

Miniaturisierter Infrarot-Gassensor mit integrierter Mikromembranpumpe zur Detektion von Kohlendioxid in der Umgebungsluft

Markus Erbel, Andreas Gehrke, Stephan Korbmacher und Gerhard Wiegleb

Schlagwörter: Klimatechnik, Gasanalyse, Infrarot-Gassensor, Mikropumpe, Miniaturisierung

Es wird ein miniaturisierter Infrarot-Gassensor beschrieben, der zur Erfassung von Kohlendioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft geeignet ist. Durch den Einsatz einer Mikromembranpumpe konnte der Gesamtaufbau der Sensoreinheit, im Vergleich zu konventionellen Systemen, deutlich verkleinert werden. Der fotometrische Teil der Sensoreinheit besteht aus einem Einstrahlensystem, bei dem die Strahlungsquelle moduliert wird. Als Detektor wird ein pyroelektrisches Element in Verbindung mit einem schmalbandigen Interferenzfilter eingesetzt, das eine extrem hohe Selektivität der CO₂-Messung garantiert. Aufgrund der geringen Leistungsaufnahme und Miniaturisierung läßt sich der Sensoraufbau für unterschiedliche Anwendungen im Bereich der Umwelt-Prozeßmeßtechnik und Medizintechnik einsetzen. Der Sensor wurde hinsichtlich Empfindlichkeit/Nachweisgrenzen, zeitliches Ansprechverhalten und Langzeitstabilität untersucht.

Miniaturized infrared gas sensor with integrated micromembrane pump for carbon dioxide detection in ambient air

A miniaturized infrared gas sensor is described which is capable to detect carbon dioxide in ambient air. Due to the application of a micromembrane pump the size of the sensor unit could be reduced compared to conventional gas analyzer. The photometric part of the sensor unit consist of a single beam design with a modulated infrared radiation source. A pyroelectric crystal is used for the radiation detection in conjunction with a narrow bandpass interference filter. This leads to a extremely stable and selectiv CO₂-measurement. Due to the low power consumption and miniaturisation it is possible to apply the sensor unit to various applications in the fields of environmental monitoring, process control and medical technique. The sensor was investigated regarding to the sensitivity, resolution, response time and long-term stability.

1 Einleitung

IR-Fotometer werden schon seit den 30er Jahren in der Industrie zur Messung der Konzentration von Gaskomponenten in Gasgemischen eingesetzt. Aufgrund der großen Bauweise und der hohen Kosten war der Einsatz bisher allerdings auf wenige industrielle Anwendungen beschränkt [1]. Doch auch in der Gebäudeautomatisierung und für den Personenschutz ist der Einsatz von IR-Fotometern äußerst sinnvoll, da dieses Verfahren sehr stabil ist und geringe Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen aufweist. Für den Einsatz in portablen Meßgeräten muß ein solcher Gassensor allerdings miniaturisiert werden, um die konstruktive Integration zu ermöglichen. Neben der mechanischen Miniaturisierung spielt in diesem Zusammenhang auch die Reduzierung des Energieeinsatzes im Hinblick auf den Batteriebetrieb der Meßgeräte eine große Rolle. Für die Gebäudeautomatisierung/Klimatechnik ist die Miniaturisierung ebenfalls wichtig, da man diese Technik möglichst unauffällig in Installationselemente integrieren muß. Der entwickelte Gassensor auf der Basis eines IR-Fotometers mit integrierter Mikromembranpumpe [3; 4; 5] erfüllt alle diese Vorgaben. In Bild 1 ist die komplette Sensoreinheit dargestellt.

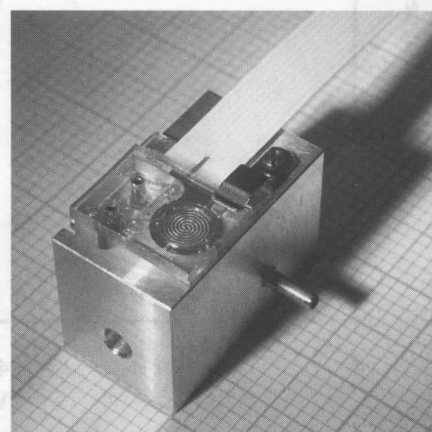


Bild 1: Sensoreinheit mit integrierter Mikromembranpumpe.

2 Sensoraufbau

Der Sensor besteht aus einem miniaturisierten Einstrahl-IR-Fotometer mit integrierter Mikromembranpumpe. Der prinzipielle Aufbau des Sensors ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Das Gehäuse des Sensors besteht aus einem kleinen Aluminiumquader (1), dessen Abmessungen 1 cm × 1,15 cm × 1,75 cm betragen. Die Meßkapillare (2) besteht aus einer Bohrung mit einem Durchmesser von 1 mm. Diese Bohrung liegt coaxial zur Längsachse des Gehäuses und ist innen poliert, um die IR-Strahlung möglichst verlustarm von der Quelle bis zum Detektor zu übertragen. An den Enden befinden sich größere Bohrungen, die vom Durchmesser und von der Tiefe so bemessen sind, daß sie jeweils den IR-Strahler (3) und den Detektor (5) aufnehmen können. Die von dem IR-Strahler ausgesandte Strahlung (7) wird längs der Meßkapillare von den in der Meßkapillare befindlichen CO₂-Molekülen teilweise ab-

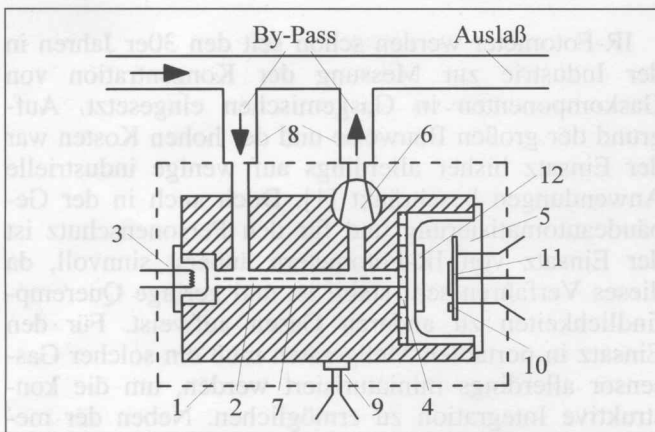


Bild 2: Schematische Darstellung des Sensors und der Gasführung. (1) Sensorgehäuse, (2) Meßkapillare, (3) IR-Strahler, (4) Interferenzfilter, (5) Detektor, (6) Mikromembranpumpe, (7) Strahlengang, (8) Anschlußstutzen, (9) Pt100-Element, (10) FET-Verstärker, (11) pyroelektrischer Kristall, (12) Siliziumfenster

sorbiert. Die Intensität der noch auf den Detektor treffenden Strahlung ist dabei ein Maß für die CO₂-Konzentration in der Meßkapillare. Der Detektor wird in Kombination mit einem Interferenzfilter (4) betrieben, das nur für Strahlung im Absorptionsbereich von CO₂ bei 4,3 µm durchlässig ist, um Querempfindlichkeiten zu vermeiden. In Bild 3 sind das Transmissionsverhalten des Interferenzfilters und das Absorptionsverhalten von CO₂ dargestellt. Die einzelnen optischen Komponenten (Interferenzfilter, Detektor, Strahler) wurden mit einem 2-Komponenten-Kleber fixiert, so daß die Meßkapillare nach außen hin hermetisch abgeschlossen ist. Der Detektor weist an seiner Stirnfläche ein Siliziumfenster (12) auf, durch das die IR-Strahlung auf den pyroelektrischen Kristall (11) gelangt, der die Strahlungsinformation in ein elektrisches Wechselspannungssignal umwandelt. Das von diesem Kristall erzeugte elektrische Signal wird von einem Feldeffekttransistor (FET) (10) verstärkt. Da der pyroelektrische Kristall nicht auf die Intensität der Strahlung, sondern auf die zeitliche Änderung der Strahlungsintensität reagiert, wird der IR-Strahler elektrisch moduliert. Die Modulationsfrequenz beträgt ca. 2 Hz. Das vom Detektor erzeugte Signal wird mit Hilfe einer Auswerteelektronik [6] aufbereitet und in eine Gleichspannung umgewandelt.

Für den Betrieb, unter Verwendung einer diskreten Wellenlänge, gilt für die Intensität der noch auf den Detektor treffenden Strahlung das Lambert-Beersche Gesetz nach [2]:

$$I(L, c, \lambda) = I_0 \cdot e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot L} \quad (1)$$

mit $I(L, c, \lambda)$: Intensität der auftreffenden Strahlung [W/m²], c : Gaskonzentration in der Meßkapillare, $I_0(\lambda)$: auf den Detektor treffende Strahlungsintensität ohne Absorption [W/m²], ε : Extinktionskoeffizient für die Wellenlänge λ [cm⁻¹], L : Länge der Meßkapillare [cm]. Da das Verfahren aber nicht bei einer diskreten Wel-

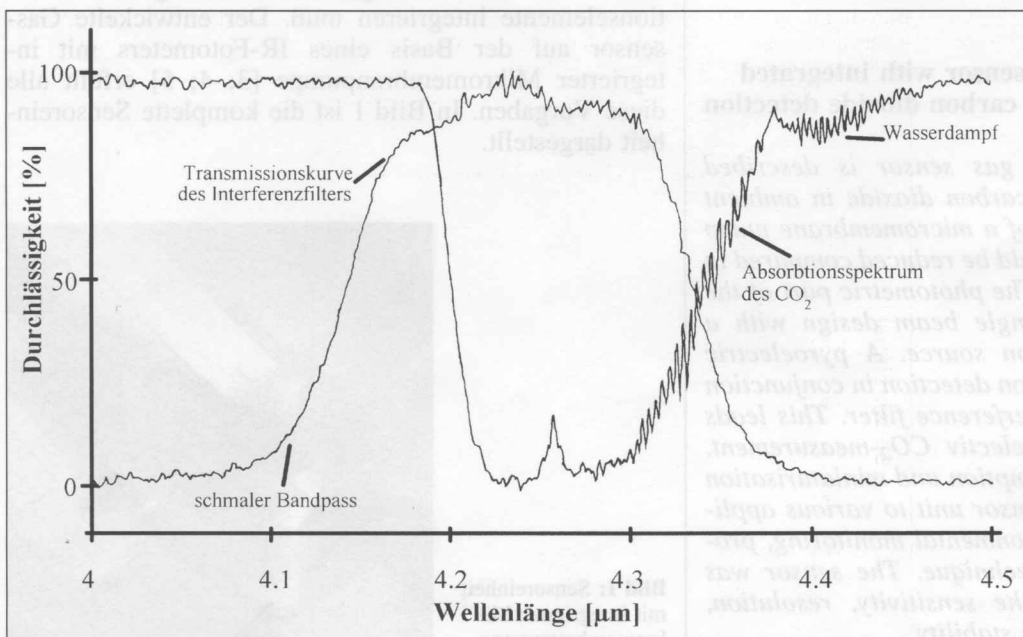


Bild 3: Absorptionsverhalten von CO₂ und Transmissionsverhalten des Interferenzfilters als Funktion der Wellenlänge im Spektralbereich von 4 bis 4,5 µm.

lenlänge (Laser), sondern in einem Wellenlängenbereich (Breitbandstrahler) arbeitet, läßt sich die gesamte, auf den Detektor auftreffende Strahlungsintensität durch folgendes Integral ausdrücken:

$$I(L, c) = \int_0^{\infty} I'(\lambda) \cdot e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot L} d\lambda, \quad (2)$$

mit I' : Intensitätsverteilung über das Spektrum [W/m^3].

Senkrecht zur Meßkapillare sind zwei weitere Bohrungen angebracht, durch die das Gas zur Meßkapillare gelangt. Eine dieser Kapillaren führt direkt zu einem Anschlußstutzen (8) außerhalb des Sensorgehäuses, während sich im anderen fluidischen Weg die Mikromembranpumpe (6) zwischen Meßkapillare und Anschlußstutzen befindet. Die Anschlüsse für die Mikromembranpumpe liegen in einer quaderförmigen Ausparung im Sensorgehäuse, so daß die Mikromembranpumpe, die an den Anschlüssen noch einen kleinen Plexiglasblock zur Stabilisierung der fluidischen Anschlüsse besitzt, im eingebauten Zustand optimal eingepaßt ist und mit ihrer Fläche auf dem Sensorgehäuse aufliegt. Das Grundgehäuse der Mikromembranpumpe hat eine Grundfläche von $10 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ und eine Höhe von $1,2 \text{ mm}$. Zum Transport des Meßgases außerhalb der Sensoreinheit können auf die Anschlußstutzen dann zusätzlich Mikroschläuche mit einem Durchmesser von 1 mm aufgesteckt werden.

Zur Temperaturmessung des Sensorgehäuses wurde ein Pt100-Element (9) verwendet, das mit seiner Stirnfläche auf dem Sensorgehäuse befestigt ist. Um Einflüsse durch Luftbewegungen zu vermeiden, wurde dieses Element zusätzlich mit einer Hülse umgeben. Die Temperaturbestimmung aus dem Pt100-Widerstand ist mit Hilfe eines Auswertegerätes durchgeführt worden.

Während des Betriebes des Sensoraufbaues stellten sich deutliche Temperaturerhöhungen ein, die auf die Verlustleistung des IR-Strahlers und der Mikropumpe zurückzuführen sind. Im stationären Zustand betrug die Temperaturerhöhung durch den Strahler ca. $4,6 \text{ K}$, während die Mikropumpe eine zusätzliche Temperaturerhöhung von $3,4 \text{ K}$ verursachte.

3 Sensorkennlinie

Bild 4 zeigt die Kennlinie des untersuchten Sensors. Sie stellt das Meßsignal (3) der Auswerteelektronik (2) in Abhängigkeit der CO_2 -Konzentration in der Meßkapillare dar. Die unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationen wurden mit einer Gasmischpumpe (1) eingestellt, die nach dem volumetrischen

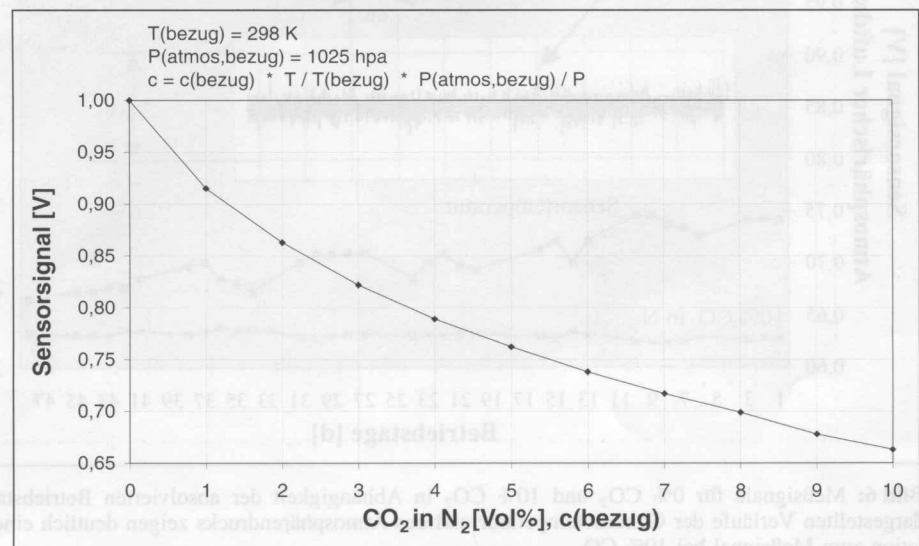
Verfahren arbeitet (Wösthoff GmbH, Bochum). Die Volumenströme der einzelnen Komponenten sind bei jedem Meßpunkt so gewählt worden, daß der Gesamtvolumenstrom am Ausgang der Gasmischpumpe konstant war. Das dabei entstandene Gasgemisch wurde der Sensoreinheit zugeführt, wobei die Bestromung allerdings nicht direkt, sondern über einen Bypass (4) erfolgte. Die Mikromembranpumpe förderte in diesem Fall nur einen kleinen Teil (ca. $150 \mu\text{l/min}$) des angebotenen Gasgemisches durch die Sensoreinheit.

Da das vom Detektor erzeugte Signal von der gesamten Absorption des CO_2 in der Meßkapillare und damit direkt von der CO_2 -Teilchenzahldichte abhängt, gilt diese Kennlinie nur für die Bezugswerte des Atmosphärendrucks und für die Gehäusetemperatur, die bei Aufnahme der Kennlinie ebenfalls gemessen wurden. Liegt bei einer späteren Konzentrationsmessung eine andere Gehäusetemperatur oder ein anderer Atmosphärendruck vor, so muß man mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase eine Korrekturrechnung durchführen. Die Teilchenzahldichte in der Meßkapillare steigt linear mit Erhöhung des Atmosphärendrucks und fällt ebenfalls linear mit Erhöhung der Gehäusetemperatur. Es ergibt sich für die Korrekturrechnung daher folgender Ausdruck:

$$c_{\text{vol}} = c_{\text{bezug}} \frac{T \cdot P_{\text{bezug}}}{T_{\text{bezug}} \cdot P} \quad (3)$$

mit c_{vol} : korrigierter Wert der CO_2 -Volumenkonzentration [Vol%], c_{bezug} : Meßwert [Vol%], P : aktueller Atmosphärendruck während der Messung [Pa], P_{bezug} : bei der Aufnahme der Kennlinie ermittelter Atmosphärendruck [Pa], T : aktuelle Gehäusetemperatur während der Messung [K], T_{bezug} : bei der Aufnahme der Kennlinie ermittelte Gehäusetemperatur [K]. Weiterhin wird das Meßsignal durch die Versorgungsspannung beeinflusst, dieser Effekt wurde durch Verwendung eines hochstabilen Netzgerätes minimiert.

Bild 4: Meßsignal (Kennlinie) der Auswerteelektronik als Funktion der CO_2 -Konzentration unter den angegebenen Bezugsgrößen. (1) Gasmischpumpe, (2) Auswerteelektronik, (3) Meßsignal, (4) Bypass.



4 Zeitverhalten

Neben den Eigenschaften im stationären Zustand, die durch die Sensorkennlinie zum Ausdruck kommen, spielt auch das dynamische Verhalten der Sensoreinheit eine große Rolle. Hiermit ist das Zeitverhalten der Sensoreinheit gemeint, das bei einer abrupten Konzentrationsänderung auftritt. Die dazu erforderlichen Messungen wurden so durchgeführt, daß das Zuleitungssystem keinen Einfluß auf die Messergebnisse hatte, da lediglich das Verhalten der Sensoreinheit untersucht werden sollte.

Zur Ermittlung der Zeitkonstanten wurde die Sprungantwort des Systems für definierte Konzentra-

tionsänderungen aufgenommen. Aus dem zeitlichen Verlauf des Meßsignals können dann die T_{10} -Zeit und die T_{90} -Zeit und damit auch die Anstiegszeit (T_A) für einen definierten Konzentrationssprung bestimmt werden. Als Maßstab für die Beurteilung des Zeitverhaltens wurde ein Konzentrationssprung von 100% N_2 (Nullgas) nach 10% CO_2 in N_2 zugrunde gelegt. Das Zeitverhalten der Sensoreinheit resultiert aus einer Überlagerung der Wirkung der Förderleistung der Mikromembranpumpe und der Geometrie (Totvolumen) der Strömungswege in der Sensoreinheit. Die Förderleistung der Mikromembranpumpe und die Querschnittsflächen der Strömungswege beeinflussen die Strömungsgeschwindigkeit des Meßgases. Die Strömungsgeschwindigkeit

(Volumenstrom) und die Länge der Meßkapillare (Kammervolumen) bestimmen das Zeitverhalten des Sensors. Bild 5 stellt den Verlauf des Meßsignals für einen Konzentrationssprung von 100% N_2 (Nullgas) nach 10% CO_2 in N_2 dar. Dazu wurde die zuvor mit 100% N_2 gespülte Sensoreinheit mit einem Gasgemisch von 10% CO_2 in N_2 beaufschlagt. Gleichzeitig wurde die Aufnahme des Meßsignalverlaufs gestartet. Die Anstiegszeit lag in diesem Fall bei 19 s, während die Totzeit durch den Ausspülvorgang der Zuleitungen ebenfalls bei 19 s liegt.

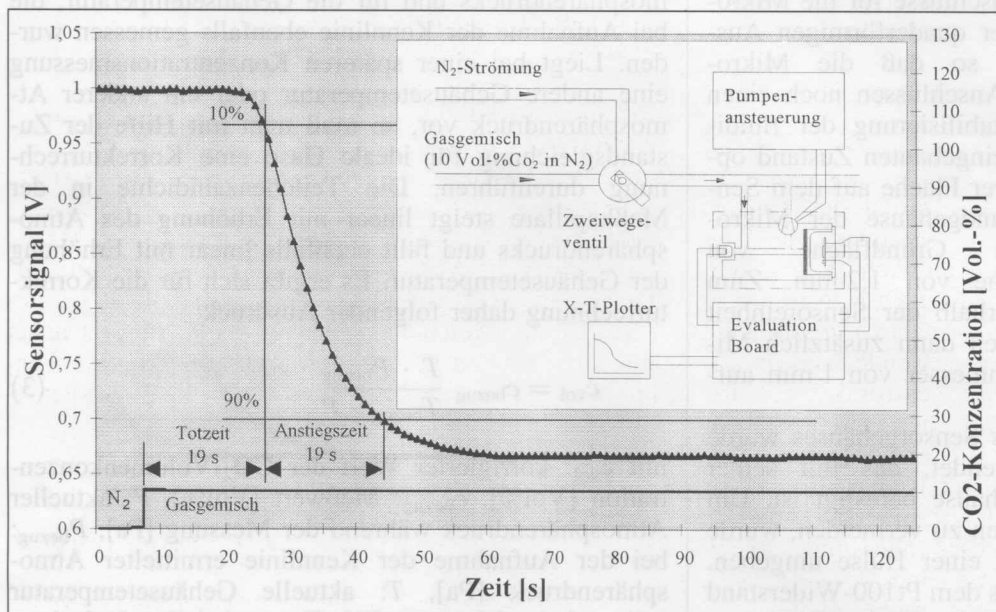


Bild 5: Zeitlicher Verlauf (Sprungantwort) des Meßsignals nach einem Konzentrationssprung von 0% CO_2 in N_2 nach 10% CO_2 in N_2 .

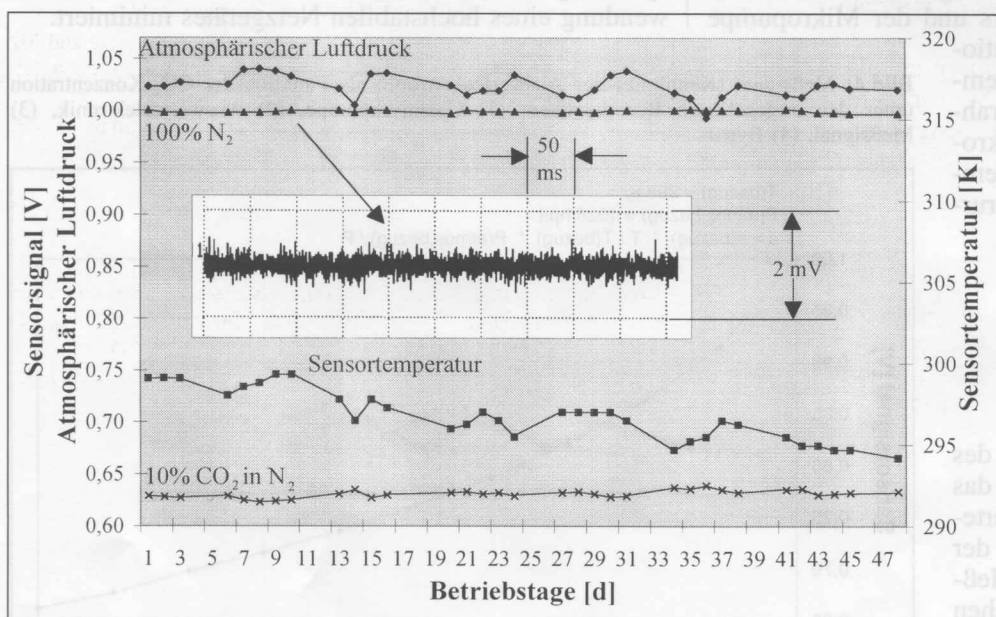


Bild 6: Meßsignale für 0% CO_2 und 10% CO_2 in Abhängigkeit der absolvierten Betriebstage. Die dargestellten Verläufe der Gehäusetemperatur und des Atmosphärendrucks zeigen deutlich eine Korrelation zum Meßsignal bei 10% CO_2 .

5 Langzeittest

Um das Verhalten des Meßsignals für definierte CO_2 -Konzentration über einen längeren Zeitraum zu untersuchen, wurde die Sensoreinheit kontinuierlich über mehrere Tage vermessen. Dazu erfolgte eine tägliche Überprüfung der Meßsignale für 100% N_2 (Nullgas) und 10% CO_2 in N_2 , um die Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdriften unabhängig voneinander zu ermitteln. Da eine Abhängigkeit des Meßsignals (Empfindlichkeit) bei 10% CO_2 auch vom Atmosphärendruck und

von der Gehäusetemperatur besteht, wurden diese Größen ebenfalls ermittelt. Bild 6 zeigt den Verlauf der Meßsignale in Abhängigkeit der Betriebsdauer. Das Meßsignal für 10% CO₂ zeigt aufgrund der Gesetzmäßigkeiten für ideale Gase eine Korrelation zum Atmosphärendruck und zur Gehäusetemperatur. Da sich bei 100% N₂ (Nullgas) keine CO₂ Moleküle in der Meßkapillare befinden, besteht in diesem Fall keine Korrelation (Signaländerung) zwischen dem Nullpunktsignal und den Umgebungsbedingungen (Druck und Temperatur). Für den Beobachtungszeitraum von 47 Tagen konnte keine tendenzielle Änderung/Drift des Meßsignals festgestellt werden, so daß man bei diesem Sensoraufbau von einer sehr hohen Langzeitstabilität ausgehen kann, die für die angesprochenen Anwendungen auch unbedingt erforderlich ist.

6 Nachweisgrenze

Ein weiterer Faktor, der die Qualität des Sensors bestimmt, ist das Rauschen des Meßsignals. Dies ist insbesondere für 100% N₂ (Nullgas) wichtig, denn hier bestimmt das Rauschen die Nachweisgrenze des Sensors. Um das Rauschen des Meßsignals zu minimieren, wurde ein RC-Glied als Tiefpaß verwendet, das an den Meßsignal-Ausgang der Auswertelektronik geschaltet wurde. Zur Reduzierung des Rauschens muß der Tiefpaß eine große Zeitkonstante haben. Sie muß aber deutlich kleiner sein als die physikalische Anstiegszeit (Ausspülzeit) der Sensoreinheit, damit das zeitliche Verhalten des gesamten Systems nur unwesentlich verändert wird, und wurde daher zu $\tau=4,7$ s gewählt. Um den Ausgang des Tiefpasses nicht zu belasten, wurde zusätzlich ein Impedanzwandler an den Ausgang der Auswertelektronik geschaltet. Auf diese Weise erfolgte die Registrierung der Rauschsignale des Sensorsystems mit einem Oszilloskop (Hameg HM1007). Die Rauschbreite beträgt unter diesen Bedingungen 0,75 mV. Mit dem so ermittelten Wert und unter Verwendung der Ableitung der Sensorkennlinie an der Stelle $c=0$ kann dann die Nachweisgrenze der Sensoreinheit berechnet werden: Für die Ableitung an der Stelle $c=0$ gilt

$$\frac{dU}{dc} (c=0) = 0,08 \text{ V}/\% \quad (4)$$

Daraus ergibt sich die Nachweisgrenze:

$$c_{\text{Nachweis}} = \frac{\Delta U_1}{dU/dc} = \frac{0,75 \text{ mV}}{0,08 \text{ V}/\%} = 94 \text{ ppm}. \quad (5)$$

Bezieht man diesen Rauschpegel von ca. 100 ppm auf einen Meßbereich von 1 Vol.-% CO₂, so liegt die Nachweisgrenze dann bei 1% bezogen auf den Meßbereichsendwert.

7 Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, daß der vorgestellte Sensor sich sehr gut für eine genaue und langzeitstabile Kohlendioxidmessung eignet. Insbesondere die Nachweisgrenze von 100 ppm CO₂ und die hohe Nullpunktstabilität eröffnen zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten z.B. in der Medizintechnik. Die Zeitkonstante des Sensors von z.Z. 19 s kann allerdings durch eine Pumpe mit einer höheren Pumpleistung noch verbessert werden, um ein schnelleres Ansprechverhalten zu erreichen. Der Sensor eignet sich in der momentanen Ausführungsform für einen Meßbereich von 0...1 Vol.-% CO₂ (geringe Linearitätsabweichungen) oder 0...10 Vol.-% CO₂ (nichtlineare Kennlinie). Für kleinere Meßbereiche (0...100 ppm o.ä.) müßte die Meßkapillare deutlich verlängert werden (10 bis 20 cm), um den gleichen Meßeffect wie bei 1 Vol.-% zu erreichen. In diesem Fall bestimmt daher die Küvettenlänge die Gesamtdimension des Sensoraufbaues, so daß eine „Miniaturisierung“ in diesem Fall nicht mehr gegeben ist.

Literatur

- [1] Luft, K. F., Schaefer, W. und Wiegler, G.: 50 Jahre NDIR-Gasanalyse. *Technisches Messen* 60 (1993), S. 363–371.
- [2] Staab, J.: Industrielle Gasanalyse. Oldenbourg-Verlag, München (1993).
- [3] Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik: Begleitunterlagen zur Mikromembranpumpe (1996).
- [4] Micromembrane Pump Manufactured by Molding. Proc. 4th Int. Conf. on New Actuators, Actuator '94, Bremen (1994).
- [5] Measurements of Physical Parameters with Ultrasound and Microdiaphragms. Proc. Micro Electro Mechanical Systems '95, Amsterdam (1995) S. 139–144.
- [6] Unterlagen der Firma Sensor Devices GmbH, Dortmund, EVB1 (1996).

Dipl.-Ing. Markus Erbel, Dipl.-Ing. Andreas Gehrke und Prof. Dr. Gerhard Wiegler, Fachhochschule Dortmund, Zentrum für Umweltmeßtechnik und Chemosensorik, D-44139 Dortmund.

Dipl.-Ing. Stephan Korbmacher, Sensor Devices Gesellschaft für Gasmessung mbH, D-44034 Dortmund.