

Einzel- und Doppelmikrofonmessungen in einem Helmholtz-Resonator zur Bestimmung der CO₂-Konzentration in trockener Stickstoffatmosphäre

*Sebastian Kindorf^{1,2}, Christian Weber^{1,2}, Mike Benkendorf¹, Benedikt Bierer^{1,2}, Jürgen Wöllenstein^{1,2},
Franz Jost¹, Matthias Eberl³*

¹Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg

²Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK, Professur für Gassensoren, Universität Freiburg,
Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

³Infineon AG, Am Campeon 1-15, 85579 Neubiberg, Germany

Zusammenfassung

Akustische Resonanzverfahren ermöglichen eine kostengünstige und schnell ansprechende CO₂-Detektion auf der Basis der Schallgeschwindigkeitsänderung in Gasgemischen. Motiviert durch die Anforderungen an die CO₂-Leckagedetektion in Maschinenräumen, die mit R744-Kälteanlagen ausgestattet sind und in denen Dichtungsversagen zu einer raschen Kohlendioxidanreicherung führen kann, wurden zwei auf MEMS-Dual-Backplate-Mikrofonen basierende Helmholtz-Resonator-Sensorkonzepte untersucht: ein Einzelmikrofon- sowie ein Doppelmikrofonsystem. Die innere Geometrie der MEMS-Mikrofone bildet dabei jeweils einen Helmholtz-Resonator, dessen Resonanzfrequenz direkt von der Schallgeschwindigkeit des eingeschlossenen Messgases abhängt. Beide Systeme wurden als Aufsteckplatinen für ein PSoC5-Entwicklungsboard implementiert und seriell in einem gemeinsamen Strömungsweg in trockener Stickstoffatmosphäre betrieben. Die CO₂-Konzentration wurde schrittweise von 0 bis 50.000 ppm variiert. Beide Konzepte zeigen eine deutliche und reproduzierbare Signaländerung, wobei das Doppelmikrofonsystem eine höhere Signalstabilität aufweist. Die erzielte Nachweisgrenze beträgt $3\sigma = 2.732$ ppm (Einzelmikrofon) bzw. $3\sigma = 1.040$ ppm (Doppelmikrofon).

Keywords: Gassensorik, Ultraschall, Helmholtz-Resonator, Dual-Backplate Mikrofon, Leckdetektion

Motivation

Die Erkennung von CO₂-Leckagen in Industrieanlagen ist für die Arbeitssicherheit, den Umweltschutz und die Anlagenverfügbarkeit unerlässlich. In Maschinenräumen mit R744-Kälteanlagen kann Dichtungsversagen zu einer raschen Kohlenstoffdioxidanreicherung führen. Benötigt wird ein kostengünstiges Sensorsystem mit schnellen Ansprechzeiten, hoher Zuverlässigkeit und der Fähigkeit, auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen eine robuste Erfassung zu gewährleisten [1]. Akustische Verfahren, die auf resonanzbasierten Messprinzipien beruhen, adressieren diese Anforderungen. Die Schallgeschwindigkeit in Gasgemischen ist eine Funktion der Zusammensetzung sowie der Zustandsgrößen Temperatur, Druck und Feuchte. Die daraus resultierenden Änderungen verschieben die Resonanzfrequenz messbar und lassen Rückschlüsse auf die CO₂-Konzentration zu [2].

Messprinzip und Ansatz

Mikrofonbasierte Resonatorsysteme zur CO₂-Messung nutzen den physikalischen

Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung eines Gasgemisches und der darin herrschenden Schallgeschwindigkeit. Die Schallgeschwindigkeit c in einem idealen Gas ist durch die thermodynamische Zustandsgleichung in Gl. (1) definiert:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

wobei γ der adiabatische Exponent, R die universelle Gaskonstante, T die absolute Temperatur und M die mittlere molare Masse des Gases ist [3]. Da CO₂ eine deutlich höhere molare Masse als die anderen Bestandteile von Luft besitzt und zudem einen kleineren adiabatischen Exponenten aufweist, nimmt die Schallgeschwindigkeit mit zunehmendem CO₂-Anteil im Gasgemisch messbar ab. Die molare Masse von CO₂ beträgt 44,01 g/mol gegenüber 28,97 g/mol für trockene Luft, während der adiabatische Exponent mit 1,289 ebenfalls unter dem von Luft mit 1,400 liegt [4,5].

Zur Messung der Schallgeschwindigkeit wird ein akustischer Resonator eingesetzt. Ein Helmholtz-Resonator besteht aus einem

geschlossenen Gasvolumen V , das über eine Öffnung der Querschnittsfläche A und der effektiven Länge L_{eff} mit der Umgebung verbunden ist. Das eingeschlossene Gas wirkt dabei als pneumatische Feder, während das im Hals befindliche Gasvolumen als schwingende träge Masse fungiert. Basierend auf dieser Masse-Feder-Analogie ergibt sich die Eigenfrequenz des Resonators nach Gl. (2) [6]

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot L_{\text{eff}}}}. \quad (2)$$

Die effektive Halslänge $L_{\text{eff}} = L + \Delta L$ enthält dabei eine akustische Endkorrektur ΔL , welche die mitschwingende Luftmasse außerhalb des Halses berücksichtigt. Der entscheidende Aspekt für die Sensoranwendung ist die direkte Proportionalität zwischen der Eigenfrequenz und der Schallgeschwindigkeit im eingeschlossenen Gas. Eine Änderung der CO_2 -Konzentration verändert c und verschiebt damit f_0 messbar [6]. Da die Messgröße die Resonanzfrequenz f_0 und nicht die Signalamplitude ist, weist das Verfahren eine inhärente Robustheit gegenüber amplitudenabhängigen Störeinflüssen wie Schwankungen der Mikrofonempfindlichkeit oder des Schalldruckpegels auf.

Dieses Prinzip wird mithilfe von MEMS-Mikrofonen (Infineon Technologies AG) umgesetzt, deren innere Geometrie einen solchen Resonator bildet. Ein MEMS-Mikrofon mit Dual-Backplate-Architektur besteht aus einer auslenkbaren Membran, die zwischen zwei perforierten Gegenelektroden (Backplates) eingespannt ist, wobei eine Backplate zur akustischen Anregung und die andere zur kapazitiven Signalauswertung dient. Der hinter der Membran eingeschlossene Raum bildet zusammen mit dem akustischen Einlass eine Kavität, der als Helmholtz-Resonator fungiert. Da sich das Messgas direkt in diesem Resonanzraum befindet, reagiert das System unmittelbar auf jede Änderung der lokalen Schallgeschwindigkeit, ohne dass ein separater externer Resonator erforderlich ist [7].

Es lassen sich zwei konstruktive Anordnungen unterscheiden. Die beiden Systeme sind in Abb. 1 dargestellt. Im Einzelmikrofonsystem übernimmt eine Backplate des Dual-Backplate-Mikrofons die akustische Anregung, während die andere Backplate das Signal kapazitiv ausliest. Das Rückvolumen des Chips bildet zusammen mit dem akustischen Einlass einen Helmholtz-Resonator, dessen Resonanzfrequenz direkt von der Schallgeschwindigkeit im eingeschlossenen Messgas abhängt. Im Doppelmikrofonsystem sind zwei Dual-Backplate-Mikrofone gegenüberliegend angeordnet, deren akustisch gekoppelte Kavitäten einen gemeinsamen Resonator bilden. Die in beiden Kammern erzeugten Druckwellen schwingen

gegenphasig, und das Ausgangsmikrofon erfasst die Resonanzfrequenz des gekoppelten Systems [8].

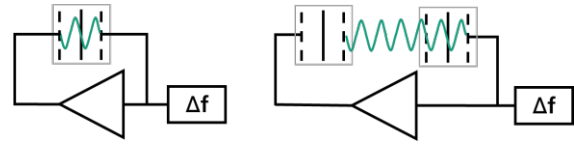


Abb. 1: Resonanzbasierte CO_2 -Messung mit Einzelmikrofon (links) und Doppelmikrofon (rechts). Die konzentrationsabhängige Frequenzverschiebung Δf dient als Messgröße.

Da CO_2 eine höhere molare Masse als N_2 besitzt, sinkt c mit zunehmendem CO_2 -Anteil, was zu einer messbaren Verschiebung von f_0 führt. Aufgrund der Wurzelabhängigkeit $c \propto 1/\sqrt{M_{\text{mix}}}$ ist dieser Effekt bei höheren CO_2 -Konzentrationen weniger ausgeprägt, was sich theoretisch in der abnehmenden Empfindlichkeit widerspiegelt.

Relevante Störgrößen sind insbesondere Temperaturschwankungen, da die Schallgeschwindigkeit gemäß Gl. (1) proportional zu $\sqrt{T}$ ist und sich eine Temperaturänderung daher direkt als scheinbare Konzentrationsänderung auswirkt. Ebenso beeinflusst die Luftfeuchte die Schallgeschwindigkeit, da Wasserdampf eine geringere molare Masse (18,02 g/mol) als Stickstoff (28,01 g/mol) als auch Kohlenstoffdioxid (44,01 g/mol) besitzt und somit c erhöht, was ebenfalls als Konzentrationsänderung interpretiert wird. Druckschwankungen beeinflussen die mechanische Vorspannung der MEMS-Membran und verschieben dadurch deren Resonanzfrequenz, was zu einem systematischen Mess-Offset führt. Bei den Einzelmikrofon- und Doppelmikrofonsystemen für die resonante Ultraschallmessung handelt es sich um rein akustische Messmethoden, die nicht selektiv gegenüber anderen Gasen mit anderer molarer Masse sind.

Messumgebung und Auswertung

Zur experimentellen Validierung wurden zwei Sensorplatinen entwickelt und aufgebaut, jeweils eine für das Einzelmikrofon- und das Doppelmikrofonsystem. Beide Platinen umfassen jeweils die vollständige Signalkette, von der akustischen Anregung bis zur digitalen Frequenzausgabe, und sind als Aufsteckmodule für ein PSoC5-Entwicklungsboard ausgeführt. Im Messaufbau werden die Sensorkonzepte seriell in einem gemeinsamen Strömungsweg betrieben, sodass das Einzel- und das Doppelmikrofonsystem demselben N_2/CO_2 -Gemisch ausgesetzt sind. Die Messungen wurden in einer definierten trockenen Stickstoffatmosphäre

durchgeführt. Dazu wurde dem N_2 -Trägergasstrom stufenweise CO_2 beigemischt, wobei die CO_2 -Konzentration in Schritten von 10.000 ppm (1 %) von 0 bis 50.000 ppm (5 %) erhöht wurde. Der Gesamtvolumenstrom wurde durch entsprechende Anpassung des N_2 -Anteils konstant gehalten, sodass ausschließlich die Gaszusammensetzung variierte. Die Konzentrationsrampe von 0 bis 50.000 ppm wurde dreimal nacheinander durchlaufen, wobei zwischen den Zyklen jeweils auf 0 ppm zurückgekehrt wurde, um die Reproduzierbarkeit der Messsignale zu bewerten und einen möglichen Offset-Drift zu erfassen. Die Laborumgebung wies dabei eine stabile Temperatur sowie eine vernachlässigbare Restfeuchte auf, sodass die im vorherigen Kapitel beschriebenen Störgrößen Temperatur und Luftfeuchte für diese Messreihe als konstant betrachtet werden können. Temperatur, relative Feuchte und Druck werden dennoch kontinuierlich mit einem BME280 (Bosch Sensortec) gemessen und aufgezeichnet, sie werden derzeit jedoch nicht zur aktiven Kompensation der Messwerte verwendet. Änderungen der CO_2 -Konzentration beeinflussen die Schallgeschwindigkeit und damit die Resonanzfrequenz. Aus der Frequenzverschiebung Δf der Einzel- bzw. Doppelmikrofon-Resonanzen wird die CO_2 -Konzentration abgeleitet. Der in Abb. 2 dargestellte Messaufbau umfasst jeweils eine Sensorplatine für die Einzel- und Doppelmikrofonmessung, die auf ein PSoC5-Entwicklungsboard aufgesteckt sind. Die Platine übernimmt Anregung, Rückkopplung sowie die analoge und digitale Signalverarbeitung. Resonanzfrequenzen, Temperatur, relative Feuchte und Druck werden anschließend an einen PC zur Auswertung übertragen.



Abb. 2: PSoC 5-Entwicklungsboard mit aufgesetzter Sensorplatine. Links befindet sich das Einzelmikrofonsystem, rechts das Doppelmikrofonsystem. Ein 3D-gedruckter Gehäusekopf mit Gasanschlüssen dient zur Integration der Sensoren in den Messplatz. Die Dual-Backplate-Mikrofone sind auf der Sensorplatine montiert.

Diskussion

CO_2 -Konzentrationsmessungen von 0 bis 50000 ppm zeigen in beiden Systemen eine klare und reproduzierbare Signaländerung, was die grundlegende Funktionalität beider Sensorkonzepte bestätigt. Die Messergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Signale auf ihre jeweilige Resonanzfrequenz bei 0 ppm CO_2 normiert, sodass die dargestellten Werte die relative Frequenzverschiebung repräsentieren.

Das Doppelmikrofonsystem weist sowohl eine höhere Signalstabilität als auch geringere Driftphänomene auf. Kurzzeitige Druckstöße beim Schalten der Massendurchflussregler sind im Doppelmikrofonsignal als deutliche Transienten erkennbar.

Eine abnehmende Empfindlichkeit bei höheren CO_2 -Anteilen wäre gemäß Gl. (1) zu erwarten, ist jedoch im vorliegenden Messbereich von 0-50.000 ppm nicht erkennbar. Die Nachweisgrenze beträgt für das Einzelmikrofonsystem $3\sigma = 2.732$ ppm sowie für das Doppelmikrofonsystem $3\sigma = 1.040$ ppm. Über die Messdauer von 333 min ist ein Offset-Drift von 5.490 ppm feststellbar, der auf eine Temperaturänderung zurückzuführen ist. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die prinzipielle Eignung beider Ansätze für die CO_2 -Leckdetektion, wobei das Doppelmikrofonsystem hinsichtlich Signalqualität und dynamischem Verhalten Vorteile aufweist.

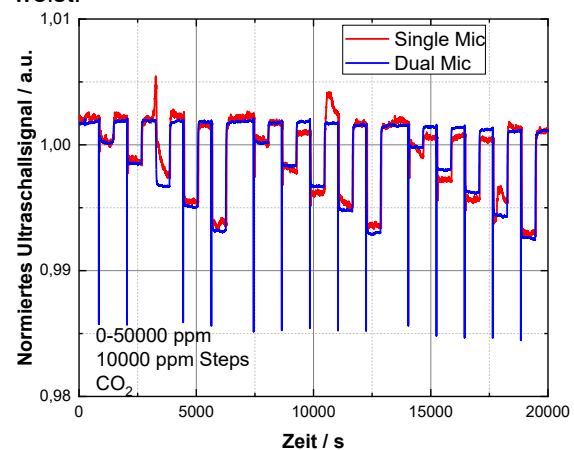


Abb. 3: Normierte Mikrofonensignale bei CO_2 -Konzentrationen von 0 bis 50.000 ppm in Schritten von 10.000 ppm in trockener Stickstoffatmosphäre. Rot: Einzelmikrofon ($3\sigma = 2.732$ ppm), Blau: Doppelmikrofon ($3\sigma = 1.040$ ppm). Das Doppelmikrofonsystem weist eine höhere Signalstabilität auf. Ein temperaturbedingter Offsetdrift von 5.490 ppm ist über die Messdauer von 333 min erkennbar.

Fazit & Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass als Helmholtz-Resonatoren aufgebaute MEMS-Mikrofone im Einzel- und Doppelmikrofonsystem prinzipiell zur akustischen CO₂-Leckdetektion in R744-Kälteanlagen geeignet sind. Die untersuchten Konzentrationsstufen von 10.000 ppm (1 %) sind mit beiden Aufbauten klar auflösbar, wobei das Doppelmikrofonsystem hinsichtlich Signalstabilität und geringeren Driftphänomenen Vorteile gegenüber dem Einzelmikrofonsystem zeigt.

Zukünftige Arbeiten adressieren zunächst eine Erweiterung des Messbereichs auf niedrigere CO₂-Konzentrationen mit feinerer Stufung, um die tatsächliche Auflösungsgrenze des Systems besser zu charakterisieren und die Nachweisgrenze von derzeit $3\sigma = 2.732$ ppm des Einzelmikrofon und $3\sigma = 1.040$ ppm des Doppelmikrofon zu prüfen. Darüber hinaus soll eine aktive Kompensation der erfassten Umgebungsgrößen Temperatur, relative Feuchte und Druck implementiert werden, um den Sensor auch unter variablen Umgebungsbedingungen zuverlässig betreiben zu können. Eine erweiterte Elektronik ist geplant, die auch die Auswertung von Signalamplitude und Dämpfung ermöglicht. Zusätzlich soll sie flexible Anregungssignale wie Sinus- und Pulsanregung unterstützen, wodurch ergänzend akustische Laufzeitmessungen (Time-of-Flight) zur Schallgeschwindigkeitsbestimmung realisiert werden können.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die Förderung des Projekts EiSBaEr im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms (Förderkennzeichen 03EN5048D).

Literaturnachweis

- [1] CEN, „EN 378-1 bis EN 378-4:2016 – Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements,” European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2016.
- [2] Infineon Technologies AG, „Gas sensor containing an ultrasonic resonator and use for the detection of gases,” U.S. Patent US12326422B2, Jun. 2025.
- [3] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Springer, New York, NY, USA, 2019.
- [4] National Institute of Standards and Technology, „Carbon Dioxide – Gas Phase Thermochemistry Data,” NIST Chemistry WebBook, SRD 69. [Online]. Verfügbar: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=124-38-9> [Zugriff am: Apr. 2025].
- [5] D. R. Lide (Hrsg.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85. Aufl., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2004.
- [6] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, und J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4. Aufl., Wiley, New York, NY, USA, 2000.
- [7] S. Anzinger, C. Bretthauer, H. S. Wasisto, und A. Dehé, „Dual-Backplate CMUTs With Wide Bandwidth and Low Driving Voltage for Airborne Applications,” *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, Bd. 70, Nr. 10, S. 1286–1294, Okt. 2023.
- [8] J. Rouxel, J.-G. Coutard, S. Gidon, O. Lartigue, S. Nicoletti, B. Parvitte, R. Vallon, V. Zéninari, und A. Glière, „Miniaturized Differential Helmholtz Resonators for Photoacoustic Trace Gas Detection,” *Sens. Actuators B: Chem.*, Bd. 236, S. 1104–1110, Nov. 2016.