

LED basierter, miniaturisierter photoakustischer CO₂-Sensor zur Umgebungsluftüberwachung

LED Based miniaturized Photoacoustic CO₂-Sensor for the Detection in Ambient Air

Christian Weber^{1,2}, Hassan Yassine¹, André Eberhardt¹, Dr. Katrin Schmitt^{1,2}, Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein^{1,2}

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

²Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, Professur für Gassensoren, Universität Freiburg, Deutschland

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein LED basierter photoakustischer Sensor zur CO₂-Messung in Umgebungsluft aufgebaut und charakterisiert. Der Fokus lag dabei auf einer möglichst hohen Integrationsdichte aller funktionalen Komponenten und der damit einhergehenden Miniaturisierung. Mittels akustischer und optischer Simulationen wurde die Auslegung eines photoakustischen Detektors durchgeführt, der als Kernstück des Sensors fungiert. Mit einer LED im mittleren Infrarot und einer Mikrocontroller-basierten Elektronik konnte ein vollständig integrierter Sensor mit Abmaßen von 8 x 8 x 17,5 mm³ realisiert werden. In Charakterisierungsmessungen konnte eine 3 σ -Nachweisgrenze von 30 ppm bei einer Messzeit von 1 s bestimmt werden.

Abstract

In this work an LED based photoacoustic sensor for the detection of ambient CO₂ was developed and characterized. The focus was set on a high integration density and the subsequent miniaturisation of the concept. The core of the sensor is the custom build photoacoustic detector, whose construction was done with the aid of acoustic and optical simulations. With a mid-IR LED and microcontroller-based electronics, a fully integrated sensor with dimensions of 8 x 8 x 17,5 mm³ was realized. Its characterization showed a 3 σ detection limit of 30 ppm a measurement time of 1 s.

1 Einleitung

Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches als Stoffwechselprodukt von Menschen und Tieren ausgeatmet wird, kann sich in geschlossenen Innenräumen sammeln. In erhöhten Konzentrationen ab 5000 ppm verursacht es Symptome wie Kopfschmerzen, Schläfrigkeit und verminderte kognitive Leistungsfähigkeit^[1]. Daneben zeigt CO₂ auch eine Korrelation zu anderen gesundheitsschädlichen Stoffwechselprodukten oder aerosolgetragenen Krankheitserregern, die sich in der Innenraumluft anreichern. Die Messung von CO₂ eignet sich daher als Führungsgröße einer bedarfsgerechten Lüftungsregelung.

Derzeit erhältliche kommerzielle Sensoren für CO₂ arbeiten überwiegend nach dem NDIR-Prinzip unter der Verwendung eines thermischen Strahlers als Infrarotquelle. Dabei lässt sich die Konzentration des Zielgases über die Abschwächung der Strahlung entlang einer Messstrecke über das Lambert-Beer'sche Gesetz ermitteln^[2]. Die Auswahl des für das Zielgas relevanten Spektralbereichs erfolgt in der Regel über Interferenzfilter. Obwohl dieses Messverfahren einen zuverlässigen und einfachen Senso-raufbau ermöglicht, sind der Miniaturisierung durch die, mit den breitbandigen Filtern einhergehende, beschränkte Sensitivität Grenzen gesetzt.

Diesem Nachteil kann durch die Verwendung eines photoakustischen Detektors begegnet werden. Im Detektor ist das Zielgas zusammen mit einem Mikrofon hermetisch eingeschlossen. Über den photoakustischen Effekt wird die Energie der einfallenden Strahlung in akustische Druckschwankungen umgewandelt, welche durch das Mikrofon

detektiert werden können. Als Konsequenz der Gasfüllung ist der Detektor besonders sensitiv in Spektralbereichen in denen das Zielgas stark absorbiert. Damit hat der Detektor den nötigen Spektralfilter bereits inhärent integriert und sorgt bei schmallinigen Gasen wie CO₂ für eine signifikante Steigerung der Sensitivität. Ein solches Photometer nach dem photoakustischen „Zwei-Kammer-Prinzip“ eignet sich damit hervorragend für die Miniaturisierung.

2 Aufbau und Durchführung

Das Kernstück des CO₂ Sensors bildet der photoakustische Detektor (dargestellt in Abb. 1a). Dieser besteht aus einem vergoldeten Stahlgehäuse, in welches ein Bottom-Port Mikrofon (SPV08A0LR5H-1, Knowles) auf einer Interposer-Platine eingebracht wurde. Die Innendimensionen von 3 x 3 x 3 mm³, aus denen sich nach Abzug der Elektronikkomponenten ein aktives Gasvolumen von ca. 12 μ l ergibt, wurden über akustische und optische Simulationen ermittelt. Als Strahlungszugang dient ein beidseitig antireflexbeschichtetes (Si₃N₄) Siliziumfenster, das über eine Ti-Ag Metallisierung auflötfähig gemacht wurde. Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels Glasdurchführungen. Um das Zielgas hermetisch im Detektor einzuschließen, wurden die Detektoren unter CO₂-Atmosphäre mit dem Fenster verlötet. Als Strahlungsquelle wurde eine LED der Firma Hamamatsu (L15895-0430M) verwendet. Die Ausgangsleistung der LED ist mit 1 mW erheblich geringer als die eines thermischen Strahlers, jedoch ist die schnellere

Modulierbarkeit in Verbindung mit dem photoakustischen Detektor vorteilhaft.

Der optische Pfad zwischen LED und Detektor wird über einen 8 mm langen Kanal mit 3 mm Durchmesser im Aluminiumgehäuse des Sensors gebildet. Über zwei kleine Löcher wird der Gaszugang zum optischen Pfad sichergestellt wobei eine Membran zum Schutz vor Verschmutzung auf der Oberseite angebracht werden kann.

Unterhalb des Aluminiumgehäuses wurde die Elektronik zur Datenverarbeitung und zum Ansteuern der LED untergebracht. Sie basiert auf einem PSoC6-Mikrocontroller (CY8C6347BZI, Infineon AG), einem spannungsgesteuerten Stromtreiber und einer Verstärker- und Filterschaltung für das Mikrofonsignal. Zur Datenverarbeitung wurde auf dem Mikrocontroller ein digitaler Point-by-Point Lock-In Algorithmus implementiert, welcher das digitalisierte Mikrofonsignal mit 500 kSps verarbeitet. Mittels eines UART-Interfaces können die Modulationsparameter der LED und die Eigenschaften des Lock-In Filters eingestellt werden. Die Messdaten werden ebenfalls über diese Schnittstelle übertragen. Eine Kontaktierung des Sensors erfolgt über SMD-Pads auf der Unterseite.

Der insgesamt $8 \times 8 \times 17,5 \text{ mm}^3$ messende Sensor ist in Abb. 1b dargestellt.

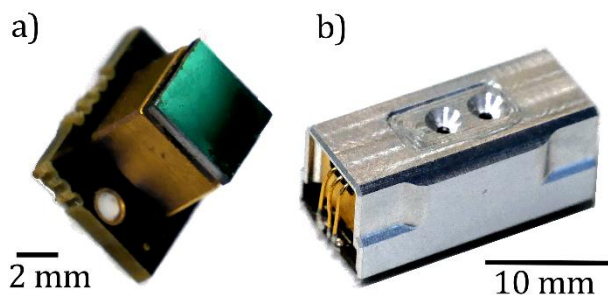


Abbildung 2: (a) Entwickelter photoakustischer Detektor in dem CO₂ hermetisch eingeschlossen wurde. (b) Vollständig aufgebauter Sensor

3 Methode und Ergebnisse

Für die Charakterisierung von Sensitivität und Auflösung wurde der Sensor am Gasmessplatz der Professur für Gassensoren vermessen. Die LED wurde mit Strom von 90 mA (quasi continuous wave) bei 500 Hz moduliert. Die Zeitkonstante des digitalen Lock-In Filters wurde auf 1 s festgelegt, um ebenfalls das dynamische Verhalten der Gasdiffusion in den optischen Pfad beurteilen zu können.

Der Sensor wurde in der Messung ohne Temperaturkompensation betrieben, weshalb die Messung erst nach einer Aufheizphase von 15 min gestartet wurde.

In Abb. 2 ist das Ergebnis dieser Messung dargestellt. Bei 1 s Mittelungszeit können alle Stufen von 50, 100 und 200 ppm gut unterschieden werden. Das Rauschen liegt bei ca. 0,09% des Fullscale Signals. Aus der Messung konnte eine Sensitivität von etwa. 1%_{FS}

pro 100 ppm CO₂ bestimmt werden. Damit ergibt sich eine 3 σ -Nachweisgrenze von 30 ppm.

Für die Konzentration von CO₂ in der Umgebungsluft wäre eine Nachweisgrenze von 100 ppm ausreichend, die bei einer Zeitkonstante von 80 ms erreicht werden könnte. Damit und einem Messintervall von 1 min kann ein durchschnittlicher Stromverbrauch von lediglich 150 μA erreicht werden. Die t_{90} -Ansprechzeit lag bei der Messung bei 6 s.

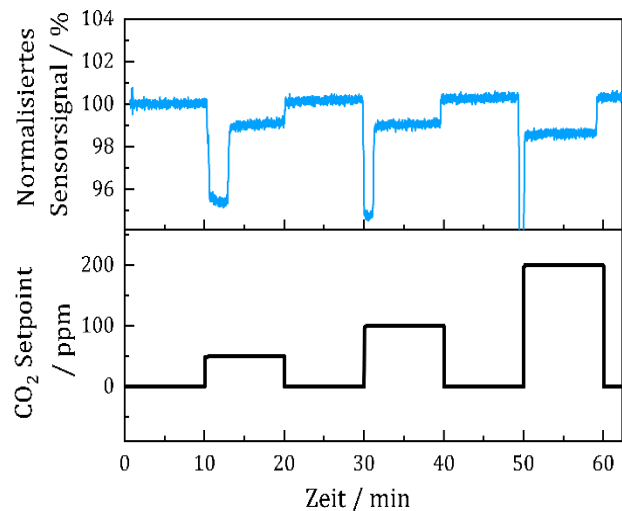


Abbildung 1: Messergebnis der Sensitivitätscharakterisierung. Die Überschwinger zu Beginn der Stufen sind auf das Einregelverhalten des Gasmessplatzes zurückzuführen. Über die Messdauer von einer Stunde zeigt sich eine geringe Temperaturdrift des nicht temperaturkompensierten Sensors.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein miniaturisierter CO₂-Sensor für Umgebungsluft entwickelt, der nach dem Zweikammer-Prinzip arbeitet. Für den Sensor wurde ein optimierter Detektor simuliert und aufgebaut. Zusammen mit einer infraroten LED wurde ein komplett integrierter Sensor mit Abmessungen von $8 \times 8 \times 17,5 \text{ mm}^3$ aufgebaut. In ersten Charakterisierungsmessungen konnte eine Nachweisgrenze von 30 ppm bei einer Mittelungszeit von 1s erreicht werden.

5 Literatur

- [1] M. J. Jafari, A. A. Khajevandi, S. A. Mousavi Najarkola, M. S. Yekaninejad, M. A. Pourhoseingholi, L. Omid, and S. Kalantary, "Association of sick building syndrome with indoor air parameters," *Tanaffos*, vol. 14, no. 26221153, pp. 55–62, 2015.
- [2] B. S. Lee, K. H. Kim, Y. D. Yeom, H. T. Kim, J. H. Lee, G. S. Kim, and C. H. Lim, "A Study on CO₂/CO Dual Sensor Module by NDIR Method," *Advanced Engineering Forum*, vol. 2-3, pp. 541–546, 2011.