

Resonant-Akustischer Sensor für die gleichzeitige Detektion von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid im Lebensmittelbereich

Christian Weber^{1,2}, Katrin Schmitt^{1,2}, Jürgen Wöllenstein^{1,2}

¹ Fraunhofer Institut für physikalische Messtechnik IPM, 79110 Freiburg i. Br.

² Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK, Universität Freiburg 79110 Freiburg i. Br.

Zusammenfassung

Physikalische Verfahren wie die Messung der Schallgeschwindigkeit erlauben es in der Regel nur die Komponenten binärer Gasgemische voneinander unterscheiden zu können. In diesem Beitrag stellen wir eine neuartige Methode vor, bei der die photoakustische Schallerzeugung an der Wand eines akustischen Resonators genutzt wird, um sowohl eine zur Schallgeschwindigkeit proportionale Resonanzfrequenz als auch eine vom Gas abhängende Amplitude zu erhalten. Messungen haben gezeigt, dass sich Amplitude und Resonanzfrequenz einem Stickstoff-Sauerstoff-Gemisch anders zueinander verhalten als im Stickstoff-Kohlendioxid-Gemisch, womit eine Trennung der Komponenten im ternären Gasgemisch möglich wird. In Übereinstimmung mit der Theorie weist die Resonanzfrequenz eine sehr gute Linearität auf; bei der Amplitude ist dies ebenfalls für Sauerstoff der Fall, nicht jedoch für CO₂, was auf einen zusätzlichen Dämpfungseffekt durch CO₂ hindeutet. Die rauschäquivalenten Konzentrationen liegen für CO₂ und O₂ über die Resonanzfrequenz bei 72 ppm bzw. 140 ppm und über die Amplitude bei 0.08 vol.-% bzw. 0.16 vol.-%.

Keywords: Schallgeschwindigkeit, Resonanz, Gassensor, Sauerstoff, Kohlendioxid, Photoakustik

Motivation

In der Lebensmittelindustrie stellen die Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) bzw. deren Verhältnis in Stickstoff (N₂) einen der wichtigsten Parameter für die Alterung verpackter Lebensmittel dar [1]. Zudem lässt sich über das Verpacken der Lebensmittel unter definierten gehalten von CO₂ und O₂ (sogenannte Schutzatmosphäre) die Lebensmittelhaltbarkeit signifikant verlängern und damit die Lebensmittelsicherheit verbessern [2]. Somit ist für die Kontrolle der ordnungsgemäßen Verpackung von Lebensmitteln sowie für die stichprobenartige Kontrolle der Bedingungen innerhalb der Verpackung Sensorik erforderlich.

Die aktuellen Lösungen zur Messung der Konzentration basieren hauptsächlich auf filterphotometrischen Verfahren zur Messung von Kohlenstoffdioxid und von elektrochemischen Sensoren bzw. potentiometrischen Sensoren für die Sauerstoffmessung. Neben Nachteilen wie der begrenzten Lebensdauer der elektrochemischen Sensoren oder dem recht großen Probenvolumen, das für die Sensorkombination erforderlich ist, ist dieser Ansatz recht aufwändig und teuer. Dies erschwert den großflächigen Einsatz der Sensorik – beispielsweise zur kontinuierlichen Überwachung von

Großverpackungen und die Kontrolle der Verpackungsatmosphäre ist damit hauptsächlich auf Stichprobenmessungen im Labormaßstab limitiert. Um die Sensorik für die Bestimmung von CO₂ und O₂ zu vereinfachen, schlagen wir ein neues resonant-akustisches Messverfahren vor, welches auf einer außerordentlich linearen und störungsfreien Schallerzeugung mittels des photoakustischen Effekts basiert.

Messprinzip und Sensoraufbau

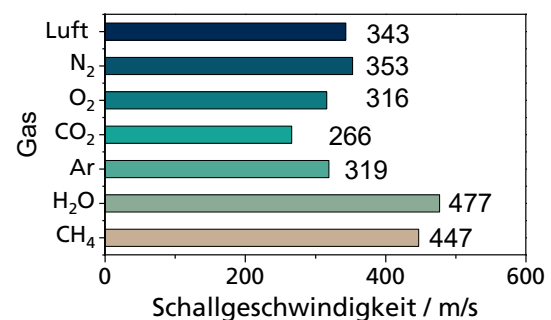


Abb. 1: Vergleich der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gaskomponenten der Umgebungsluft

Die Schallgeschwindigkeit verschiedener Gaskomponenten unterscheidet sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, teils erheblich. Mischungen der Gaskomponenten besitzen somit auch eine

individuelle Schallgeschwindigkeit, die vom Mischungsverhältnis abhängt. Sie errechnet sich allgemein über (1) [3]:

$$c = \sqrt{RT \cdot \frac{\sum_i^N x_i \gamma_i}{\sum_i^N x_i M_i}} \quad (1).$$

c ist dabei die Schallgeschwindigkeit der Mischung, T die Temperatur und R die universelle Gaskonstante. M_i sind die molaren Massen und γ_i die Isentropenexponenten der einzelnen Gas-komponenten. Ist die Schallgeschwindigkeit bekannt, so lässt sich somit auch auf das Mischungsverhältnis einer binären Gasmischung zurückschließen. Da die Schallgeschwindigkeit aber stets die Summe der Schallgeschwindigkeiten aller im Gemisch enthaltenen Gase ist, ist die Eindeutigkeit bei Mischungen mit drei oder mehr Gasen nicht mehr gegeben. Somit benötigt die Analyse von Gasgemischen mit mehreren relevanten Komponenten stets weitere Messmethoden, um die Schallgeschwindigkeit sinnvoll einsetzen zu können.

Für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit existieren eine Reihe an unterschiedlichen Verfahren. Dabei gibt es einerseits lauffzeitbasierte Verfahren, die die Schallgeschwindigkeit über den zeitlichen Versatz einer Schallwelle entlang eines Weges entweder über die Phasenlaufzeit eines modulierten Signals oder über die Gruppenlaufzeit eines Pulses bestimmen [4]. Andererseits gibt es auch resonatorbasierte Verfahren, bei denen die Schallgeschwindigkeit indirekt über die Frequenz eines akustischen Resonators bestimmt wird [5]. Eine der einfachsten Geometrien eines akustischen Resonators ist ein Hohlzylinder, der das zu analysierende Gas enthält.

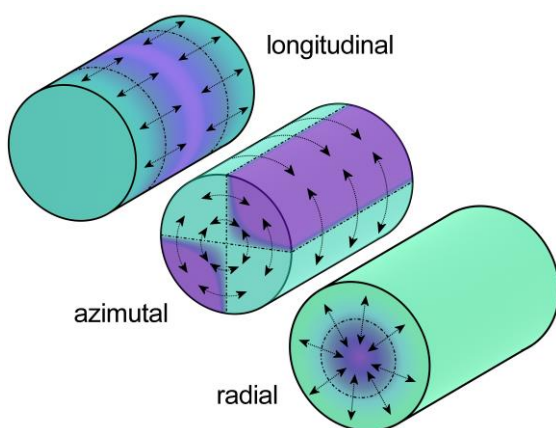


Abb. 2: Grafische Darstellung der möglichen resonanten Moden in einer Zylindergeometrie. Blau und Grün zeigen Druckmaxima bzw. -minima und die Pfeile zeigen die Auslenkungsrichtung der Schwingung an.

In einem Zylinder lassen sich verschiedene Zylindermoden anregen. Sie hängen bei einem Zylinder, dessen Gehäusematerial eine ausreichend hohe akustische Impedanz besitzt, in erster Näherung nur von der Geometrie und der Schallgeschwindigkeit der Gasfüllung ab. Die möglichen Moden, die im Zylinder anschwingen können, lassen sich in drei Kategorien unterteilen: longitudinale, azimuthale und radiale Moden. Diese sind in ihrer Grundform in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

Longitudinale Moden schwingen in ihrer Auslenkung entlang der Zylinderachse, azimuthale Moden entlang der Mantelfläche und Radialmoden von der Mantelfläche zur Achse des Zylinders. Eine hohe Güte ist insbesondere bei der Radialmode erreichbar, weshalb sie sich besonders gut zur Messung der Schallgeschwindigkeit eignet.

Während in der Literatur oft piezoelektrische Elemente, Lautsprecher [4,6] oder auch andere elektromechanische Wandler [6] verwendet werden, kann der Schall auch photoakustisch erzeugt werden [7]. Dabei wird Licht auf einen absorbierenden Teil der Zelle geleitet, welches dort absorbiert wird, und dessen Energie sich in Wärme umwandelt. Die Wärme geht dann in die Gasfüllung über, und sorgt für eine Ausdehnung des Gases.

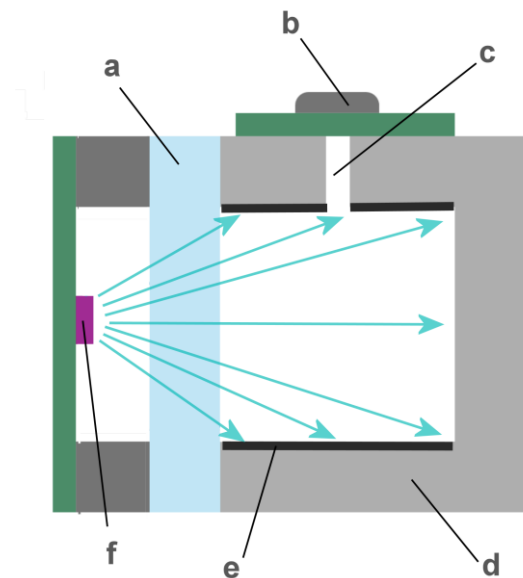


Abb. 3: Querschnitt durch das Sensorprinzip der photoakustischen Signalerzeugung kombiniert mit einem Zylinderresonator für eine Radialmode. Mit a) einem Fenster, b) MEMS-Mikrofon, c) Schallzugang (Bohrung), d) Aluminiumgehäuse mit zylindrischer Kavität, e) Farbschicht zur Erhöhung der Absorption, f) SMD-LED (450nm).

Bei gepulstem Licht treten die resultierenden wechselnden Druckschwankungen als Schallwellen auf, die den Resonator anregen kann. Ein großer Vorteil bei dieser Art der Schallerzeugung, liegt darin, dass der Schallwandler komplett frei von Eigenresonanzen ist. Das Verfahren ist linear im Bereich von wenigen Hertz bis weit in den Ultraschallbereich. Um mit diesem Verfahren einen Sensor aufzubauen, benötigt man also eine Lichtquelle, die auf einen Wandabschnitt des Zylinderresonators fokussiert werden kann. Besonders einfach ist dies für die Radialmode, da hier das Überlapp-Integral zwischen Anregung und Schallwelle auf der gesamten Innenmantelfläche besonders hoch ist. Im einfachsten Fall kann man damit eine LED, wie in Abbildung 3 gezeigt, frei in den Halbraum abstrahlend vor dem Zylinderresonator befestigt werden. Zur weiteren Erhöhung des Signals, wurde die Mantelfläche des Zylinders mit schwarzer Farbe (MTK 25, Edding group) beschichtet. Da die Absorption, welche auf der Stirnseite der Zylinderkavität stattfindet, das Überlappintegral verringern würde, wurde hier keine absorbierende Farbe aufgebracht. Minimale Verringerung durch die Absorption des blanken Aluminiums wurde dabei in Kauf genommen. Für den Durchmesser des Radialresonators wurden 10mm ausgewählt, mit dem die Frequenz der ersten Radialmode in etwa 42 kHz betragen sollte. Eine Länge von 8 mm sorgt dafür, dass die störenden Longitudinalmoden abseits der Radialmode liegen, sofern sie angeregt werden. Als LED kommt der Typ „GD VJLPL1.14-UNUO-34-1“ (ams-Osram AG, Österreich) zum Einsatz. Diese LED besitzt eine strahlende Fläche von 1.1 x 1.1 mm bei einer

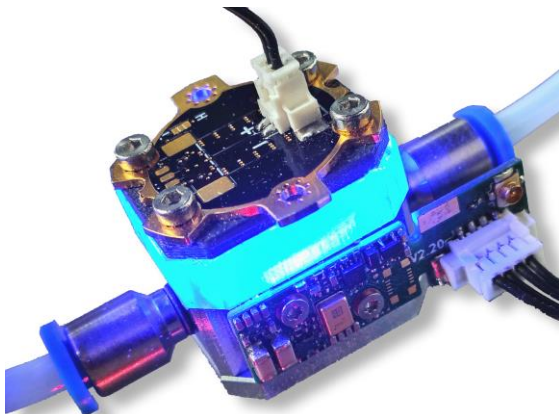


Abb. 4: Foto des fertig aufgebauten Sensors im Messbetrieb. Oben ist die Leiterplatte zu sehen, welche als Träger für die LED fungiert, und vorne ist die Leiterplatte mit dem Mikrofon zu sehen.

Zentralwellenlänge von 463 nm. Sie besitzt keine weitere package-interne Optik, was ein nahezu Lambertsches Strahlprofil zur Folge hat. In Abbildung 4 ist ein Foto des aufgebauten Sensors dargestellt. Die Detektion des Schalls erfolgt über ein MEMS-Mikrofon von Typ „IM73A135V01“ (Infineon AG, Deutschland). Das Mikrofonsignal wird Bandpassgefiltert mit einem Durchlassbereich zwischen 10 und 40 kHz und um den Faktor 22 verstärkt. Es sitzt auf einer dezidierten Analogplatine, welche in Abbildung 5 detailliert gezeigt ist. Das Mikrofonsignal wird anschließend mit einer vollständig differenziellen Konfiguration umgesetzt und über eine Kabelverbindung zu einem Embedded System, welches die Auswertung übernimmt. Dieses basiert auf einem PSoC6 Microcontroller und beinhaltet außerdem einen ADC, Power-Management für die LED-Spannung und die Analogversorgung, einen LED-Stromtreiber und ein USB-Interface, um die Daten über eine virtuelle serielle Schnittstelle an einen PC zu übertragen. Die Datenerfassung

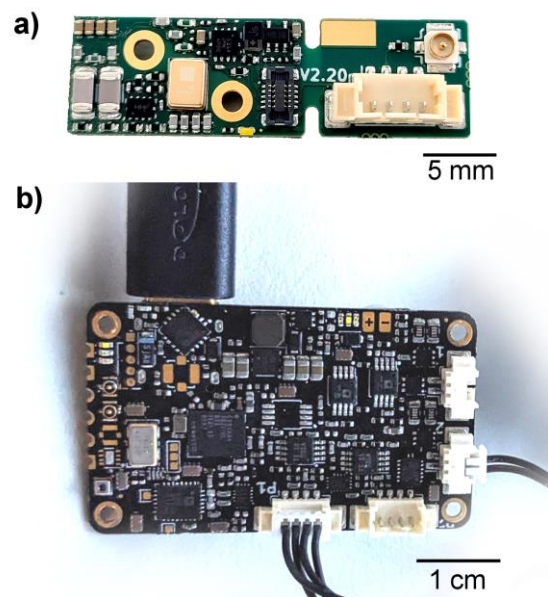


Abb. 5: a) Foto der analogen Vorverstärkerplatine mit MEMS-Mikrofon, einem Bandpassfilter und voll-differenzieller Treiberstufe. b) Embedded System zur Auswertung der Mikrofonsignale und zur Ansteuerung der LED.

findet mit 1024 kSa/s statt und mit der gleichen Frequenz erfolgt das Sampling der Ausgangskurvenform für den Stromtreiber. Die aufgenommenen Mikrofondaten werden von einem Sample-by-Sample Lock-In Filter, wie in [8] beschrieben, gefiltert.

Um die Resonanzfrequenz zu finden, sucht der Sensor iterativ nach der höchsten Amplitude und nimmt dann im Bereich der Resonanzfrequenz hochauflösende Daten auf, an die ein Resonatormodell angefügt wird [7]. Aus dem

Modell wird dann die Resonanzfrequenz errechnet und an einen Host-PC übertragen. Die Parameter des Suchalgorithmus wurde dabei so ausgewählt, dass das Finden der Resonanzfrequenz etwa 1100 ms benötigt. Als zusätzlicher Parameter wurde, anschließend auf der Resonanzfrequenz für 500 ms die Amplitude des akustischen Signals bestimmt. Zusätzlich wurden auch weitere Parameter des Fits ausgegeben. Messdaten standen somit in einem Intervall von 1.6 s zur Verfügung. Die Ansteuerung der LED erfolgte in beiden Messschritten sinusförmig mit 400 mA Peak-to-Peak.

Versuchsaufbau

Der wie zuvor beschriebene konfigurierte Sensor wurde anschließend am Gasmessplatz des Fraunhofer IPM vermessen. Dazu wurden M3 4mm IQS-Gasanschlüsse an den Sensor angebracht. Über Massenflussregler wurde ein relatives Verhältnis der einzelnen Gaskomponenten eingestellt (Prinzip in Abbildung 6 dargestellt).

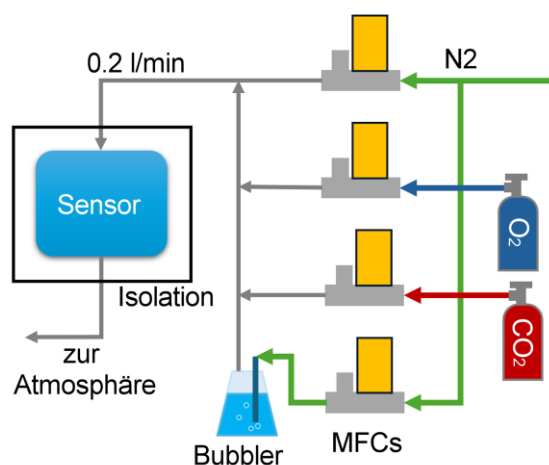


Abb. 6: Prinzipzeichnung des verwendeten Gasmessplatzes und Versuchsaufbau mit dem Sensor.

Die Gase CO_2 und O_2 wurden aus Druckgasflaschen bereitgestellt, die jeweils 100 % des jeweiligen Gases enthielten, während Feuchtigkeit über eine Bubbler-Flasche dem Stickstoffstrom zugemischt werden kann. Die Flüsse wurden während allen Versuchen so relativ zueinander geregelt, dass sich stets ein Summenfluss von 0.2 l/min einstellt. Da der Sensor eine geringe thermische Masse hat und sich im Betrieb erwärmt, wurde zudem ein Karton über dem Sensor platziert. Dieser soll eine allzu starke Anströmung mit Umgebungsluft verhindern, was zu starken Temperaturschwankungen führen könnte.

Messergebnisse und Diskussion

In einer ersten Messung wurde das Ansprechen des Sensors auf verschiedene Konzentrationen von CO_2 und Sauerstoff vermessen. Dazu wurden je drei Stufen von Sauerstoff und CO_2 in 10% Schritten gemischt und der Sensor damit beaufschlagt. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 7 gezeigt. Sowohl die Amplitude bei akustischer Resonanz als auch die Resonanzfrequenz selbst zeigen eine deutliche Reaktion auf die Gasstufen. Wie erwartet, fällt die Resonanzfrequenz bei beiden Gasen mit zunehmender Konzentration ab. CO_2 verschiebt die Resonanzfrequenz um $-0,22 \text{ \%Vol-\%}$ und Sauerstoff um $-0,0088 \text{ \%Vol-\%}$, was gut mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmt. Die Amplitude zeigt bei CO_2 ebenfalls ein fallendes Verhalten, bei Sauerstoff steigt die Amplitude jedoch an. Durch das unterschiedliche Vorzeichen sollten sich beide Gase voneinander unterscheiden lassen und auch die Bestimmung von tertiären Gasgemischen möglich

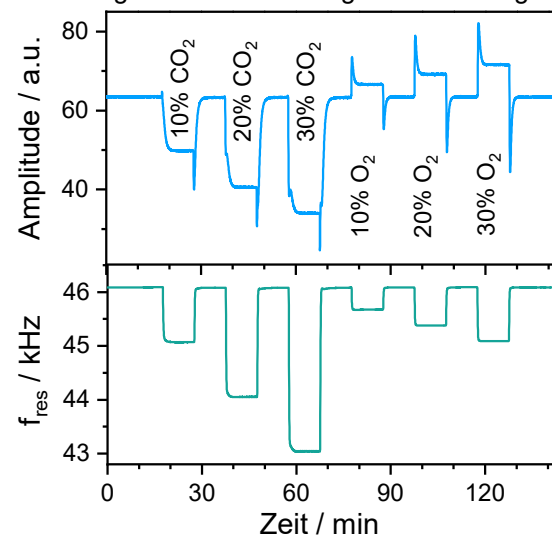


Abb. 7: Messergebnis bei Beaufschlagung von CO_2 und Sauerstoff. Abgebildet sind die bestimmte Resonanzfrequenz sowie die Amplitude des akustischen Signals bei der Resonanzfrequenz. Im oberen Panel sind die Konzentrations-Sollwerte von CO_2 und Sauerstoff gezeigt.

machen. Durch die direkte Platzierung des Sensors im Gasfluss und das geringe Volumen, ist die Reaktionszeit des Sensors sehr schnell. Die Zeitkonstante für die Reaktion der Resonanzfrequenz liegt bei 4.9 s bei der Reaktion auf CO_2 und bei 5.7 s bei der Reaktion auf Sauerstoff. Bei der photoakustischen Amplitude sind die Reaktionen auf die Gase komplexer (siehe Abbildung 8). Bei Sauerstoff reagiert die Amplitude sehr schnell auf die Gasänderung ($\tau = 6 \text{ s}$), gefolgt von einer langsameren Rückreaktion geringerer Stärke ($\tau = 25 \text{ s}$). Dies stammt vermutlich aus einer Überlagerung von zwei Effekten:

Einmal die Änderung der thermodynamischen Eigenschaften im Zylinderresonator selbst und mit einer langsameren Zeitkonstante, die Änderung der viskoelastischen Eigenschaften im Mikrofon selbst bzw. die akustische Kopplung des Mikrofons an das Gas. Diese Effekte sind auch bei CO_2 zu beobachten; in diesem Fall könnte jedoch auch die Dämpfung des Resonators selbst eine Rolle spielen, was zu einem

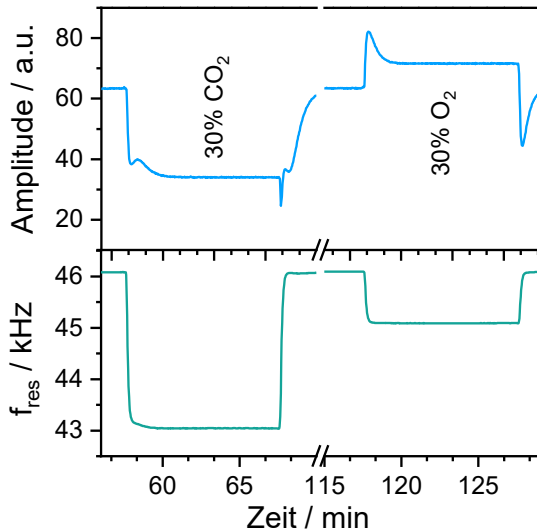


Abb. 8: Detail der Sensorreaktion auf die 30% Stufen von CO_2 und Sauerstoff. Die Amplitude der photoakustisch erzeugten Schallwelle zeigt ein komplexeres Verhalten auf den Gaswechsel als die Schallgeschwindigkeit, welches vermutlich durch eine Überlagerung verschiedener Effekte zustande kommt.

weiteren Effekt führt, der sich bei den schnellen Gaswechseln überlagert. Ohne weitere Kompensation limitieren diese Effekte die Ansprechzeiten des Sensors, da stets die längste Zeitkonstante im System die Zeit bis zu einem stabilen Messwert definiert. Da Werte wie die Dämpfung des Resonators und Mikrofonkopplung auch eine Frequenzabhängigkeit zeigen, könne unter Hinzunahme von weiteren akustisch anregbaren Moden in Zukunft eine Kompensation dieser Effekte erfolgen. Auch eine Unterscheidbarkeit quartärer oder höherer Gasgemische durch die saubere Trennung dieser Effekte wäre denkbar. In der nächsten Messung wurde die Linearität des Sensors bestimmt. Zu diesem Zweck wurde der Sensor mit Konzentrationen im Bereich von 0 bis 30 Vol.-% beaufschlagt, und die Resonanzfrequenz sowie die akustische Amplitude wurden erneut aufgezeichnet. Die Konzentrationen wurden in Schritten von 2 Vol.-% erhöht, wobei der Schritt bei 10 Vol.-% ausgelassen wurde. Bei Sauerstoff war eine 2 Vol.-% Stufe technisch nicht möglich. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

Das Sensorsignal der Resonanzfrequenz deckt sich nahezu ideal der Theorie. Für beide

Signale sind die Abweichung vom linearen Zusammenhang kleiner als 0.01 % und damit weit geringer als die spezifizierte Linearität der Massenflussregler. Lediglich der reine Stickstoffwert zeigt bei beiden Gasen eine größere Abweichung, was vermutlich an einem Offsetverhalten des Massenflussreglers liegt.

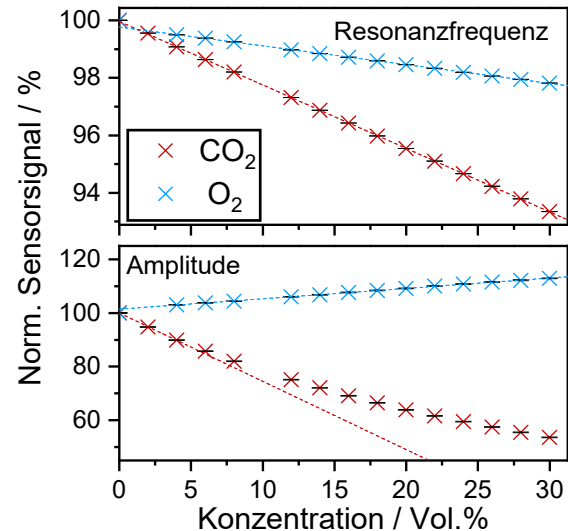


Abb. 9: Verlauf der Sensorsignale auf verschiedene Konzentrationen von O_2 und CO_2 . Die gestrichelten Linien geben den linearen Zusammenhang der ersten drei Punkte wieder, um die Linearität zu verdeutlichen.

Bei der Amplitude zeigt die Sensorreaktion auf Sauerstoff ebenfalls ein sehr lineares Verhalten mit Abweichungen kleiner der Standardabweichung der Messwerte. Die Reaktion auf CO_2 weist allerdings ein deutliches Absättigungsverhalten und damit eine starke Nichtlinearität auf. Auch dies deutet auf einen dritten überlagerten Effekt hin, der den Resonator dämpft.

Zuletzt wurde noch die Querempfindlichkeit des Sensors auf Wasser untersucht. Da das Gasgemisch aus Wasser, Stickstoff, Sauerstoff und CO_2 besteht – also ein quartäres Gasgemisch vorliegt, lässt sich die Wasserkonzentration nur mit der Amplitude und der Resonanzfrequenz allein nicht bestimmen und rechnerisch kompensieren. Daher muss die Wasserquerempfindlichkeit akzeptiert und die Konzentration entweder stabilisiert (Gastrockner o.Ä.) oder über einen zusätzlichen Feuchtesensor kompensiert werden. Für die Effektivität dieser Maßnahmen ist die Wasserquerempfindlichkeit entscheidend, da sie den Restfehler maßgeblich mitbestimmt, der nach einer Kompensation am Ende bestehen bleibt.

Die Messung erfolgt analog zu den vorangegangenen Messungen. Über eine Befeuchtung von Stickstoff (vergl. Abbildung 6) wurden 0-80% relative Feuchte bei 22 °C in 10 % Schritten generiert und auf den Sensor gegeben. Erneut wurden die Resonanzfrequenz und die

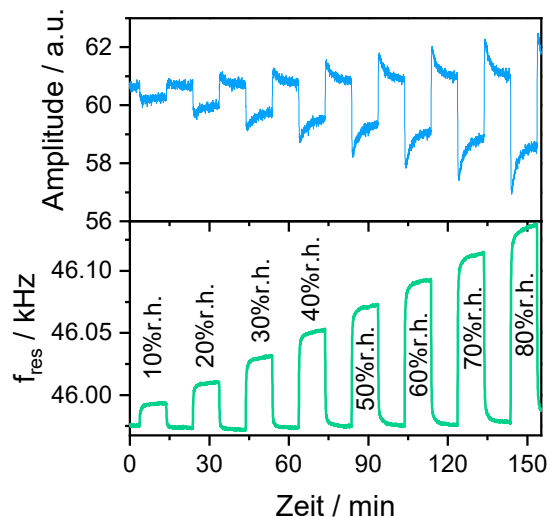


Abb. 10: Ergebnis der Querempfindlichkeitsmessung der Resonanzfrequenz und der Amplitude bei der Beaufschlagung des Sensors mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bei 22 °C Umgebungstemperatur.

Amplitude aufgezeichnet. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 10 dargestellt. Erneut deckt sich die Änderung der Schallgeschwindigkeit sehr gut mit den theoretischen Vorhersagen. Durch die geringe absolute Konzentration des Wassers ist der Effekt insgesamt gering. Er liegt bei etwa 2 Hz/%r.h. Dies entspricht einem Fehler von etwa 0.02 Vol.-%/%r.h. bei CO₂ und 0.05 Vol.-%/%r.h. bei Sauerstoff. Die Amplitude verhält sich ähnlich der Amplitudenänderung auf Sauerstoff mit der sichtbaren Überlagerung von zwei Effekten. Die zweite Zeitkonstante ist mit ($\tau = 118$ s) allerdings wesentlich länger, was durch die langsamere Bildung eines Gleichgewichts, mit dem die Oberflächen absättigenden Wasser erklärt werden kann. Auch bei der Amplitude sind die Effekte durch die kleinen absoluten Konzentrationen der Luftfeuchte gering. Sie liegt bei 0.08 a.u./%r.h. was Fehlern von 0.034 vol.-%/%r.h. bei CO₂ und 0.16 Vol.-%/%r.h. bei Sauerstoff entspricht. Eine Kompensation oder Stabilisierung der Luftfeuchte mit einer Genauigkeit von 5 %r.h. sollte also ausreichen, um den Fehler für Sauerstoff und CO₂ auf unter 1 Vol.-% zu reduzieren.

Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der entwickelte resonant-akustische Sensor – der durch den photoakustischen Effekt Schall erzeugt – eine vielversprechende Alternative bisheriger Sensorik in der Lebensmittelindustrie darstellt.

Durch die Verwendung der akustischen Amplitude zusätzliche zur Resonanzfrequenz,

konnte ein zusätzlicher Parameter gefunden werden, der eine eindeutige Unterscheidung im tertiären Gasgemisch aus Stickstoff – Sauerstoff – Kohlenstoffdioxid möglich macht. In Gasmessungen konnten über die beiden Parameter eine rauschäquivalente Konzentration von 72 ppm bzw. 0.08 Vol.-% für CO₂ und 140 ppm bzw. 0.16 Vol.-% für Sauerstoff bei 1.6 s Messdauer bestimmt werden. Der Sensor weist eine inhärente Querempfindlichkeit zwischen Sauerstoff und Feuchte auf. Bei Raumtemperatur fallen die Fehler allerdings gering aus, so dass diese mit einem Polymer-Feuchtesensor kompensierbar sein sollten, ohne dass die Gesamtgenauigkeit zu stark beeinträchtigt wird. Dank seines kompakten und einfachen Designs sowie seiner simplen Signalauswertung lässt sich der Sensor auch unter beengten Platzverhältnissen, beispielsweise in handgehaltenen Messgeräten, einsetzen.

Literaturnachweis

- [1] Chaix, E., Couvert, O., Guillaume, C., Gontard, N. and Guillard, V. (2015), Predictive Microbiology Coupled with Gas (O₂/CO₂) Transfer in Food/Packaging Systems: How to Develop an Efficient Decision Support Tool for Food Packaging Dimensioning. COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY, 14: 1-21. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12117>
- [2] Genigeorgis, C. A. (1985). Microbial and safety implications of the use of modified atmospheres to extend the storage life of fresh meat and fish; International Journal of Food Microbiology, 1(5), 237-25;
- [3] Fomin, Y.D., Tsiok, E.N., Ryzhov, V.N. et al. Speed of Sound in Mixtures of Liquids: Noble Gases and Water-Alcohol Mixtures. Phys. Wave Phen. 33, 177–182 (2025). <https://doi.org/10.3103/S1541308X25700128>
- [4] J. S. Olfert, M. D. Checkel, C. R. Koch; Acoustic method for measuring the sound speed of gases over small path lengths. Rev. Sci. Instrum. 1 May 2007; 78 (5): 054901. <https://doi.org/10.1063/1.2736406>
- [5] Goodwin, A. R. H., and J. P. M. Trusler. "6 speed of sound." Measurement of the thermodynamic properties of single phases (2003): 237.
- [6] Segovia, J.J., Vega-Maza, D., Martín, M.C. et al. An Apparatus Based on a Spherical Resonator for Measuring the Speed of Sound in Gases and for Determining the Boltzmann Constant. Int J Thermophys 31, 1294–1309 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0746-4>
- [7] C. Weber, J. Kapp, J. Wöllenstein, K. Schmitt, Novel approach for efficient resonance tracking in photoacoustic gas sensor systems based on a light-induced wall signal, Photoacoustics, Volume 31, 2023, 100495, ISSN 2213-5979, <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2023.100495>.
- [8] Weber, C. (2024). Miniaturized photoacoustic sensors for the detection of trace gases in ambient air.