

Analyse der UAV-basierten Methanferndetektion unter variierenden Reflexionseigenschaften von Oberflächen

Eric Maier^{1,2}, Johannes Herbst², Sven Rademacher², Thomas Strahl^{1,2}, Dominik M. Spale³, Stefan J. Rupitsch³, Jürgen Wöllenstein^{1,2}, Katrin Schmitt^{1,2}

¹ Universität Freiburg, IMTEK – Gassensoren, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

² Fraunhofer IPM, Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg

³ Universität Freiburg, IMTEK – Elektrische Messtechnik und Eingebettete Systeme, Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein kompaktes, drohnenbasiertes Sensorsystem zur Methanferndetektion vorgestellt. Das Sensorsystem basiert auf einer Wellenlängenmodulationsspektroskopie (WMS) mit einem DFB-Laser bei 1651 nm. Die Bestimmung der Methan-Säulenkonzentrationen wird über eine WMS-2f/1f-Demodulation ermöglicht. Der Sensor wurde hinsichtlich Gewicht, Leistungsaufnahme und Messreichweite für den Einsatz auf einem Quadropter optimiert. Feldmessungen zeigen, dass die Messergebnisse stark von der Stärke des rückgestreuten Laserlichts abhängen. Nicht-kooperative Rückstreu hintergründe und große Messentfernungen führen zu erhöhtem Messrauschen und können systematische Überschätzungen der Methan-Säulenkonzentration verursachen. Es konnte eine zuverlässige Methanferndetektion demonstriert werden, unter anderem durch Überflüge über einen methangefüllten Gassack als simuliertes Gasleck. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial des Systems für die drohnenbasierte Leckageerkennung an gasführender Infrastruktur und zeigen zugleich Ansatzpunkte für zukünftige Verbesserungen auf, insbesondere hinsichtlich der optischen Empfangseinheit und der Signalverarbeitung.

Keywords: Methandetektion, Gassensorik, Laserabsorptionsspektroskopie, Drohnenbasierte Messsysteme, Optische Ferndetektion

Motivation und Einführung

Die Reduktion von Methan-Emissionen (CH_4) ist eine der effektivsten Maßnahmen zur kurzfristigen Eindämmung des Klimawandels, da Methan über Jahrzehnte hinweg eine starke Treibhauswirkung entfaltet. Aktuelle globale Bewertungen unterstreichen, dass eine rasche Reduktion von CH_4 die Erderwärmung in den kommenden Jahrzehnten messbar verlangsamen kann [1]. Studien zeigen zudem, dass selbst moderate Leckagen entlang der Erdgas-Infrastruktur die erwarteten Klimavorteile gegenüber anderen fossilen Brennstoffen zunichtemachen können. Eine präzise Detektion und Kontrolle diffuser Emissionen ist daher unerlässlich [2].

Neben dem Klimaschutz erfordern auch sicherheitstechnische Aspekte – etwa nach einem Erdbeben oder anderen Katastrophen im Bereich gasführender Anlagen – eine schnelle und flächendeckende Erkennung von Gefahrenzonen. Um Einsatzkräfte keinen unnötigen

Risiken auszusetzen, bieten sich berührungslose, drohnenbasierte Messsysteme an. Diese können aus geringer Höhe auch komplexes, teils unzugängliches Gelände absuchen und liefern georeferenzierte, quantitative Ergebnisse [3, 4]. Insbesondere Multikopter eignen sich als Trägerplattformen, da sie präzise Suchflüge in geringer Höhe sowie punktuell Schweben (Hovering) zur gezielten Verifikation über potenziellen Leckagen ermöglichen. Niedrige Arbeitshöhen verkürzen den optischen Pfad, verbessern die Rückstreugeometrie und erhöhen so das Signal-zu-Rausch-Verhältnis [3–5]. Kombiniert mit einer Signalverarbeitung an Bord lassen sich so direkt im Feld Frühwarnungen generieren, die bei Einsätzen zur Entscheidungsfindung beitragen [4].

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz basiert auf der durchstimmbaren Laserspektroskopie (Tunable Laser Spectroscopy - TLS) in einer Standoff-Geometrie, bei der nicht-kooperative Ziele beleuchtet und das diffus rückgestreute Licht detektiert wird. Um eine rein optische Fernmessung zu realisieren, wird die Wellenlängenmodulationsspektroskopie (WMS) im nahen Infrarot bei etwa 1651 nm eingesetzt. Dies

ermöglicht kompakte, energieeffiziente und schnelle Messungen der CH_4 -Säulenkonzentration (in ppm·m), die sich ideal für die UAV-gestützte Gefahrenkartierung eignen [3].

Grundlagen der WMS zur Gaskonzentrationsbestimmung

Die abstimmbare Laserspektroskopie im nahen und mittleren Infrarot (NIR/MIR) eignet sich aufgrund ihrer hohen spektralen Selektivität und Empfindlichkeit besonders gut zur quantitativen Bestimmung gasförmiger Moleküle. Zu den wichtigsten Verfahren zählen die direkte Absorptionsspektroskopie (DAS) und die Wellenlängenmodulationsspektroskopie, die sich hinsichtlich Signalentstehung und Auswertverfahren unterscheiden.

Bei der DAS wird die Emissionswellenlänge eines monochromatischen Lasers über eine Absorptionslinie des Zielmoleküls abgestimmt. Die dabei auftretende spektrale (wellenzahlabhängige) Abschwächung der Intensität wird gemäß dem Beer-Lambert-Gesetz beschrieben:

$$I(\tilde{\nu}) = I_0(\tilde{\nu})e^{-\alpha(\tilde{\nu})\ell}. \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $I_0(\tilde{\nu})$ die spektrale Ausgangsintensität des Lasers, $\alpha(\tilde{\nu})$ den spektralen Absorptionskoeffizienten des Zielgases und ℓ die optische Weglänge durch das Gas. Hierbei ist es üblich die Wellenzahl $\tilde{\nu}=1/\lambda$ (in cm^{-1}) für die mathematische Beschreibung und Darstellung anstatt der Wellenlänge (z.B. $\lambda = c/\nu$ in nm bzw. optische Frequenz ν in Hz) zu verwenden.

In der WMS wird die Emissionswellenlänge des Lasers mit einer harmonischen Modulation überlagert, sodass es zu einer periodischen Absorption des Laserlichts kommt. Diese resultierende periodische Intensitätsmodulation (IM) lässt sich mit einem Photodetektor messen. Während die DAS ein unverändertes Absorptionsprofil liefert, verschiebt die Wellenlängenmodulationsspektroskopie das Absorptionssignal in höhere Harmonische der Modulationsfrequenz. Diese Signaltransformation ermöglicht eine schnelle, ressourcenschonende, robuste Detektion mittels Lock-In-Techniken und macht die WMS besonders interessant für drohnenbasierte Gasferndetektion.

Ausgehend von Gl. (1) wird das Produkt $\alpha(\tilde{\nu})\ell$ auch spektrale Absorbanz (A) genannt, welche über den negativen natürlichen Logarithmus in Verbindung mit der Transmission (τ) steht. Es gilt $A(\tilde{\nu}) = \alpha(\tilde{\nu})\ell = -\ln(\tau)$, sodass Beer-Lambert auf unterschiedlichen Wegen eingeführt oder auch ausgedrückt werden kann. Des Weiteren lässt sich der spektrale Absorptionskoeffizient durch die Teilchenzahldichte (n), die Linienstärke ($S(T)$) und entsprechende

Linienform (ϕ) des Zielmoleküls in Bezug setzen ($\alpha(\tilde{\nu}) = nS(T)\phi(\tilde{\nu})$). Die Teilchendichte des Zielgases ist unter Berücksichtigung des idealen Gasgesetzes direkt proportional zur Gaskonzentration (χ) des Zielgases, sodass die Absorbanz wie folgt beschrieben werden kann:

$$A(\tilde{\nu}) = \alpha(\tilde{\nu})\ell = \chi \frac{P}{k_B T} S\ell\phi(\tilde{\nu}). \quad (2)$$

Die Linienform ($\phi = \phi(\tilde{\nu}) = \phi(\tilde{\nu}, T, P)$), auch Linienprofil genannt, ist normiert, sodass $\int d\tilde{\nu} \phi(\tilde{\nu}) = 1$ gilt. Sie berücksichtigt auch die beiden vorherrschenden Verbreiterungsmechanismen der Linienbreite wie Stoß- und Dopplerverbreiterung, welche druck- (p) bzw. temperaturabhängig (T) sind. Mathematisch wird die Linienform durch ein Voigtprofil oder bei Standardbedingungen in guter Näherung durch ein Lorentzprofil beschrieben. Zur Berechnung oder Simulation der Absorptionslinie(n) werden die spektroskopischen Parameter aus der HITRAN-Datenbank verwendet [6]. Für eine Methankonzentration von 1 ppm bei einer optischen Weglänge von 1 m unter Standardbedingungen (296 K und 1013 mbar) ergibt sich ein Maximum der Absorbanz von 5×10^{-5} bei 1651 nm bzw. 6057 cm^{-1} (s. Abb. 1)

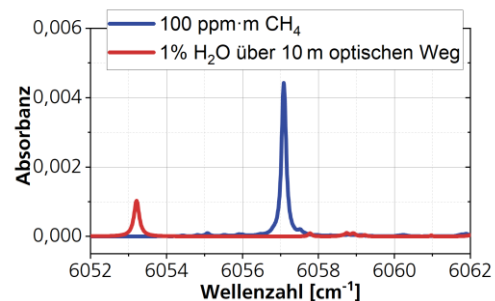


Abb. 1: Die auf HITRAN basierende Simulation zeigt die Absorption von CH_4 und Wasserdampf (1% absolute Feuchte) im Bereich der Messwellenlänge von 1651 nm.

Das statische elektrooptische Verhalten eines durchstimmbaren Lasers kann anhand des Injektionsstroms (i in mA) und Lasertemperatur (T in $^{\circ}\text{C}$) für einen spezifischen Arbeitspunkt mit der Wellenzahl $\tilde{\nu}_p = \tilde{\nu}(T_p, i_p)$ bzw. Intensität $I_0^p = I_0(T_p, i_p)$ charakterisiert werden. Bei diesen Lasern verhalten sich die Intensität und Wellenlänge näherungsweise linear zum Laserstrom, d.h. eine kleine Stromänderung über die Zeit führt zu einer Leistungs- bzw. Intensitäts- ($P_L \sim I_0$) und Wellenlängenmodulation des Lasers (kurz IM und WM).

Folglich führt eine kleine sinusförmige Modulation des Laserstroms um i_p zu einer kleinen WM bzw. IM um die Arbeitspunkte:

$$i(t) = i_p + \Delta i \sin(2\pi f_m t) \quad (3a)$$

$$\tilde{v}(t) = \tilde{v}_p + \Delta \tilde{v} \sin(2\pi f_m t) \quad (3b)$$

$$I_0(t) = I_0^p + \Delta I_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (3c)$$

Typischerweise befindet sich die Modulationsfrequenz f_m im kHz-Bereich und die Stromamplitude Δi ist in der Regel signifikant kleiner als der Strom am Arbeitspunkt i_p . In der Praxis folgen die Emissionswellenlänge bzw. -wellenzahl und Intensität der kleinen Strommodulation. Je nach Laserstruktur und Modulationsfrequenz ist jedoch eine Phasenverschiebung zwischen IM und WM zu beobachten, welche an dieser Stelle vernachlässigt wird.

Das Prinzip der WMS wird zum besseren Verständnis unter Vernachlässigung der zeitabhängigen IM des Lasers eingeführt (vgl. Gl. (3c)), es gilt $I_0(t) = I_0^p$. Unter Berücksichtigung der WM gemäß Gl. (3b) lässt sich das detektierte Signal gemäß dem Beer–Lambert-Gesetz für eine kleine Absorptionen wie folgt ausdrücken:

$$I(t) \approx I_0^p \left[1 - \chi \frac{P}{k_B T} S \ell \phi(\tilde{v}(t)) \right]. \quad (4)$$

Da $\tilde{v}(t)$ periodisch mit der Modulationsfrequenz f_m variiert, lässt sich das detektierte Signal $S = I(t)$ in einer Fourier-Reihe entwickeln. Es gilt

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} S_n \cdot \cos(n \cdot \theta) \quad (5)$$

wobei S_n Fourier-Koeffizienten (bzw. Harmonischen) sind und $\theta = 2\pi f_m t$ einer Substitution entspricht. Unter Vernachlässigung der IM des Lasers bzw. konstanten Intensität ($I_0(t) = I_0^p$) in Kombination mit einem Lorentzprofil als Linienform können die Harmonischen analytisch berechnet werden. Das Lorentzprofil ist durch über die zentrale Absorptionswellenzahl $\tilde{v}_0$ und die halbe Halbwertsbreite (HWHM, γ) der Absorptionslinie beschrieben:

$$\phi(\tilde{v}) = \frac{1}{\pi\gamma} \left[1 + \left(\frac{\tilde{v} - \tilde{v}_0}{\gamma} \right)^2 \right]^{-1} \quad (6)$$

Ausgehend von Arndt et al. [7] lassen sich die Signalkomponenten in Form der n-ten Harmonischen unter Berücksichtigung der WM gemäß Gl. (3b), (4) und (5) wie folgt beschreiben:

$$S_n = I_0^p \left[J_n(0) - \chi \frac{PS\ell}{k_B T} \frac{1}{\pi\gamma} H_n(x, m) \right] \quad (7)$$

Hierbei ist $J_n(0)$ die Besselfunktion n-ter Ordnung und

$$H_n(x, m) = \frac{\varepsilon_n i^n}{2 m^n} \frac{\left[\sqrt{(1-ix)^2 + m^2} - (1-ix) \right]^n}{\sqrt{(1-ix)^2 + m^2}} + c.c.$$

Hierbei ist $\varepsilon_0 = 1$ bzw. $\varepsilon_n = 2$ für $n > 0$, c.c. das komplex Konjugierte, $m = \Delta\tilde{v}/\gamma$ der Modulationsindex und $x = (\tilde{v} - \tilde{v}_0)/\gamma$.

Ausgehend von dieser Beschreibung kann gezeigt werden, dass für kleine m die Fourier-Koeffizienten S_n proportional zur n-ten Ableitung des Linienprofils $\partial^n \phi / \partial \tilde{v}^n$ der Lorentzfunktion sind. Folglich ist eine WM rund um die zentrale Absorptionswellenzahl ideal geeignet zur Gasanalyse mit Hilfe der 2. Harmonischen (S_2). Diese ist proportional zur Krümmung der Absorptionslinie und damit zur Konzentration des Zielgases. In der Praxis lässt sich der Realteil von S_2 über ein Lock-in-Verfahren bei der doppelten Modulationsfrequenz ($2f$) ermitteln.

S_2 ist nahezu hintergrundfrei (kein Offset), was die Detektion kleinster Konzentrationen ermöglicht. Trotzdem skaliert es linear mit der absoluten Lichtintensität. Eine Abschwächung des Laserlichts führt fälschlicherweise zu einem geringeren Konzentrationswert. Eine Normierung auf die erste Harmonische S_1 löst diese Problematik. Dies ist insbesondere für die Ferndetektion mit stark schwankenden Lichtintensitäten bedingt durch unterschiedliche Rückstreuoberflächen zwingend notwendig. Die Messgröße für die Konzentration ist somit das Verhältnis zwischen zweiter und erster Harmonischen:

$$\chi \propto \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

Diese Methode verspricht eine erhöhte Robustheit in der Ferndetektion. Bei geringen Absorptionen ist das Verhältnis dieser Harmonischen ($2f/1f$) weitestgehend nur noch von den molekularen Parametern und der gewählten Modulationsamplitude abhängig.

Sensorkonzept

Das Messsystem basiert auf der durchstimmbaren Laserabsorptionsspektroskopie und arbeitet wie folgt: Ein Distributed-Feedback-Laser (DFB-Laser) der Firma Eblana Photonics wird über eine spezifische Absorptionslinie von Methan abgestimmt (hier: 1651 nm, vgl. Abb. 1). Die Durchstimmung erfolgt über den

Lasertreiber der Auswerteelektronik. Hierzu wird mittels eines Digital-Analog-Wandlers (DAC) ein sinusförmiger Modulationsstrom mit einer Frequenz von etwa 1 kHz ausgegeben und dem Laser zugeführt. Der Laser wandelt diesen Strom in optische Strahlung um, wobei die emittierte Wellenlänge in Abhängigkeit vom Laserstrom variiert.

Die Einstellung und Stabilisierung der Lasertemperatur erfolgt über das integrierte thermoelektrische Kühlsystem (TEC). Über die Lasertemperatur wird die zentrale Emissionswellenlänge des Lasers eingestellt. Diese wird so gewählt, dass sich die Methan-Absorptionslinie an den Wendepunkten der sinusförmigen Wellenlängenmodulation befindet.

Das modulierte Laserlicht wird mithilfe einer Asphärenlinse (Thorlabs C330TMD-C) nahezu kollimiert und auf einen halben Öffnungswinkel von etwa 3 mrad eingestellt. Der Laserstrahl wird nach unten emittiert, dort am Untergrund reflektiert und diffus gestreut. Befindet sich Methan innerhalb der optischen Wegstrecke, so wird ein Teil des Laserlichts im Bereich der Absorptionslinie absorbiert. Die absorbierte Lichtmenge ist dabei proportional zur Methankonzentration entlang des Strahlengangs.

Zur Detektion wird ein Teil des rückgestreuten Lichts mittels einer Fresnel-Linse (Durchmesser 2“, Brennweite 32 mm) eingesammelt. Nach spektraler Filterung durch einen optischen Hochpassfilter (Thorlabs FELH1600) wird das Licht auf eine InGaAs-Photodiode (Thorlabs FGA21) fokussiert. Die Photodiode wandelt das modulierte optische Signal in ein entsprechendes sinusförmiges Stromsignal um. Die nachgeschaltete Vorverstärkereinheit besteht aus einem Transimpedanzverstärker (TIA) sowie weiteren Verstärker- und Filterstufen, welche das Stromsignal in ein Spannungssignal umwandeln und für die digitale Weiterverarbeitung aufbereiten.

Das aufbereitete Signal wird über einen 16-Bit-Analog-Digital-Wandler (ADC) erfasst und von einem Mikrocontroller auf der Auswerteelektronik digital verarbeitet. Zur spektralen Auswertung wird ein Görtzel-Algorithmus eingesetzt, mit dem gezielt die Amplituden der ersten (1f) und zweiten Harmonischen (2f) der Modulationsfrequenz bestimmt werden. Das 2f-Signal enthält dabei die absorptionsbedingte Gasinformation, während das 1f-Signal überwiegend die Reflektivität des rückstreuenden Hintergrunds repräsentiert. Durch Normierung des 2f-Signals mit dem 1f-Signal und Multiplikation mit einem Kalibrierfaktor k ($\frac{2f}{1f} \cdot k$) wird die Methan-Säulenkonzentration in der Einheit ppm·m berechnet. Eine schematische

Darstellung des Messprinzips ist in Abb. 2 gezeigt.

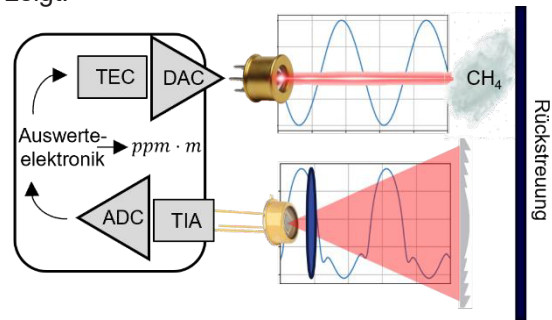


Abb. 2: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip des TDLAS-Messsystems.

Der Sensor dient der Detektion von Erdgasleckagen und soll frühzeitig vor Methankonzentrationen im Bereich der unteren Explosionsgrenze (UEG; 4,4 Vol.-% CH₄ in Luft) warnen. Zu diesem Zweck wird der Sensor auf einer Drohne (Quadrokoopter) installiert. Die Drohne überfliegt das zu untersuchende Gelände, beispielsweise entlang von Pipelines oder anderen gasführenden Infrastrukturen.

Um für den Einsatz auf Drohnen geeignet zu sein, muss das Sensorsystem spezifische Anforderungen erfüllen. Insbesondere sind ein geringes Gewicht sowie eine niedrige Leistungsaufnahme erforderlich, da andernfalls die Flugeigenschaften und die verfügbare Akkulaufzeit der Drohne erheblich beeinträchtigt werden. Das Zielgewicht des Sensorsystems liegt dabei idealerweise unter 500 g.

Das realisierte Sensorsystem weist Außenabmessungen von 95 × 70 × 60 mm³ auf und kommt auf eine Gesamtmasse von 314 g. Die gesamte elektrische Leistungsaufnahme beträgt etwa 2 W. Mit dem Sensor lassen sich Messdistanzen von bis zu 60 m erreichen, auch auf nicht-kooperative Hintergrundziele, beispielsweise eine weiß folierte Tür. Eine fotografische Darstellung des Sensors ist in Abb. 3 gezeigt.

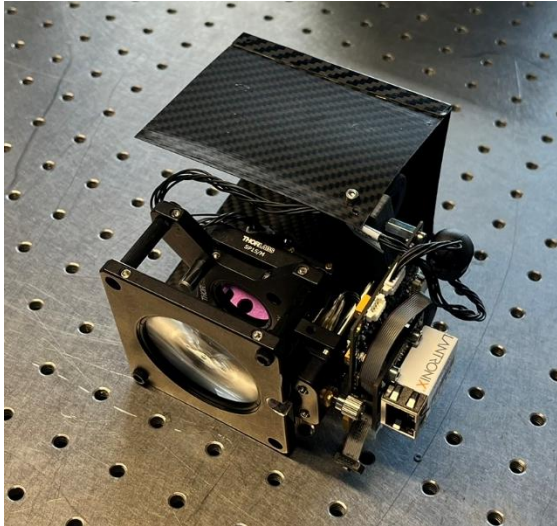


Abb. 3: Sensorsystemaufbau, erkennbar sind die Fresnel-Linse zur Sammlung des rückgestreuten Laserlichts, der optische Filter mit charakteristischer pinker Färbung, die optomechanische Baugruppe sowie die Auswerteelektronik.

Für Feldmessungen wurde der Sensor auf einem Quadroptor montiert. Als Trägerplattform kam eine Drohne auf Basis des Typs PremiumModellbau PM Q-685 zum Einsatz. Diese ist mit einem Pixhawk 2.1 Cube Orange+ Flightcontroller ausgestattet, der als Open-Source-System eine flexible und anwendungsspezifische Konfiguration ermöglicht. Der Multicopter besitzt ein Eigengewicht von etwa 1600 g und erreicht eine maximale Flugzeit von rund 50 Minuten. Bei einer Nutzlast von 500 g beträgt die Flugzeit circa 40 Minuten.

Die Positionsstabilisierung der Drohne erfolgt mittels GPS in Kombination mit Real-Time-Kinematic-Verfahren (RTK). Die Basisreferenzierung wird dabei über den RTK-Dienst SAPOS realisiert. Die Übertragung der Messdaten vom Sensor zur Bodenstation erfolgt drahtlos über WLAN.

Im Feldbetrieb auf der Drohne treten mehrere messrelevante Herausforderungen auf. Zum einen nimmt die Intensität des eingesammelten rückgestreuten Laserlichts mit zunehmender Messdistanz deutlich ab, was zu einem Anstieg des Messrauschens führt. Darüber hinaus verursacht das Hintergrundlicht durch Sonneneinstrahlung einen zusätzlichen Offset im Detektorsignal. Aufgrund dieses Offsets muss die Vorverstärkerschaltung mit TIA so ausgelegt werden, dass die erste Verstärkerstufe nur eine begrenzte Verstärkung aufweist, um eine Sättigung durch das Hintergrundsignal zu vermeiden. Nach der ersten Verstärkerstufe wird das niederfrequente Hintergrundsignal mittels eines

geeigneten Hochpassfilters unterdrückt. Erst anschließend erfolgt eine stärkere Verstärkung, um die sehr schwachen optischen Messsignale des rückgestreuten Laserlichts weiter aufzubereiten. Die optische Leistung des gesammelten Messsignals beträgt dabei, abhängig von der Messdistanz, lediglich wenige Nanowatt.

Eine weitere Herausforderung stellen Vibrationen sowie lagebedingte Stabilisierungsbewegungen der Drohne dar. Da in der vorliegenden Messkonfiguration auf den Einsatz eines Gimbals verzichtet wird, folgt der optische Messstrahl den Bewegungen des Multicopters. Dies führt dazu, dass der Laserstrahl insbesondere im Schwebeflug nicht kontinuierlich auf denselben Rückstreu hintergrund gerichtet ist. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Flughöhe.

Messungen

Zur Bewertung der Messperformance des Sensors unter realen Feldbedingungen wurden gezielte Flug- und Messkampagnen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss zentraler Randbedingungen des Drohnenbetriebs auf die Messqualität systematisch zu analysieren.

Einfluss von Rückstreu hintergrund und Messentfernung

Zur Untersuchung des Einflusses der Hintergrundbeschaffenheit sowie der Messentfernung auf das Sensorsignal wurde eine Messreihe durchgeführt, bei der sowohl der Rückstreu hintergrund als auch die Flughöhe der Drohne variiert wurden. Hierzu wurde die Drohne nacheinander über verschiedene, hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften unterschiedliche Rückstreu hintergründe positioniert. Für jeden Hintergrund wurde die Drohne stabil im Schwebeflug gehalten, während die Flughöhe schrittweise auf 2 m, 5 m und 10 m eingestellt wurde. Jede Höhenstufe wurde für eine Dauer von jeweils etwas mehr als 1 Minute beibehalten, um eine statistisch aussagekräftige Erfassung der Messdaten zu gewährleisten.

Während des Schwebeflugs wurde kontinuierlich die vom Sensor bestimmte Methan-Säulenkonzentration aufgezeichnet. Als Rückstreu hintergründe wurden folgende typische Feldoberflächen untersucht: nasser Asphalt, Pflastersteine, eine bewachsene Wiesenfläche sowie das Dach eines Fahrzeugs. Diese Auswahl deckt ein breites Spektrum unterschiedlicher Reflexions- und Streueigenschaften ab und erlaubt somit eine realistische Bewertung der Sensorperformance in praxisrelevanten Szenarien.

Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Abb. 4 dargestellt und werden im Kapitel

Diskussion detailliert analysiert und diskutiert, insbesondere im Hinblick auf Signal-Rausch-Verhältnis, Hintergrund-abhängigkeit und Entfernungseinfluss.

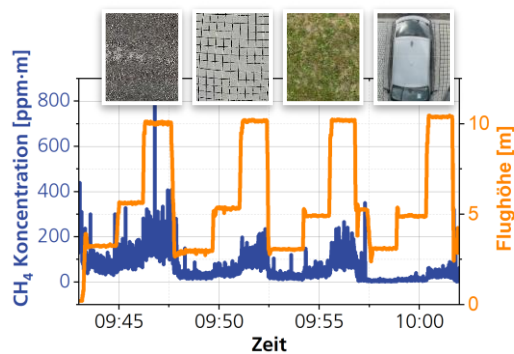


Abb. 4: Methanmessungen aus 2, 5 und 10 m Höhe über Asphalt, Pflaster, Wiese und einem Autodach.

Detektion eines simulierten Gaslecks

Zusätzlich wurde eine Messung zur Detektion eines definierten, lokal begrenzten Methanvorkommens durchgeführt. Hierzu wurde ein mit 1 Vol.-% Methan in Stickstoff gefüllter Gassack verwendet, der ein virtuelles Gasleck simulieren sollte. Der Gassack besitzt Abmessungen von $40 \times 40 \text{ cm}^2$ bei einer mittleren Höhe von etwa 20 cm und ist für Licht bei der Laser-Wellenlänge durchlässig. Um eine stabile Positionierung zu gewährleisten, wurde der Gassack mit einem KG-Rohr (Kanalgrundrohr) auf einer Asphaltfläche fixiert.

Die Messung erfolgte bei einer konstanten Flughöhe von 5 m über Grund (vgl. Abb. 5). Die Drohne überflog den Gassack mit einer horizontalen Fluggeschwindigkeit von etwa 1–2 m/s. Die Flugbahn wurde manuell so gesteuert, dass der Laserstrahl während des Überfluges möglichst auf den Bereich des Gassacks gerichtet war. Während des gesamten Überfluges wurde die Methan-Säulenkonzentration kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Messergebnisse dieser Gaslecksimulation sind in Abb. 6 dargestellt und werden ebenfalls im Kapitel Diskussion im Hinblick auf Detektionsfähigkeit und praktische Einsatzgrenzen des Sensors diskutiert.



Abb. 5: Überflug der Drohne über ein simuliertes Gasleck. Der Gassack ist mit 1 Vol.-% Methan gefüllt und mit einem KG-Rohr am Boden fixiert.

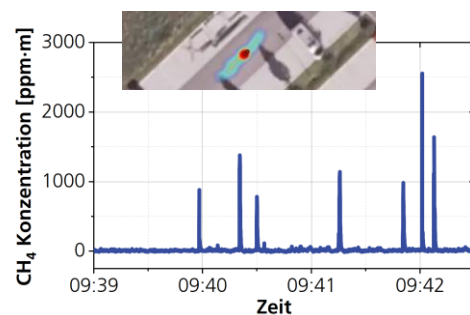


Abb. 6: Der Überflug über das simulierte Gasleck zeigt ausgeprägte Konzentrationspeaks. Mithilfe der GPS-Positionsdaten der Drohne lassen sich diese Peaks räumlich zuordnen und in einer Karte eindeutig als Leck georeferenzieren.

Diskussion

Einfluss von Rückstreu hintergrund und Messentfernung

Unter idealisierten Bedingungen ist zu erwarten, dass die gemessene Methan-Säulenkonzentration mit zunehmender Flughöhe linear ansteigt. Bei einer Methan-Hintergrundkonzentration von etwa 1,8 ppm ergeben sich theoretisch Säulenkonzentrationen von 3,6 ppm·m bei 2 m, 9 ppm·m bei 5 m sowie 18 ppm·m bei 10 m Flughöhe, sofern eine homogene

Methanverteilung entlang des optischen Pfades vorliegt.

In den durchgeführten Messungen (vgl. Abb. 4) werden diese erwarteten Werte jedoch nicht erreicht. Stattdessen zeigen sich eine deutliche Abhängigkeit der gemessenen Konzentrationen sowie der Rauschamplitude vom Rückstreu hintergrund und von der Flughöhe. Besonders über nassem Asphalt ist das Signalverhalten stark eingeschränkt. Zwar steigt die berechnete Methan-Säulenkonzentration mit zunehmender Flughöhe grundsätzlich an, die gemessenen Werte liegen jedoch deutlich über den physikalisch zu erwartenden Größenordnungen.

Diese systematische Überschätzung ist auf eine Schwäche des eingesetzten Auswertalgorithmus auf Basis einer Görtzel-FFT zurückzuführen. Bei rückstreu schwachen Hintergründen sind sowohl 1f- als auch 2f-Signalamplituden gering, sodass das absorptionspezifische 2f-Signal häufig nicht eindeutig aus dem Rauschen hervortritt. Die Amplitudenbestimmung erfolgt über die euklidische Norm der komplexen Signalanteile, die bei reinem Rauschen einen positiven Offset aufweist und dadurch zu einer Überschätzung des 2f-Signals führt. Durch die anschließende Normierung mit dem ebenfalls kleinen 1f-Signal wird dieser Effekt weiter verstärkt.

Die Stärke dieses Effekts hängt maßgeblich von der Rückstreuintensität ab. Über dem Rückstreu hintergrund "Autodach", der eine hohe Reflektivität aufweist, werden die erwarteten Säulenkonzentrationen bis zu einer Flughöhe von etwa 5 m gut reproduziert, da sich das 2f-Signal deutlich vom Rauschuntergrund abhebt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass unter realen Feldbedingungen mit nicht-kooperativen Rückstreu hintergründen derzeit nur größere Leckagen zuverlässig detektiert werden können. Die praxisnahe Nachweisgrenze liegt bei Säulenkonzentrationen oberhalb von etwa 500 ppm·m. Die Messungen verdeutlichen zugleich, dass eine Erhöhung der eingesammelten rückgestreuten optischen Leistung, etwa durch größere Empfangsöffnungen oder eine optimierte optische Kopplung, ein zentrales Potenzial zur Verbesserung der Sensorperformance darstellt.

Detektion eines simulierten Gaslecks

Bei dieser Messung wurde ein mit 1 Vol.-% Methan gefüllter Gassack mehrfach manuell aus einer Flughöhe von 5 m über Grund überflogen. Die horizontale Fluggeschwindigkeit variierte dabei und betrug bis zu 2 m/s. Der Gassack weist eine Höhe von etwa 20 cm auf, was einem einfachen optischen Weg von 0,2 m entspricht. Daraus ergibt sich für einen idealen Überflug eine erwartete Methan-Säulenkonzentration

von etwa 2000 ppm·m. Zusätzlich ist ein statischer Offset von circa 9 ppm·m zu erwarten, der auf die Methankonzentration der Umgebungsluft zurückzuführen ist.

Wie in Abb. 6 zu erkennen ist, treten die Konzentrationspeaks nicht regelmäßig auf. Dies zeigt, dass der Gassack nicht bei jedem Überflug exakt vom Laserstrahl erfasst wird. Ursache hierfür sind lagebedingte Stabilisierungsbewegungen der Drohne, die insbesondere bei manuellem Flug ohne Gimbal zu Abweichungen der Strahlposition führen. Wird der Gassack jedoch vom Messstrahl getroffen, sind deutliche Konzentrationspeaks im Bereich zwischen 800 und 2600 ppm·m zu beobachten.

Die Abweichung der gemessenen Maximalwerte von der theoretisch erwarteten Säulenkonzentration ist vor allem auf die Relativbewegung zwischen Drohne und Gassack zurückzuführen. Durch die endliche Messzeit und die zeitliche Mittelung im Auswertalgorithmus wird der Laserstrahl nur für einen Teil des Überflugs vollständig durch das Gasvolumen geführt, wodurch die Spitzenwerte abgeschwächt werden. Da sich das Methan innerhalb des Gassacks befindet, ist es von äußeren Strömungseinflüssen, insbesondere vom Propeller-Downwash der Drohne, nicht betroffen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der mit Methan gefüllte Gassack trotz der genannten dynamischen Effekte zuverlässig detektiert werden konnte. Die Messung bestätigt somit die grundsätzliche Fähigkeit des Systems, lokal begrenzte Methanansammlungen unter realistischen Feldbedingungen zu erkennen.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein drohnenbasiertes Sensorsystem zur gasfernen Detektion von Methan mittels durchstimmbarer Laserabsorptionsspektroskopie (TLS) vorgestellt, das unter realen Feldbedingungen charakterisiert wurde. Das kompakte Sensorsystem kombiniert einen DFB-Laser bei 1651 nm mit einer wellenlängenmodulierten Anregung und einer 2f/1f-Auswertung zur Bestimmung der Methan-Säulenkonzentration. Durch die Integration auf einen Quadropter können potenzielle Erdgasleckagen aus der Luft erfasst werden, wobei das System bei einer Gesamtmasse von 314 g und einer Leistungsaufnahme von etwa 2 W drohnenkompatibel ausgelegt ist.

Die Feldmessungen zeigen, dass die Sensorperformance maßgeblich von der Stärke des rückgestreuten Laserlichts abhängt. Insbesondere nicht-kooperative Rückstreu hintergründe und große Messdistanzen führen zu einem reduzierten Signal-zu-Rausch-Verhältnis und zu systematischen Überschätzungen der

Methan-Säulenkonzentration, die auf algorithmische Effekte bei der Amplitudenbestimmung zurückzuführen sind. Dennoch konnte die Detektion größerer Methanfreisetzungen zuverlässig demonstriert werden, wie Messungen an einem simulierten Gasleck mithilfe eines mit Methan gefüllten Gassacks zeigen.

Zukünftige Arbeiten sollen darauf abzielen, die Nachweisgrenze und Messstabilität weiter zu verbessern. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Erhöhung der eingesammelten rückgestreuten optischen Leistung, beispielsweise durch den Einsatz einer größeren Empfangslinse oder eines stärkeren Lasers. Darüber hinaus bieten alternative Auswertestrategien Potenzial zur Reduktion von Rauscheinflüssen. Zusätzlich könnten eine aktive Strahlstabilisierung, der Einsatz eines Gimbals oder verbesserte Flugregelungsstrategien die Reproduzierbarkeit der Messungen unter realen Einsatzbedingungen weiter erhöhen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Messtechnik auf fliegenden Plattformen“ (SPP 2433), Projekt ZeMeRGe (Projekt-nummer 541028991).

Literaturnachweis

- [1] IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, (2023); doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [2] R. A. Alvarez *et al.*, *Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, no. 17, pp. 6435–6440, (2012); doi: 10.1073/pnas.1202407109.
- [3] J. Li *et al.*, *Standoff Chemical Detection Using Laser Absorption Spectroscopy: A Review*, *Remote Sensing*, vol. 12, no. 17, p. 2771, (2020); doi: 10.3390/rs12172771.
- [4] J. T. Shaw *et al.*, *Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: a review*, *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, vol. 379, no. 2210, p. 20200450, (2021); doi: 10.1098/rsta.2020.0450.
- [5] W. Ye *et al.*, *Mid-infrared dual-gas sensor for simultaneous detection of methane and ethane using a single continuous-wave interband cascade laser*, *Opt. Express*, OE, vol. 24, no. 15, pp. 16973–16985, (2016); doi: 10.1364/OE.24.016973.
- [6] I. E. Gordon *et al.*, *The HITRAN2024 molecular spectroscopic database*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 353, p. 109807, (2026); doi: 10.1016/j.jqsrt.2026.109807.
- [7] R. Arndt, *Analytical Line Shapes for Lorentzian Signals Broadened by Modulation*, *Journal of Applied Physics*, vol. 36, no. 8, pp. 2522–2524, (1965); doi: 10.1063/1.1714523.