

CO₂-Messung in Inkubatoren – Fragen und Antworten



Häufig gestellte Fragen

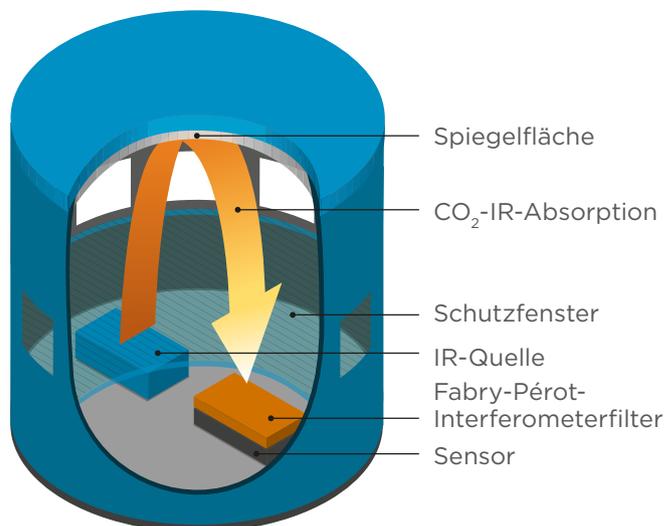
1. Wie funktioniert der CARBOCAP® Sensor mit Einstrahl-Bifrequenz-NDIR-Technologie (nichtdispersiver Infrarottechnologie)?
2. Wie wirken sich Temperatur und Druck auf die CO₂-Messung aus?
3. Wie können Temperatur- und Druckfehler bei Verwendung von Vaisala CO₂-Produkten korrigiert werden?
4. Wie kann Kondensation bei Probenahmen aus Inkubatoren verhindert werden?
5. Warum ist der CO₂-Konzentrationswert höher als erwartet, wenn das Pumpenprobenahmeverfahren mit Trocknungsschlauch eingesetzt wird?

Der Zweck dieses Dokuments ist die Beantwortung der am häufigsten gestellten Fragen zu CO₂-Messungen und -Produkten.

1. Wie funktioniert der CARBOCAP® Sensor mit Einstrahl-Bifrequenz-NDIR-Technologie (nichtdispersiver Infrarottechnologie)?

Der Vaisala CARBOCAP® Sensor besteht aus drei Hauptkomponenten: einer Lichtquelle, einem Interferometer und einem IR-Sensor. Die Lichtquelle ist so platziert, dass sie auf den IR-Sensor scheint, sodass das Licht eine feste Strecke zum Sensor zurücklegt, wo die Intensität des Lichts gemessen wird.

Vor dem IR-Sensor befindet sich ein Fabry-Pérot-Interferometer (FPI). Das FPI ist ein abstimmbarer Filter, der nur bestimmte Wellenlängen des Lichts zum Sensor durchlässt.



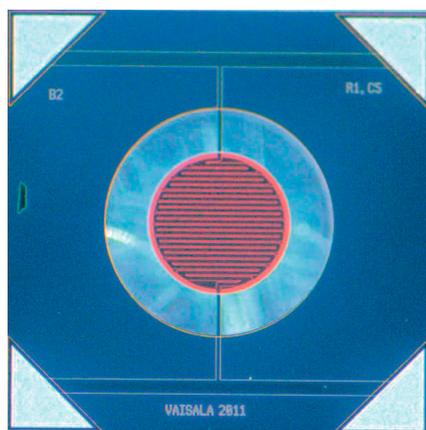
Licht wird bei der CO₂-Absorptionswellenlänge von dem im Gas vorhandenen Kohlendioxid absorbiert. Das FPI schließt alle anderen Wellenlängen aus, sodass die Intensität des Lichts, das den IR-Sensor erreicht, in Abhängigkeit von der CO₂-Menge innerhalb des Sensors variiert.

Kohlendioxid absorbiert bestimmte Wellenlängen des Lichts und nicht andere. Daher ist das FPI so ausgelegt, dass es Licht bei einer CO₂-Absorptionswellenlänge (4,26 µm) und einer nahe gelegenen, nicht absorbierenden Wellenlänge durchlässt. Siehe Darstellung rechts.

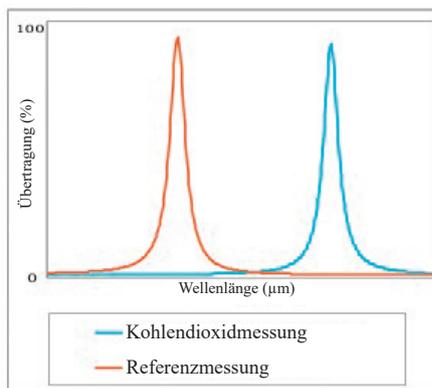
Während des Betriebs des Sensors wechselt das FPI fortlaufend zwischen diesen beiden Wellenlängen. Bei der CO₂-Absorptionswellenlänge wird die Intensität des erkannten Lichts proportional zur CO₂-Konzentration im Lichtweg verringert. Die bei der nicht absorbierenden Wellenlänge gemessene Lichtintensität dient als Vergleichsbasis.

Mit variierender CO₂-Konzentration variiert auch der Unterschied in der Lichtintensität. Die genaue Beziehung zwischen IR-Lichtintensität und CO₂-Volumenkonzentration wird bestimmt, wenn das Messgerät mit reinem Stickstoff (0 ppm CO₂) und einer bekannten CO₂-Konzentration kalibriert wird.

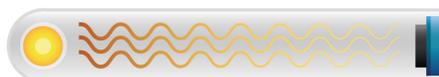
Der CARBOCAP® Sensoraufbau ist einfach und robust. Es kommen dabei nur eine Lichtquelle und ein IR-Sensor zum Einsatz. Dadurch werden Fehler vermieden, die durch geringfügige Unterschiede in den verschiedenen Komponenten von Zweistrahlensensor-konstruktionen verursacht werden. Das im CARBOCAP® Sensor verwendete FPI ist aus Silizium mikrobearbeitet und weist keine



Microglow ist ein von Vaisala patentierter Silizium-MEMS-Emitter mit Infrarotquelle.



Mit dem CARBOCAP® Sensor werden Absorptions- und Referenzmessungen durchgeführt.



Das FPI ist auf eine nahe gelegene, nicht absorbierende Referenzwellenlänge abgestimmt, wobei der IR-Sensor die gesamte Lichtintensität misst und eine Vergleichsbasis bildet. Änderungen der Leistung der Lichtquelle, des FPI oder des IR-Sensors wirken sich gleichermaßen auf beide Messungen aus. So bleiben der Unterschied zwischen beiden Messungen und damit die Kalibrierung des Sensors erhalten. Dies ist für die Langzeitstabilität des Sensors entscheidend.

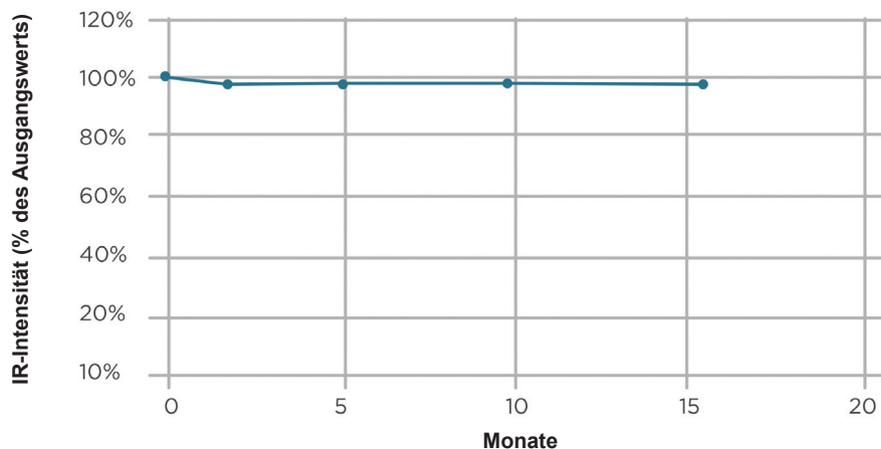
beweglichen Teile auf. Dies bietet eine viel höhere Zuverlässigkeit als mechanische „Schneiderad“-Designs.

Der CARBOCAP Sensor enthält mit dem Microglow auch die neueste Generation von IR-Lichtquellen. Die Microglow Technologie löst viele Probleme herkömmlicher Infrarotquellen. Die Hauptvorteile von Microglow sind höhere Stabilität, reduzierter Stromverbrauch und eine deutlich längere Betriebslebensdauer. Durch den Umstieg von Glühlampen

auf die Microglow Technologie kann die Lebensdauer der Sensoren um 50 % verlängert werden. Der Stromverbrauch entspricht dabei nur einem Viertel der von herkömmlichen Infrarotquellen.

Die Intensität von Microglow bleibt über die gesamte Lebensdauer hinweg äußerst stabil. Hinzu kommen eine kurze Ansprechzeit und eine herausragende Herstellbarkeit, da der Chip direkt auf der Platine automatisch montiert werden kann.

Weitere Informationen zur Microglow Technologie finden Sie unter vaisala.com/microglow.



Herausragende Langzeitstabilität von Microglow.

2. Wie wirken sich Temperatur und Druck auf die CO₂-Messung aus?

Alle nichtdispersive Infrarotmessgeräte basieren auf der Messung der molaren Dichte (Anzahl der Moleküle im optischen Weg des Strahls). Die meisten Benutzer*innen bevorzugen die Ausgabe in Volumenprozent. Daher werden die CO₂-Messgeräte so angepasst, um dies anzuzeigen, indem die Anzahl der Moleküle mit einer bekannten CO₂-Volumenkonzentration korreliert wird.

Da Gase komprimierbar sind, variieren deren molare Dichten bei wechselndem Umgebungsdruck und wechselnder Umgebungstemperatur. Aus diesem Grund sind die Messergebnisse temperatur- und druckabhängig.

Die CO₂-Messung muss kompensiert werden, wenn die Messbedingungen von den Kalibrierbedingungen (1 013 hPa und 25 °C) erheblich abweichen. In den Tabellen 1 und 2 auf der nächsten Seite finden Sie Informationen zum Ausmaß der Auswirkung nicht kompensierter Druck- und Temperaturänderungen gemäß der allgemeinen Gasgleichung.

Um die Notwendigkeit der Kompensation besser zu verstehen,

ist es hilfreich, zunächst etwas über das Verhalten von Gasen zu wissen. In jedem Gasgemisch ist der Gesamtdruck des Gases die Summe der Partialdrücke der Komponentengase. Dies wird auch als Daltonsches Gesetz bezeichnet und durch folgende Formel ausgedrückt:

$$P_{\text{gesamt}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

Die Menge eines Gases in einem Gasgemisch kann als Druck angegeben werden. Am Beispiel Luft sind die Hauptkomponenten Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf, sodass sich der atmosphärische Gesamtdruck aus den Partialdrücken dieser Gase zusammensetzt.

Der Partialdruck jedes Gases ist das Ergebnis seiner Volumenkonzentration und des Gesamtdrucks des Systems.

Die Luft, die wir atmen, besteht aus ungefähr 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 0,9 % Argon und ungefähr 0,04 % Kohlendioxid. Diese Prozentsätze bleiben unabhängig von der Höhe in der gesamten Atmosphäre ungefähr konstant.

Der durchschnittliche Druck der Atmosphäre auf Meereshöhe beträgt ungefähr 1 013 hPa, daher liegt der

Partialdruck von Kohlendioxid bei 0,04 % von 1 013 hPa (0,0004 * 1 013) oder 0,405 hPa. Beispiel: In Denver, Colorado, USA, wo in einer Höhe von etwa 1,60 km der atmosphärische Druck ungefähr 834,3 hPa beträgt, ergibt dasselbe 0,04 % Kohlendioxid einen Partialdruck von 0,334 hPa gegenüber 0,405 hPa.

Obwohl CO₂ in dieser höheren Höhe immer noch 0,04 % der Atmosphäre ausmachen, ist der Druck geringer, und bei fallendem Druck nimmt die molare Dichte ab. Da NDIR-Sensoren auf der Messung der molaren Dichte basieren, muss eine Kompensation erfolgen, wenn ein Volumenprozent- oder ppmv-Wert erforderlich ist. Die Temperaturkompensation ist auch wichtig, da mit fallender Temperatur die molare Dichte zunimmt.

Die meisten Vaisala Kohlendioxidmesswertgeber verfügen über einen integrierten Temperatursensor, bei dem das Gerät temperaturbedingte Schwankungen der Messung automatisch ausgleichen kann. Darüber hinaus können auch Kompensationen für Sauerstoff und relative Feuchte eingestellt werden, diese Parameter haben jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Messgenauigkeit.

Tabelle 1. Auswirkungen nicht kompensierter Druckänderungen von CO₂-Messwerten in Prozent in einem NDIR-Sensor nach der allgemeinen Gasgleichung.

Bei 25 °C und 1 013 hPa kalibrierte Messgeräte					
Höhe über Meeresspiegel		Luftdruck (hPa)	Messkonzentration (CO ₂ %)	Korrigierte Konzentration (CO ₂ %)	Differenz (CO ₂ %)
Fuß	Meter				
0	0	1013	5.00	5.00	0.00
500	153	992.8	4.90	5.00	0.10
1000	305	979.1	4.83	5.00	0.17
1500	458	958.4	4.73	5.00	0.27
2000	610	937.7	4.63	5.00	0.37
2500	763	923.9	4.56	5.00	0.44
3000	915	903.2	4.46	5.00	0.54
3500	1068	889.4	4.39	5.00	0.61
4000	1220	868.7	4.29	5.00	0.71
4500	1373	854.9	4.22	5.00	0.78
5000	1526	834.3	4.12	5.00	0.88
5500	1679	820.5	4.05	5.00	0.95
6000	1831	806.7	3.98	5.00	1.02

Tabelle 2. Auswirkungen nicht kompensierter Temperaturänderungen in CO₂-Messwerten in Prozent in einem NDIR-Sensor nach der allgemeinen Gasgleichung.

Bei 25 °C und 1 013 hPa kalibrierte Messgeräte			
Temperatur (°C)	Gemessene Konzentration (CO ₂ %)	Korrigierte Konzentration (CO ₂ %)	Differenz (CO ₂ %)
25	5.00	5.00	0.00
26	4.98	5.00	0.02
27	4.97	5.00	0.03
28	4.95	5.00	0.05
29	4.93	5.00	0.07
30	4.92	5.00	0.08
31	4.90	5.00	0.10
32	4.89	5.00	0.11
33	4.87	5.00	0.13
34	4.85	5.00	0.15
35	4.84	5.00	0.16
36	4.82	5.00	0.18
37	4.81	5.00	0.19



Das Vaisala GM70 mit Feuchte- und Kohlendioxidsonde.

3. Wie können Temperatur- und Druckfehler bei Verwendung von Vaisala CO₂-Produkten korrigiert werden?

Kohlendioxidmessungen, die bei Temperaturen und Drücken durchgeführt werden, die von den Kalibrierbedingungen abweichen, müssen möglicherweise korrigiert werden, um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Die einfachste Form der Korrektur für einen Volumenprozentwert kann mit einer Formel gemäß der allgemeinen Gasgleichung errechnet werden:

$$c_{\text{korrigiert}} (\%/ppm) = \frac{c_{\text{gemessen}} (\%/ppm) * (1\ 013 * (t(^{\circ}\text{C}) + 273))}{(298\text{K} * p(\text{hPa}))}$$

Im portablen Vaisala CARBOCAP® Kohlendioxidmessgerät GM70 lassen sich Temperatur und Druck der Umgebung am Messpunkt einfach im GM70 Nutzungsmenü einstellen. Kompensationen erfolgen intern, und das Messgerät zeigt die korrigierte

Messung an. Die interne Korrektur berücksichtigt auch Abhängigkeiten, die durch reale Gasgleichungen verursacht werden, sowie die Elektronik und die optischen Komponenten des Messgeräts. Die interne Korrektur des GM70 ist exakter als die Korrektur nach der allgemeinen Gasgleichung. Eine andere Möglichkeit, die Temperatur zu kompensieren, besteht darin, eine Vaisala HUMICAP® Feuchte- und Temperatursonde HMP77B mit dem Anzeigergerät MI70 sowie der CO₂-Sonde zu verbinden. Die mit der Sonde gemessene Temperatur kann so eingestellt werden, dass der CO₂-Wert automatisch kompensiert wird.

Die CARBOCAP® Kohlendioxidsonden GMP231 und GMP251 von Vaisala verfügen über interne Temperaturkompensationen, bei der die Sonde die Temperatur automatisch misst und kompensiert. Auch die Kompensationen von Sauerstoff und relativer Feuchte können für beste Genauigkeit eingestellt werden.

4. Wie kann Kondensation bei Probenahmen aus Inkubatoren verhindert werden?

Das GM70 verfügt über zwei alternative Probenahmeverfahren: Diffusion und Pumpenansaugung. Die Pumpenansaugungsoption dient zum Entnehmen einer Probe aus Bereichen, in denen eine diffusionsbasierte direkte Messung nicht möglich ist.

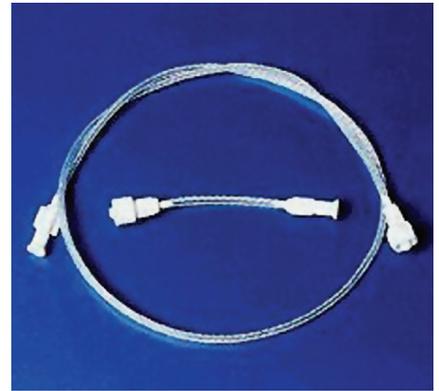
Bei der Entnahme einer Gasprobe aus feuchten Umgebungen sind Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, da die optischen Oberflächen des NDIR-Sensors in der Sonde und in der Pumpenkammer vor Kondensation geschützt werden müssen.

Inkubatoren und Umgebungskammern sind schwierig zu messen: Die Gasprobe wird normalerweise aus einer Umgebung mit hoher Temperatur und hoher Feuchte entnommen und in eine Umgebung mit Raumtemperatur eingebracht, was zu Kondensation führt.

Kondensation im Schlauch- und Probenahmesystem kann vermieden werden, indem ein Probenahmeschlauch aus einem Material namens Nafion® (als Zubehör erhältlich, Vaisala Teile-Nr. 212807GM) verwendet wird.



Das Vaisala GM70 wird zur Überprüfung des CO₂-Gehalts in Inkubatoren verwendet.



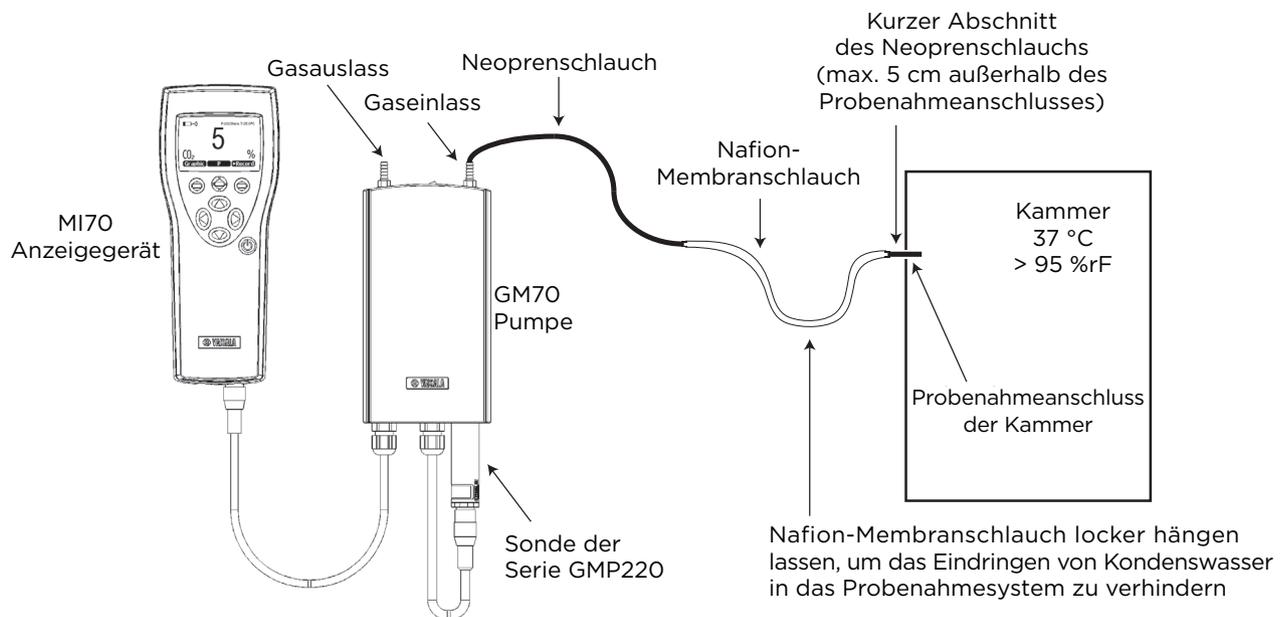
Nafion®-Schlauch,
Vaisala Teile-Nr. 212807GM.

Die Kerntechnologie des Schlauchs ist Nafion®, das sehr selektiv bei der Entfernung von Wasser ist. In einem als Pervaporation bezeichneten Prozess durchdringt das Wasser die Membranwand und verdunstet in die Umgebungsluft. Nafion® entfernt Wasser durch Absorption, die als kinetische Reaktion erster Ordnung auftritt. In Trocknungsanwendungen überführt der Feuchtetauscher den Wasserdampf aus einem feuchten Gas in die Umgebungsluft. Die Trocknung ist abgeschlossen, wenn der Feuchtegehalt der Probe dem Feuchtegehalt der Umgebungsluft entspricht. Da das Trocknen als kinetische Reaktion erster Ordnung abläuft, kann dieses Niveau extrem schnell erreicht werden, üblicherweise innerhalb von 100 bis 200 Millisekunden. Dieses Verhalten macht das Schlauchsystem zu idealen Anwendungen, bei denen eine sehr feuchte Probe in eine Umgebung mit Raumtemperatur gebracht wird. Die Feuchte der Gasprobe kann bereits mit einem kurzen Schlauch verringert werden. Weitere Informationen zu Schläuchen finden Sie unter www.permapure.com.

1 Nafion® ist ein Dupont-Copolymer aus Tetrafluorethylen (Teflon) und Perfluor-3,6-dioxa-4-methyl-7-octansulfonsäure.

Wenn Sie mit der GM70 Pumpe Proben aus einem Inkubator entnehmen, verwenden Sie einen Nafion®-Schlauch, um die Möglichkeit der Feuchte Kondensation im Probenahmesystem auszuschließen. Folgende Empfehlungen sollten dabei beachtet werden:

- Es ist wünschenswert, dass sich der Nafion®-Probenahmeschlauch am Übergangspunkt zwischen Inkubator und Umgebung befindet. 20 cm von Nafion® in der Umgebung reichen aus, um Wasserdampf aus der extrahierten Probe in die Umgebung zu übertragen. Der Rest des Probenahmeschlauchs kann Neopren oder ein anderes Material sein. Schließen Sie den Schlauch mit einem Schlauchanschluss oder einer anderen Methode an, um das Eindringen von Umgebungsluft in die Probe zu verhindern. Die Gesamtlänge der Probenleitung sollte so kurz wie möglich gehalten werden.
- Wenn Sie Proben durch die Inkubatortür entnehmen, führen Sie den Nafion®-Schlauch in den Inkubator ein, und schließen Sie die Inkubatortür vorsichtig, um sicherzustellen, dass die Türdichtung den Schlauch und die Dichtungen um ihn herum nicht beschädigt.
- Wenn Sie eine Gasprobe aus einer Kammer entnehmen, sollten einige Zentimeter der Probenleitung in der Kammer platziert werden. Wenn in der Kammer, in der die Probe entnommen wird, das Risiko von Kondensation besteht, achten Sie besonders darauf, dass das Kondensat nicht zum Schlauch läuft.
- Um sicherzustellen, dass das Kondenswasser die Sonde nicht erreicht hat, können Sie die CO₂-Sonde aus der GM70 Pumpe herausziehen. Drücken Sie die Sonde beim erneuten Einsetzen nicht vollständig hinein. Passen Sie stattdessen die beiden O-Ringe an die glatte Sondenoberfläche an, um eine dichte Verbindung zu erzielen.
- Wenn Sie Proben durch ein Loch oder eine andere Öffnung im Inkubator entnehmen, führen Sie den Nafion®-Schlauch und dessen Dichtung in den Inkubator ein.
- Verwenden Sie bei der Probenahme durch einen Schlauchanschluss/ Probenanschluss ein sehr kurzes Stück Neoprenschlauch, um den Anschluss des Nafion-Schlauchs mit dem Inkubatoranschluss zu verbinden. Verwenden Sie das Neopren als „Verbindung“, um den Nafion®-Schlauch so nah wie möglich an der Schlauchtülle zu halten. Es ist nicht erwünscht, dass das Probengas durch das Neopren strömt, da es wahrscheinlich zu Kondensation im Neoprenschlauch führt.
- Die GM70 Pumpe sollte zur Vorsicht oberhalb des Probenahmeanschlusses der Kammer angeordnet werden. Wenn Kondensation in der Probenleitung auftritt, wird verhindert, dass flüssiges Wasser den CO₂-Sensor beschädigt.



Probenahmesystem mit dem Nafion®-Membranschlauch.

5. Warum ist der CO₂-Konzentrationswert höher als erwartet, wenn das Pumpenprobenahmeverfahren mit Trocknungsschlauch eingesetzt wird?

Bei Verwendung des Nafion®-Schlauchs zum Trocknen der Probe ist die CO₂-Konzentration der trockenen Probe geringfügig höher als in der feuchten Probe.

Dies ist auf ein Phänomen zurückzuführen, das als Verdünnung bezeichnet wird. Die CO₂-Dichte wird im Inkubator durch das Volumen „verdünnt“, das der Wasserdampf einnimmt. Wenn Wasserdampf aus der Probe entfernt wird, nehmen die Fraktionen, die von anderen Gasen eingenommen werden, einschließlich CO₂ entsprechend zu.

In der Tabelle 3 sind die Verdünnungskoeffizienten für die Gaskonzentration beim Trocknen einer Gasprobe zusammengefasst. Der Taupunkt (bei 1 013 hPa) der Gasprobe im Inkubator wird auf der horizontalen Achse und der Taupunkt der Gasprobe am Messpunkt auf der vertikalen Achse ausgewählt. Der Taupunkt der Gasprobe am Messpunkt kann mit einer Feuchtesonde (HMP75B, HMP76B oder HMP77B) bestimmt werden.

Tabelle 3. Verdünnungskoeffizienten

Td (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
-60	0.9999	0.9996	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-50	0.9999	0.9997	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-40	1.0000	0.9998	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-30		1.0000	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.928	0.879	0.804
-20			1.000	0.998	0.995	0.989	0.978	0.959	0.928	0.879	0.804
-10				1.000	0.997	0.990	0.979	0.961	0.930	0.881	0.806
0					1.000	0.994	0.983	0.964	0.933	0.884	0.809
10						1.000	0.989	0.970	0.939	0.890	0.815
20							1.000	0.981	0.950	0.901	0.826
30								1.000	0.969	0.920	0.845
40									1.000	0.951	0.876
50										1.000	0.925
60											1.000

Beispiel: Eine Gasprobe wird aus einer Umgebung mit 40 °C (Td) entnommen und in eine Umgebung mit 10 °C (Td) eingebracht, in der die gemessene Gaskonzentration 5,32 % beträgt. In der Umgebung mit 40 °C (Td) entspricht dies 5 % CO₂ ($5,32 \% \times 0,939 = 5 \%$), da der höhere Wassergehalt die Probe verdünnt hat.

VAISALA

Kontaktieren Sie uns unter
www.vaisala.de/contactus

www.vaisala.de



Scannen Sie den Code, um weitere Informationen zu erhalten.

Ref. B210826DE-D ©Vaisala 2022

Das vorliegende Material ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte hierfür liegen bei Vaisala und ihren jeweiligen Partnern. 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.