnik. Er ist mit einem einzigartigen elektrisch abstimmbaren Fabry-Pérot-Interferometerfilter für Bifrequenzmessungen ausgestattet. Dies bedeutet, dass der CARBOCAP® Sensor neben der CO₂-Absorptionsmessung auch eine Referenzmessung durchführt, die alle Änderungen der Lichtquellenintensität sowie Verunreinigungen ausgleicht. Dadurch ist der Sensor langfristig besonders beständig. Eine vollständige Übersicht über die Vaisala Produkte für CO₂-Messungen finden Sie unter www.vaisala.com/CO2

Die ideale Gasgleichung

Die ideale Gasgleichung ist nützlich, wenn es darum geht, die Auswirkung von Temperatur- und Luftdruckänderungen auf CO₂-Messungen abzuschätzen. Mit ihr können die CO₂-Messwerte 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 wie bei dieser Modellan-

nahme. Sie ist jedoch häufig ausreichend, um reale Gase zu beschreiben. Die ideale Gasgleichung gibt die Abhängigkeit der Zustandsgrößen Luftdruck, Volumen und Temperatur einer bestimmten Menge dieses Gases wie folgt an:

$$pV = nRT$$

Dabei gilt:

$$p = \text{Luftdruck [Pa]}$$

$$V = \text{Gasvolumen [m}^3\text{]}$$

$$n = \text{Gasmenge [mol]}$$

$$R = \text{universelle Gaskonstante (= 8 3145 J/mol K)}$$

$$T = \text{Temperatur [K]}$$

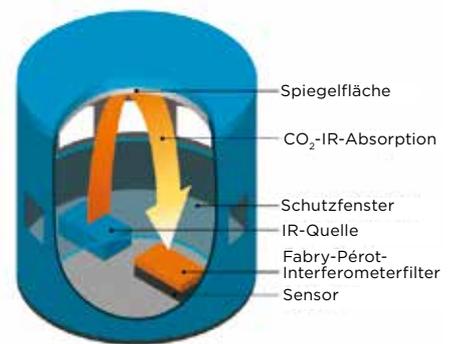
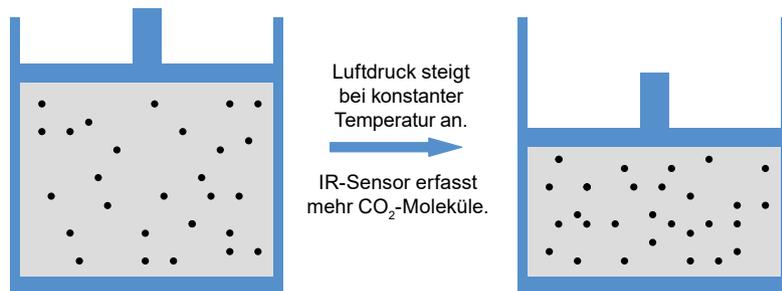
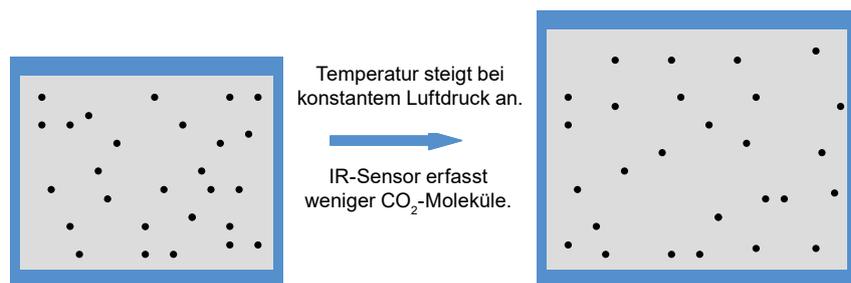


Abbildung 2. Der Aufbau des Vaisala CARBOCAP® CO₂-Sensors.

Luftdruckanstieg bei konstanter Temperatur



Temperaturanstieg bei konstantem Luftdruck



Optimale Platzierung für CO₂-Messwertgeber

- Vermeiden Sie Stellen, wo Personen direkt auf den Sensor atmen könnten. Platzieren Sie den Sensor auch nicht zu nah an Einlass- bzw. Auslassrohren oder in der Nähe von Türen bzw. Fenstern.
- Raumsensoren liefern einer bedarfsgeregelten Lüftung genauere Daten zur Belüftungseffektivität als in Kanälen installierte Sensoren. Kanalsensoren eignen sich für Einzelbereichssysteme und sollten so nah wie möglich an Räumen mit Personen und zu Wartungszwecken leicht zugänglich montiert werden.
- Bei der CO₂-Messung für die Personensicherheit sollten Messwertgeber in der Nähe potenzieller Leckstellen installiert werden, um eine Früherkennung zu gewährleisten. Geometrie, Belüftung und Luftströmung des überwachten Raums sollten dabei berücksichtigt werden. Anzahl und Platzierung der CO₂-Messwertgeber sollten auf einer Risikoanalyse beruhen.

Auswirkung von Temperatur und Luftdruck auf CO₂-Messungen

Die meisten Gassensoren erzeugen ein Signal, das der molekularen Dichte (Moleküle/Gasvolumen) entspricht, auch wenn die Messwerte als ppm (Volumen/Volumen) angezeigt werden. Bei einer Änderung von Luftdruck und/oder Temperatur ändert sich nach der idealen Gasgleichung die molekulare Dichte des Gases. Dieser Effekt wird durch die ppm-Messung des Sensors ersichtlich.

In den folgenden Abbildungen wird gezeigt, wie ein Anstieg der Temperatur oder des Luftdrucks den Zustand des Gases ändert und wie er sich auf CO₂-Messungen auswirkt.

Mit der idealen Gasgleichung kann die molekulare Dichte eines Gases bei gegebenen Temperatur- und Luftdruckwerten errechnet werden, wenn die Gasdichte für Umgebungstemperatur und Luftdruck unter Normalbedingungen 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:

Anhand der Dichteformel kann geschätzt werden, wie sehr sich die Gasmesswerte bei Temperatur- und/oder Luftdruckschwankungen ändern.

		Temperatur (°C)									
		-20	-10	0	10	20	25	30	40	50	60
Luftdruck (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 CO₂-Sensors bei einer Gaskonzentration von 1 000 ppm unter verschiedenen Temperatur- und Luftdruckbedingungen.

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

Dabei gilt:

- ρ = Gasvolumenkonzentration [ppm oder %]
- p = Umgebungsluftdruck [hPa]
- t = Umgebungstemperatur [°C]

Gleichung 1. Berechnung der Gaskonzentration bei gegebener Temperatur und Luftdruck.

Mit der Dichteformel können bei CO₂-Messungen die Temperatur- und Luftdruckabweichungen kompensiert werden. Die meisten CO₂-Messgeräte messen den Luftdruck nicht und können daher auch Luftdruckabweichungen nicht automatisch kompensieren. Beim Kalibrieren im Herstellerbetrieb werden die Messgeräte gewöhnlich auf die Luftdruckbedingungen auf Meereshöhe (1 013 hPa) eingestellt. Für Messungen auf anderen Höhen wird empfohlen, eine Luftdruckkompensation vorzunehmen. Hierbei wird entweder der korrekte Luftdruck für die interne Kompensation eingegeben (konstanter Luftdruck) oder die Kompensation in ein Automationssystem bzw. einen PC einprogrammiert (veränderter Luftdruck).

Dieselben Kompensationsregeln gelten für die Temperatur. Allerdings sind immer mehr CO₂-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 CO₂-Messwerte (Gas enthält 1 000 ppm an CO₂ unter Normalbedingungen) bei veränderter Temperatur/Luftdruck, gemäß der idealen Gasgleichung.

Trocknen feuchter Gasproben

Stellt man die ideale Gasgleichung etwas weiter um, wird klarer was passiert, wenn sich Luftdruck, Temperatur und Volumen in der Zusammensetzung eines Gasgemischs verändern. Damit kann man bspw. die Auswirkung einer sich ändernden Feuchte auf CO₂-Messungen ermitteln.

Alle Moleküle eines Gasgemischs nehmen bei der gleichen Temperatur den gleichen Raum im System ein (V ist für alle Gase gleich). Die ideale Gasgleichung lässt sich umstellen nach:

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

Dabei gilt:

- n_{gas1} = Gasmenge 1 [mol]
- n_{gas2} = Gasmenge 2 [mol] usw.

und

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

Dabei gilt:

- p = Gesamtluftdruck des Gasgemischs
- p_{gas1} = Teilluftdruck des Gases 1
- p_{gas2} = Teilluftdruck des Gases 2 usw.

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

Diese Information ist nützlich, wenn man den Einfluss von Wasserdampf auf die Messwerte eines CO₂-Sensors berücksichtigt. Setzt man beispielsweise einem trockenen Gas bei konstantem Luftdruck, 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 Hochfeuchteumgebung entnimmt und diese vor dem Eintritt in die Messkammer eines CO₂-Messgeräts trocknen lässt. Der Verlust an Wassermolekülen verändert dann die Zusammensetzung des Gases und wirkt sich somit auf die CO₂-Messung aus.

T _d (°C)	T _d (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
	ppm H ₂ 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.

Dieser sogenannte Dilutionseffekt kann mit Tabelle 2 ermittelt werden. Die CO₂-Konzentration der Hochfeuchteumgebung kann berechnet werden, wenn die CO₂-Konzentration des trockenen Gases bekannt ist. Hierfür müssen der Taupunkt (T_d bei 1 013 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.

Beispiel: Eine Gasprobe wird von einer Umgebung mit Taupunkt 40 °C (73 000 ppm Wasser) in eine Umgebung mit 20 °C T_d (23 200 ppm Wasser) gebracht. Die gemessene CO₂-Konzentration von 5,263 % bei 20 °C T_d entspricht 5 % in der Umgebung mit 40 °C T_d (5,263 % x 0,950 = 5 %). Die niedrigere Messung ist auf Dilution zurückzuführen, die wiederum das Ergebnis eines erhöhten Feuchteanteils bei 40 °C T_d zur Folge hat.

Kohlendioxid und Sicherheit

Kohlendioxid ist ein nichttoxisches und nichtbrennbares Gas. Dennoch können erhöhte Konzentrationen für einen Menschen lebensgefährlich sein. Wenn CO₂-Gas oder Trockeneis verwendet, produziert, versendet oder gelagert wird, erreicht die CO₂-Konzentration oft gefährliche Werte. Da CO₂ geruch- und farblos ist, kann ein Gasaustritt nur erkannt werden, wenn die Sicherheit des Personals durch geeignete Sensoren gewährleistet wird.

Wirkung verschiedener CO₂-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 acht 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

www.vaisala.com

Wenden Sie sich an uns unter www.vaisala.com/contactus



Scannen Sie den Code, um weitere Informationen zu erhalten.

Ref. B211228DE-B ©Vaisala 2019

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 dieser Broschüre in jeglicher Form ist ohne schriftliche Zustimmung von Vaisala nicht gestattet. Alle Spezifikationen, einschließlich der technischen Daten, können ohne vorherige Ankündigung geändert werden.