

Untersuchungen zum Einsatz von Puffergasen in photoakustischen Detektoren zur Optimierung von CO₂-Sensoren

Jochen Huber¹, Norman Catalan¹, J. Wöllenstein²

¹Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Heidenhofstraße 8, 79110 Freiburg

²IMTEK – Institut für Mikrosystemtechnik, Technische Fakultät der Universität Freiburg, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

E-Mail: jochen.huber@ipm.fraunhofer.de, Telefon: 0761 / 8857 744

Zusammenfassung

Der photoakustische Effekt wird zur Detektion von IR-aktiven Gasen genutzt. Die dabei absorbierte Strahlungsenergie wird in einem geschlossenen Volumen als Änderung des Drucks detektiert. Die Druckamplitude hängt dabei sowohl von der Anzahl absorbierender Moleküle ab, als auch von der Zusammensetzung des Gasgemisches. Ein beigemischtetes inertes Puffergas kann als effizienter Stoßpartner die Druckausbreitung verbessern oder die Absorption direkt beeinflussen. Es werden Untersuchungen zur optimalen Puffergasmischungen präsentiert und der theoretische Hintergrund dargestellt. Ein entwickelter Sensoraufbau zur Variation der Gasmischung wird beschrieben. Labormessungen zeigen, dass die Beimischung von 45% Argon zu Kohlendioxid ein verbessertes Drucksignal ergibt.

Keywords: Gassensorik, Photoakustik, Kohlendioxid, Puffergase, Infrarot

Einleitung

Die Messung von Kohlendioxid (CO₂) in Innenräumen zur Überwachung der Luftqualität hat einen großen Stellenwert auf dem Gassensormarkt. Typische Innenräume sind Schulen, öffentliche Gebäude, Veranstaltungshallen oder öffentliche Verkehrsmittel. Weitere Parameter, die die Luftqualität beeinflussen sind Temperatur, Feuchte und flüchtige organische Verbindungen (VOCs). In vielen Fällen korrelieren die CO₂- und die VOC-Konzentration. Durch die Anwesenheit vieler Personen in einem geschlossenen Raum kann der CO₂-Gehalt durch die Atmung sehr schnell auf physiologisch einschränkende Werte ansteigen. Dies hat eine Minderung der Wahrnehmungs- und Konzentrationsfähigkeit zur Folge und das Wohlbefinden der betreffenden Personen ist vermindert. Schon geringe Erhöhungen der Kohlendioxid-Konzentration von der normalen Grundkonzentration auf ca. 1000 ppm beeinflussen die Konzentrationsfähigkeit eines Menschen und es sollte gelüftet werden [1]. In den meisten Fällen wird, wenn überhaupt vorhanden, die Luftqualität über eine hohe Austauschrate der Innenraumluft verbessert. Das hat jedoch zur Folge, dass auch in Zeiten

mit wenig oder gar keinen sich im Raum befindenden Personen die Luft ständig und in hohem Maße ausgetauscht wird. Dadurch wird eine große Menge an Energie verbraucht. Eine Luftqualitätsüberwachungssensorik macht eine bedarfsgerechte Lüftung möglich, was zusätzlich zur Luftqualitätsverbesserung auch eine signifikante Energieeinsparung bedeutet. CO₂ ist ein stark infrarotaktives (IR-aktives) Gas. Aus diesem Grund ist die IR-Spektroskopie ein geeignetes Verfahren, um CO₂ selektiv und sensitiv zu detektieren. Sämtliche Messprinzipien, die auf Interaktion der Moleküle mit Oberflächen oder Substanzen basieren, sind für CO₂ nicht geeignet, da das CO₂-Molekül chemisch inert ist.

Die photoakustische Spektroskopie ist eine Form der Infrarotspektroskopie und umfasst die Menge aller Methoden, die auf Basis des photoakustischen Effekts arbeiten. Dieser beschreibt die Entstehung einer akustischen Druckwelle in einer Messprobe aufgrund der Absorption von Photonen [2]. Die absorbierte Gesamtenergie führt letztendlich zu einer Temperaturerhöhung, welche sich in einem geschlossenen Volumen als Erhöhung des Drucks messen lässt. Das hier vorgestellte Sensorsystem zur Raumluftqualitätsüberwachung arbeitet mit einem 2-Kammer-Aufbau (Mess- und Detektionskammer) [3], [4].

In die Messkammer kann die zu messende Umgebungsluft eindiffundieren, während in der hermetisch versiegelten Detektionskammer eine hohe Konzentration CO_2 eingeschlossen ist. Darin befindet sich ein Drucksensor zur Messung des photoakustischen Signals. Zusätzlich zur hohen Zielgaskonzentration ist ein sekundäres, inertes Puffergas in der Detektionskammer mit eingeschlossen. Die Höhe des detektierten Drucks ist zum einen proportional zur Konzentration absorbierender Moleküle in der Probe, andererseits hängt sie von der Effizienz ab, mit der die absorbierte Energie durch strahlungsfreie Emission in kinetische Energie der Gasmoleküle umgewandelt wird. Im Falle der IR-Absorption von CO_2 -Molekülen erfolgt die strahlungsfreie Emission der absorbierten Energie hauptsächlich durch Molekülstöße mit IR-inaktiven Puffergasmolekülen. Ziel ist die absorbierte Energie durch eine geeignete Wahl des Puffergases möglichst effizient in kinetische Energie umzuwandeln und ein maximales Drucksignal zu generieren. Wir beschreiben den Sensoraufbau und die Experimente zur Untersuchung einer optimierten Puffergasmischung für einen CO_2 -Sensor.

Theoretische Grundlagen

Im folgenden Abschnitt wird der photoakustische Effekt prinzipiell beschrieben und theoretisch beleuchtet sowie auf Prozesse wie Linienverbreiterung und das Verhalten eines idealen Gases eingegangen. Ein Molekül hat ein molekulspezifisches Infrarotabsorptionsspektrum mit seinen charakteristischen Absorptionslinien. Als Beispiel ist in Abb. 1 das charakteristische Transmissionsspektrum der Fundamentalbande von CO_2 zu sehen bei einer Konzentration von 1000 ppm und einer Absorptionslänge von 1,28 cm bei Normalbedingungen. Nutzt man diese charakteristischen Wellenlängen eines Moleküls zur Gasdetektion, so kann das entsprechende Gas sehr selektiv gemessen werden. Der photoakustische Effekt beschreibt die Entstehung einer akustischen Welle aufgrund der Absorption von Photonen [6]. Die absorbierte Energie wird als erhöhte Energie im Gas umgewandelt, was als Temperaturerhöhung messbar ist. Die erhöhte Temperatur kann aufgrund von Volumeninvarianz als Erhöhung des Drucks detektiert werden [7]. Moduliert die Intensität der Strahlungsquelle mit einer festen Anregungsfrequenz, so lässt sich die daraus resultierende periodische Zu- und Abnahme des Drucks mit einem Mikrofon als Schallwelle detektieren.

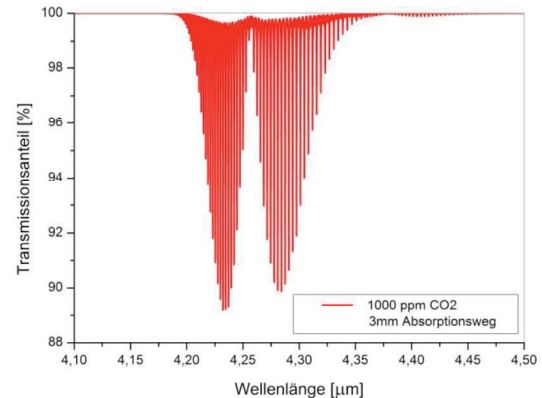


Abb. 1: Transmissionsspektrum $T(\lambda)$ der Fundamentalbande von 1000 ppm in Stickstoff bei $T=25^\circ\text{C}$, $p=1013$ mbar, Absorptionslänge $\Delta x=1,28$ cm und Wellenlängenbereich $4,1-4,5$ μm [5]

Das photoakustische Signal moduliert mit der Anregungsfrequenz der Strahlungsquelle. Die Amplitude des gemessenen Signals ist proportional zur aufgenommenen Wärme Q und somit proportional zur Konzentration absorbierender Moleküle innerhalb der Probe. Mathematisch lässt sich die Erhöhung des Drucks mit Hilfe des idealen Gasgesetzes beschreiben (siehe Gl. 2). Der Zusammenhang zwischen aufgenommener Wärme Q und Temperaturanstieg ΔT lässt sich durch die Definition der Wärmekapazität C_V (Gl. 1) herstellen.

$$C_V = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

Aus dem idealen Gasgesetz folgt direkt die Druckänderung Δp :

$$\Delta p = \frac{N \cdot R \cdot \Delta T}{V} \quad (2)$$

Die Energieaufnahme im System erfolgt durch die Absorption elektromagnetischer Strahlung. Die charakteristischen Absorptionslinien eines Moleküls entsprechen exakt der Energiedifferenz, die zur Anregung von Rotations-Schwingungsübergängen nötig ist. Dennoch sind die Absorptionsbereiche real keine scharfen Linien. Die natürliche Linienbreite entsteht durch die Dämpfung der angeregten Molekülschwingung, die zur begrenzten Lebensdauer eines angeregten Moleküls führt. Ein weiterer Effekt der Linienverbreiterung ist die sogenannte Dopplerverbreiterung. Diese entsteht durch die Eigenbewegung der Moleküle, die sich in jedem Molekül in Richtung und Geschwindigkeit unterscheidet. Daher haben sie relativ zur anregenden Welle eine andere Relativgeschwindigkeit, was zu einer

Verbreiterung der Absorptionslinie führt. Die Druckverbreiterung entsteht durch die Stöße und Wechselwirkung zwischen Molekülen, die zu einer Potentialverschiebung innerhalb eines Moleküls führen können.

Geht man davon aus, dass alle Moleküle innerhalb eines Volumens im thermischen Gleichgewicht sind, so ist die Geschwindigkeit der Moleküle nach der Max'wellschen Geschwindigkeitsverteilung beschrieben. Der Druck eines solchen Gases kann an der Gefäßwand als Summe der Stöße der Moleküle mit der Wand gemessen werden. Diese Impulsübertragung ist abhängig von der Art und Größe sekundärer Stoßpartner im Gasgemisch, die den Impuls übertragen. Die einzige Energieform eines Moleküls im Gas ist die kinetische Energie. Aus diesem Grund kann folgendes Äquivalent angesetzt werden:

$$E_{kin} = E_{therm} \quad (3).$$

Die gesamte thermische Energie des Systems ist gleich der kinetischen Energie der Moleküle und damit eine Funktion der Temperatur T . Somit kann die Annahme der vollständigen Umsetzung der absorbierten Energie in kinetische Energie getroffen werden.

Sensoraufbau

Der Fokus der hier beschriebenen Untersuchungen liegt auf der Optimierung des Drucksignals in der Detektionskammer durch ein passives, sekundäres Gas, das lediglich als Stoßpartner fungiert. Dabei gibt es zwei verschiedene Ansätze.

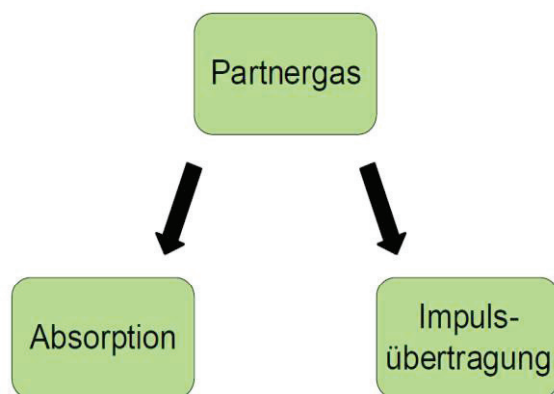


Abb. 2: Skizzierung der beiden Ansatzpunkte für die Optimierung des Drucksignals durch ein Puffergas. Sowohl die Absorption selbst (Linienverbreiterung), als auch die Impulsübertragung werden vom Puffergas beeinflusst.

Zum Einen kann der Absorptionsprozess selbst durch die oben beschriebenen Verbreiterungsmechanismen der Absorptionslinien beeinflusst werden. Des Weiteren kann

eine effiziente Impulsübertragung der Molekülstöße bis zum elastischen Stoß mit der Mikrofonmembran das Drucksignal signifikant verbessern. Die beiden Ansatzpunkte sind in Abb. 2 verdeutlicht. Um eine einfache und schnelle Anpassung des Puffergases in der Detektionskammer zu erzielen, wurde ein geeigneter Sensoraufbau entwickelt. Ein Schema des Querschnitts des modifizierten Sensoraufbaus ist in Abb. 3 zu sehen. Der modifizierte Sensoraufbau besteht aus einer IR-Breitbandquelle (1) in einer Emittierhalterung (2) und einer photoakustischen Detektionskammer (4). Die Messkammer des Systems (3), in der das zu untersuchende Gas vorliegt, befindet sich zwischen Strahlerhalterung und Detektionskammer. Der Sensoraufbau (2,3,4) ist aus Aluminium gefertigt, während der Strahlerhalter aus PEEK gefertigt ist, um keine großen thermischen Verluste am Strahler zu erhalten. Die IR-transparenten Fenster zwischen den Kammern sind aus Saphir.

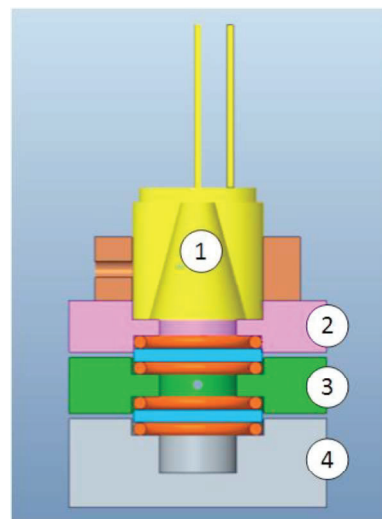


Abb. 3: Schematischer Aufbau des photoakustischen Sensorsystems mit IR-Emitter (1), Emittierhalterung (2), Messkammer für die Umgebungsluft (3) und Detektionskammer mit Gaseinschluss und Mikrofon als Detektor (4).

Sie werden mechanisch auf O-Ringe gepresst, um eine pneumatische Dichtung der Kammern zu erzielen. Die Detektionskammer wurde durch Gasperipherie und Ventile so adaptiert, dass eine schnelle Befüllung mit einer beliebigen Puffergasmischung durchgeführt werden kann. Abb. 4 zeigt ein Foto Aufbau mit den Gasperipherieanschlüssen (2) in der Detektionskammer des Sensorsystems (3). Die Gasperipherieanschlüsse werden mit elektrisch steuerbaren Ventilen (Festo MFH-2-M5) verbunden (1).

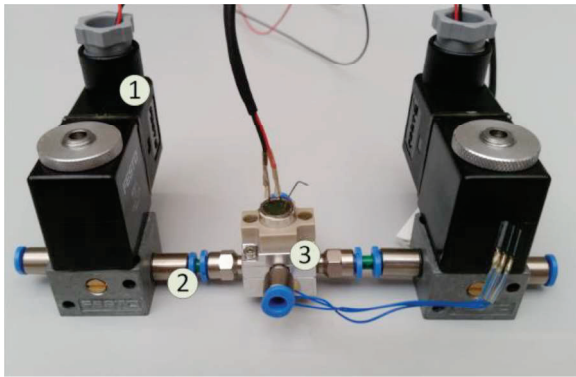


Abb. 4: Messaufbau zur Variation von Puffergasmischungen in der Detektionskammer mit elektrisch steuerbaren Ventilen (1), Gasperipherieanschlüssen (2) und Sensorsystem (3).

Bei geöffneten Ventilen wird die Detektionskammer mit der zu untersuchenden Puffergasmischung gespült. Nach hinreichend langer Spülzeit werden die Ventile geschlossen und der Gasfluss unterbrochen. Die geschlossenen Ventile sorgen dafür, dass ein geschlossenes Volumen als Detektionskammer vorliegt. Das nichtresonante photoakustische Signal würde bei pneumatischer Öffnung in der Umgebung gepuffert werden und nicht messbar sein. Mit Hilfe des in Abb. 4 gezeigten Systems können verschiedene Gasmischungen mit unterschiedlichen prozentualen Anteilen eines Puffergases als Partnergase in einer photoakustischen Detektionszelle untersucht werden. Als breitbandiger IR-Emitter wird ein MEMS-Emitter des Typs Hawkeye IR-66 eingesetzt [8]. Als Druckaufnehmer fungiert das Mikrofon SMM310 der Firma Infineon Technologies AG, das typischerweise im Mobilfunk eingesetzt wird [9]. Zur Steuerung der aktiven Komponenten (Emitter, Detektor) und zur Auswertung des Sensorsignals wird eine bestehende Elektronik des Fraunhofer IPM eingesetzt. In einem Mikrocontroller wird das Sensorsignal aufgenommen und über einen digitalen Lock-in-Verstärker ausgewertet. Das resultierende Sensorsignal wird über eine UART-Schnittstelle an einen PC gesendet.

Experimentelles

Das beschriebene System wurde genutzt, um Puffergasmischungen in unterschiedlichen prozentualen Zusammensetzungen hinsichtlich der Beeinflussung des photoakustischen Drucks zu untersuchen. Grundsätzlich eignen sich alle chemisch inerten und IR-inaktiven Gase als Puffergas. Es dürfen keine Absorptionslinien im genutzten Wellenlängenbereich vorliegen. Das Puffergas agiert lediglich als passives sekundäres Gas,

das eine Verbesserung des detektierten Drucksignals hervorruft. Primäres Zielgas ist in den hier vorgestellten Untersuchungen CO_2 . Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurde ein Standardtestablauf entwickelt, der am Gasmessplatz des Fraunhofer IPM durchgeführt wurde. Um zu gewährleisten, dass sich in der Detektionskammer die gewünschte Puffergasmischung einstellt, wird die Kammer 10 min lang mit einem Gesamtfluss von 0,148 l/min der eingestellten Gasmischung gespült. Danach werden die Ventile geschlossen und die Messkammer, in der sich das zu messende Umgebungsgas befindet, mit reinem Stickstoff gespült. Dadurch kann eine weitere Randbedingung des Systems konstant gehalten werden. Daraufhin wird die Testmessung gestartet. Als Ausgabe erfolgt ein einheitenloser, gemittelter Vergleichswert, der direkt mit der Amplitude des vom Mikrofon gemessenen Wechselsignals zusammenhängt. Die Datenauswertung startet nach einer Aufheizzeit des Sensorsystems von sechs Minuten. Exemplarisch ist eine Darstellung der Untersuchung des Puffergases Argon (Ar) mit verschiedenen Konzentrationen in Abb. 5 dargestellt. Das Puffergas Ar wurde dabei im Bereich von 10% bis 70% Ar in Mischung mit CO_2 untersucht. Die Messwerte wurden in der Darstellung mit einer Polynomfunktion 3. Ordnung approximiert.

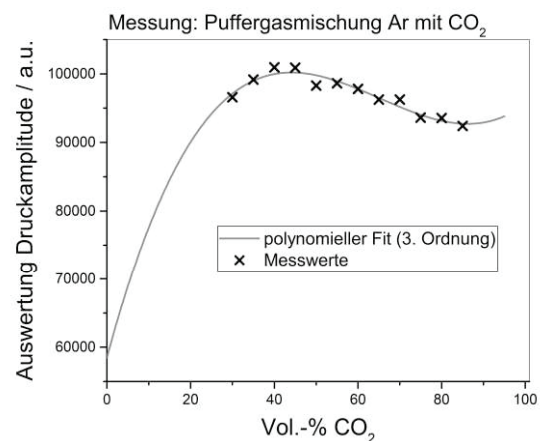


Abb. 5: Variation der Ar/ CO_2 -Zusammensetzung in der Detektionskammer. Es ist ein Maximum der Druckamplitude im Bereich von 45% Ar erkennbar. Die Messwerte wurden mit einer Polynomfunktion 3. Ordnung gefittet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Messung in Abb. 5 zeigt ein Maximum bei ca. 45% Ar und 55% CO₂: Die Messung zeigt des Weiteren ein Sättigungsverhalten ab ca. 70% CO₂. Ab dieser Konzentration ändert sich mit der Änderung der Gaszusammensetzung das Signal nicht mehr. Abb. 6 zeigt das Ergebnis der Untersuchung der drei Puffergase Stickstoff (N₂), Argon (Ar) und Helium (He) in einer Darstellung. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich, dass sowohl die Art, als auch die Konzentration des Puffergases die Amplitude des Drucksignals stark beeinflussen. Alle Kurven zeigen zunächst einen Anstieg der Amplitude mit steigender CO₂-Konzentration, was durch die Zunahme der Absorption durch die Erhöhung der Anzahl absorbierender Moleküle passiert.

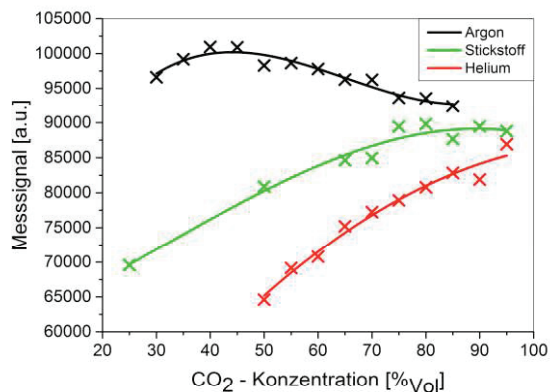


Abb. 6: Zusammenfassung der Messreihen mit den Puffergasen He, N₂ und Ar in CO₂.

Die Messungen mit N₂ als Puffergas zeigen ein Sättigungsverhalten ab einer Konzentration von ca. 80% CO₂. Die Untersuchung mit He als Partnergas lässt einen zur CO₂-Konzentration linearen Anstieg des photoakustischen Drucks erkennen. Es ist offensichtlich, dass He kein geeignetes Puffergas für eine CO₂-Detektionskammer darstellt. Das Signal steigt mit abnehmender He-Konzentration, was bedeutet, dass der He-Zusatz das Signal abschwächt. Ar zeigt den größten verstärkenden Einfluss auf das photoakustische Signal. Durch die Beimischung von ca. 45 % Ar zu CO₂ wird das gemessene Drucksignal des Sensors um ca. 8% erhöht. Das bedeutet, dass auch das Detektionslimit dadurch signifikant verbessert wird. Es gibt verschiedene Erklärungsansätze für die Beeinflussung des photoakustischen Drucksignals durch das Puffergas. Zunächst ist die gesamte aufgenommene Energie im absorbierenden Molekül vorhanden. Es wird angenommen, dass die absorbierte elektromagnetische Energie nur bis zu einem

bestimmten Anteil in kinetische Energie der Gasmoleküle umgewandelt wird. Darüber hinaus verteilt sich ein Teil der Energie auf andere Freiheitsgrade der Moleküle. Das zweiatomige Stickstoff-Molekül kann deformiert werden und daher Energie der Molekülstöße in eine Deformation aufnehmen. Dieser Energieanteil führt nicht zu einer Erhöhung der kinetischen Energie bzw. zu einer Temperaturerhöhung, und hat somit keine direkte Auswirkung auf den photoakustischen Druck. Die Stickstoff-Moleküle wirken somit als eine Art Energiespeicher. Die Tatsache, dass mehratomige Moleküle Energie nicht notwendigerweise in kinetischen Freiheitsgraden speichern erklärt, warum eine 100% CO₂-Mischung nicht die besten Resultate erzielt. Der Absorptionsanteil wird ab einer gewissen Konzentration nicht mehr erhöht. Die zusätzlichen Moleküle wirken dann als Energiepuffer und limitieren das entstehende Drucksignal durch Dämpfung der Molekülbewegung in Deformationen. Einatomige Moleküle können nicht zu Schwingungen oder Rotationen angeregt werden. Des Weiteren sind die Photonenenergien im Infrarotbereich zu gering für die Anregung elektronischer Übergänge. Das bedeutet, dass einatomige Stoßpartner die durch Kollision übertragene Energie in Form kinetischer Energie speichern, was sich positiv auf den photoakustischen Druck auswirkt. Die spezifische Wärmekapazität eines Gasgemisches ist die Summe der Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten, gewichtet mit den jeweiligen Anteilen. Einatomige Gase haben aufgrund der geringeren Anzahl an inneren Freiheitsgraden eine geringere Wärmekapazität. Die durch den photoakustischen Effekt induzierten Druckschwankungen sind umgekehrt proportional zur Wärmekapazität der Puffergasmischung. Ausgehend von den Messungen mit den einatomigen Gasen He bzw. Ar als Partnergas besteht Grund zur Annahme, dass die durch CO₂-Moleküle absorbierte Energie effizient in kinetische Energie der Gasmoleküle umgewandelt wird, wenn sich die Massen von CO₂- und Partnergasmolekül ähneln. Es handelt sich dabei um den elastischen Stoß. Bei ähnlichen Massen ist die Geschwindigkeit des Stoßpartners nach der Impulsübertragung auch ähnlich. Der Einsatz eines geeigneten einatomigen Puffergases verbessert die Performance eines photoakustischen Sensorsystems deutlich. Die effektive Lebensdauer der angeregten Moleküle sinkt mit zunehmender Wahrscheinlichkeit strahlungsfreier Emissionsvorgänge, wodurch

sich das Linienspektrum verbreitert und somit die absorbierte Wärme erhöht. Kleine und leichte Moleküle führen zwar zu einer höheren Relativgeschwindigkeit. Ihr Einfluss auf die Linienverbreiterung fällt aber aufgrund der geringen Dichte sowie des kleinen Stoßquerschnittes gering aus. Da ein vergleichsweise großes Molekül wie Argon aufgrund der höheren Dichte und des vergrößerten Stoßquerschnitts einen positiven Effekt hat, ist nicht auszuschließen, dass noch größere Moleküle wie Krypton oder Xenon den Effekt der stoßinduzierten Linienverbreiterung zusätzlich verstärken und somit ebenfalls effektive Partnergase sind. Generell müssten diese beiden Gase auch geeigneter sein, da deren Atommasse relative nahe an der Molekülmasse des CO₂-Moleküls liegt. Durch Optimierung der Stoßeffizienz durch ein ähnlich schweres Molekül wird die Auflösung eines bestehenden photakustischen Messsystems verbessert.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen befassen sich mit der Optimierung einer photoakustischen Detektionskammer durch die Beimischung eines Puffergases zum untersuchten Zielgas CO₂. Dabei lag das Hauptaugenmerk darauf, ein Partnergas zu finden, das den angeregten CO₂-Molekülen als möglichst effizienter Stoßpartner dient, sodass die durch CO₂-Moleküle absorbierte Energie effizient in kinetische Energie der Gasmoleküle umgewandelt wird. Mithilfe eines für die Untersuchungen entwickelten Messsystems wurden die Gase Ar, He und N₂ als Puffergas für eine CO₂-Detektionskammer untersucht. Messungen mit N₂ zeigen ein Sättigungsverhalten, während Messungen mit Helium als Partnergas einen zur CO₂-Konzentration linearen Anstieg des photoakustischen Drucks erkennen lässt. Messungen mit Argon als Partnergas zeigen ein Maximum des photoakustischen Drucks. Im Vergleich zu 100% CO₂ konnte das Drucksignal mit einer Füllung von 45% Ar in 55% CO₂ um 8% erhöht werden. Diese Erhöhung des Drucksignals verbessert die Auflösung und die Genauigkeit des Systems bei der Detektion von CO₂.

In weiteren Untersuchungen soll erforscht werden, ob weitere Edelgase (z.B. Neon oder Xenon) das Drucksignal noch signifikanter verbessern. Vor allem mit Xenon, das eine ähnliche Atommasse wie das CO₂-Molekül hat, wird eine weitere Verbesserung erwartet. Gleichzeitig gibt es die Überlegung ternäre oder quartäre Gemische zu untersuchen. Dadurch können beide Effekte, die das

Drucksignal beeinflussen zu einer Erhöhung des Signals beitragen. Die Impulsübertragung wird durch ähnlich schwere Moleküle verbessert, während ein schweres Molekül die Druckverbreiterung der Absorptionslinien verbessert. Es soll untersucht werden, ob die beiden Zweige zur Beeinflussung des Drucksignals durch unterschiedliche Puffergase gleichzeitig optimiert werden können

Danksagung

Wir danken der Europäischen Union im Rahmen des ENIAC-Programms für die Förderung im Projekt ESEE.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt, "Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft," Bundesgesundheitsblatt. Gesundheitsforschung. Gesundheitsschutz, vol. 51, no. 11, pp. 1358–69, Nov. 2008.
- [2] A. Miklós, "Acoustic Aspects of Photoacoustic Signal Generation and Detection in Gases," *Int. J. Thermophys.*, pp. 1–33, 2015.
- [3] J. Huber, A. Eberhardt, S. Rademacher, and P. J. Wöllenstein, "Miniaturisiertes photoakustisches CO₂-Gasmesssystem für die Raumluftüberwachung," in *Sensoren und Messsysteme 2014*, 2014, no. 2, p. 5.
- [4] J. Huber and J. Wöllenstein, "Kompaktes photoakustisches Gasmesssystem mit Potential zur weiteren Miniaturisierung," *tm – Tech. Mess. tm - Tech. Mess.*, vol. 80, no. 12, p. 448, Jan. 2013.
- [5] "HITRAN spectral database," 2008. [Online]. Available: <http://www.cfa.harvard.edu/HITRAN>.
- [6] G. A. West, J. J. Barrett, D. R. Siebert, and K. V. Reddy, "Photoacoustic spectroscopy," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 54, pp. 797 – 817, 1983.
- [7] Z. Bozóki, A. Pogány, and G. Szabó, "Photoacoustic Instruments for Practical Applications: Present, Potentials and Future Challenges," *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 46, pp. 1–37, 2011.
- [8] Hawkeye Technologies, "Infrared Source Series 6x." pp. 1–11, 2014.
- [9] Infineon Technologies AG, "SMM310 silicon MEMS Microphone." pp. 1–13, 2008.