

# Echtzeitfähige aktive Gas-Kamera

Max Bergau<sup>1</sup>, Benjamin Scherer<sup>1</sup>, Jürgen Wöllenstein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Endress+ Hauser Process Solutions (DE) GmbH, Freiburg, Deutschland

<sup>2</sup>Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Deutschland

Kontakt: max.bergau@endress.com

## Einleitung

Gasnetze unterliegen hohen Anforderungen an Dichtigkeit. Dies ist im Wesentlichen auf Sicherheitsaspekte, Aspekte der Umweltbelastung sowie wirtschaftliche Schäden durch unbeabsichtigte Emissionen zurückzuführen. Um diese Anforderungen zu gewährleisten, ist es unabdingbar Gasleckagen Lokalisieren und idealerweise Quantifizieren zu können.

Dafür werden aktuell eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien eingesetzt. Der Wunsch, Leckagen als Bild oder Video zu visualisieren, hat dem sogenannte „Optical Gas Imaging“ (OGI) zunehmende Popularität zugespielt.

Hierbei werden thermische Kameras verwendet. Auf Basis der Infrarotabsorption der Zielgase werden diese für Menschen im Kamerabild als dunkle oder helle Wolke sichtbar. Durch diese Visualisierung eignet sich OGI besonders für die Ortung von Leckagen sowie für die grobe Quantifizierung der austretenden Stoffmengen.

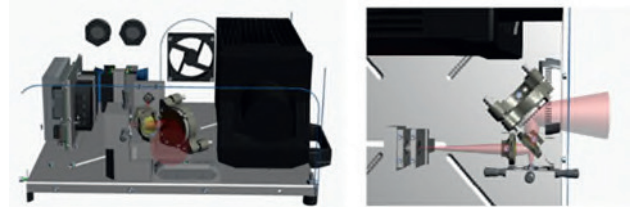
State-of-the-art OGI-Kameras nutzen einen passiven Detektionsansatz, indem sie die thermische Hintergrundstrahlung durch passende optische Filter spektral auswerten. In dieser Ausführung wird eine aktive OGI-Kamera vorgestellt. In diesem wird die Infrarotstrahlung, anhand welcher das Zielgas detektiert wird, über eine passende Beleuchtung selbst eingestrahlt.

Prinzipbedingt ist der aktive Ansatz unabhängig von thermischer Hintergrundstrahlung, bietet eine weitaus bessere spektrale Auflösung, niedrigere Detektionsgrenzen und nahezu keine Querempfindlichkeiten. Nachteilig sind kurze Reichweiten im Bereich von Metern, im Vergleich zu Kilometern bei passiven Kameras, sowie die Notwendigkeit eines Hintergrundes.

Nach unserem Kenntnisstand beschäftigen sich nur wenige Forschungsgruppen weltweit mit der Entwicklung von aktiven OGI-Kameras [1,2]. Kommerziell ist seit diesem Jahr (2021) die erste scannende aktive OGI Kamera der Firma QLM Technology Ltd. erhältlich [3]. Nachfolgend werden unsere Arbeiten an einer aktiven OGI-Kamera vorgestellt.

## Aufbau und Durchführung

Abb. 1 Links: Aufbau der echtzeitfähigen aktiven Gas-Kamera. Rechts: Top-Ansicht des skizzierten Laser-Strahlengangs. Weniger als 1% des Laserlichts wird zum Locken der gewählten Methanlinie ausgekoppelt. zeigt den Aufbau der vorgestellten aktiven OGI Kamera. Für die Beleuchtung wurde ein DFB-Interband-Kaskadenlaser (ICL) mit einer Wellenlänge um 3260 nm gewählt. Die

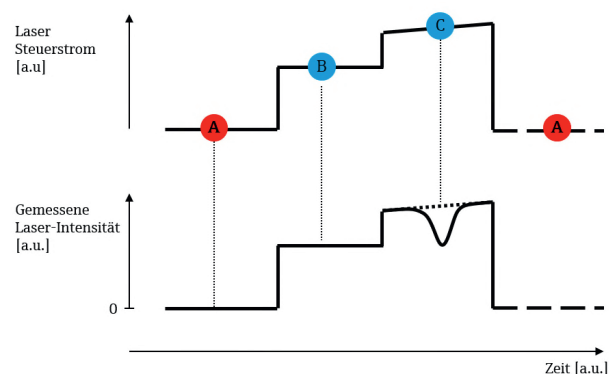


**Abb. 1** Links: Aufbau der echtzeitfähigen aktiven Gas-Kamera. Rechts: Top-Ansicht des skizzierten Laser-Strahlengangs. Weniger als 1% des Laserlichts wird zum Locken der gewählten Methanlinie ausgekoppelt.

Laserleistung der Diode beträgt 25 mW, so dass das gesamte Sichtfeld auf einmal beleuchtet werden kann. Innerhalb des Abstimmbereichs der Diode befindet sich eine der stärksten Absorptionslinien von Methan ( $\text{CH}_4$ ), dargestellt in Abb. 3 Oben: Dargestellt sind die starken Rotations-Vibrations-Absorptionslinien von Methan im verwendeten Wellenlängenbereich des ICLs., oben. Dies ermöglicht eine hohe Empfindlichkeit für die Methan-Erkennung.

Zur Bildgebung kommt eine schnelle Infrarotkamera (ImageIR 8300 hp von Infratec) zum Einsatz, welche zur Lichtquelle synchronisiert ist. Im folgenden Absatz wird dies im Detail beschrieben.

Der Aufbau ist so realisiert, dass Methan Visualisierungs- und Quantifizierungsbilder in Echtzeit, synchronisiert mit RGB und Tiefenbildern, gestreamt werden. Aktuell liegt die Bildaktualisierungsrate für Methanbilder bei 10 Hz.



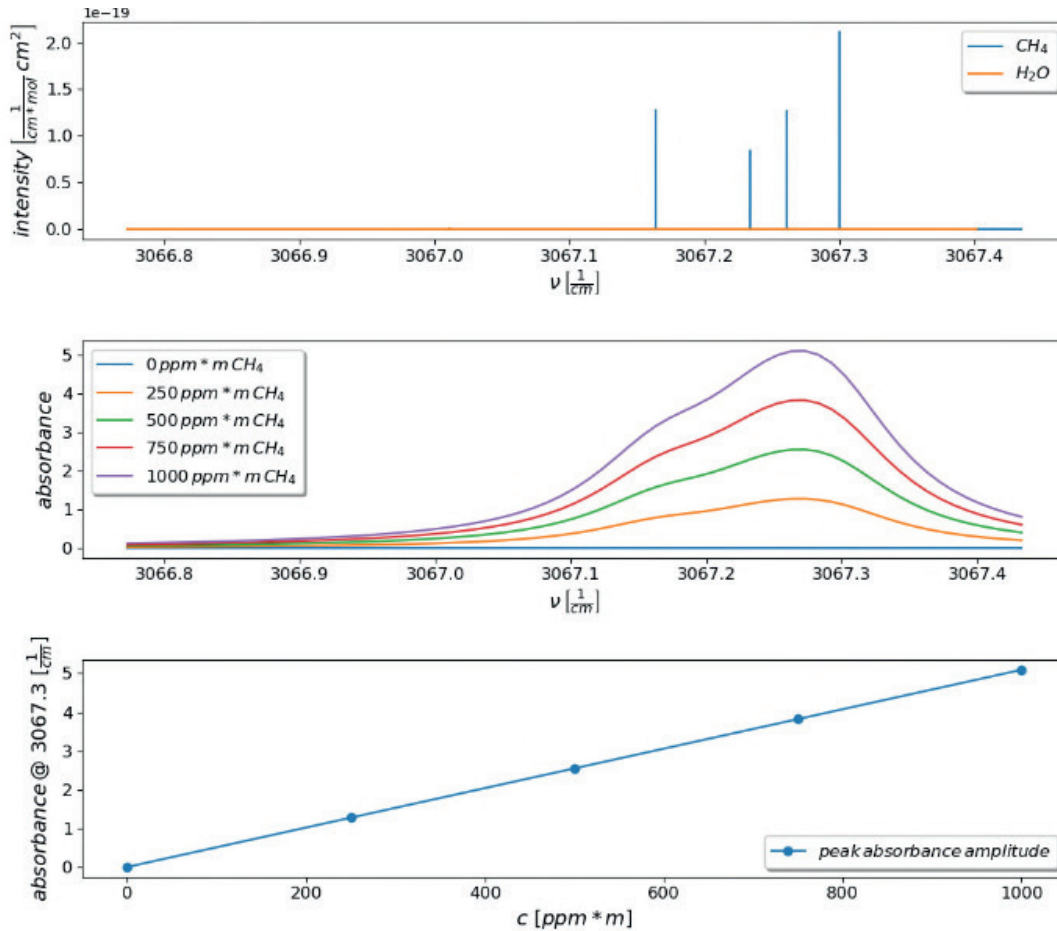
**Abb. 2** Schematische Darstellung der Laser- Bildsynchronisation. Pro Methanbild werden drei Infrarotbilder aufgenommen, hier durch A,B und C dargestellt.

## Gas Visualisierung und Konzentrationsberechnung

Zur Visualisierung und Quantifizierung von Methan wird eine Adaption der bekannten „Tunable diode laser absorption spectroscopy“ (TDLAS) bzgl. Bildgebung verwendet.

Bildaufnahme sowie der gemessenen Intensitäten. Die Bilder A,B und C messen hierbei die in Gleichung (1) verwendeten Größen  $I_{BG}$ ,  $I_0(\lambda)$  und  $I(\lambda)$  respektiv.

Dabei wird der Laserstrom mit der Kamera so abgestimmt, dass Bild C genau dann aufgenommen wird, wenn die Wellenlänge des Lasers das Absorptionsmaximum der Gasli-



**Abb. 3** Oben: Dargestellt sind die starken Rotations-Vibrations-Absorptionslinien von Methan im verwendeten Wellenlängenbereich des ICLs.

Mitte: Anhand von HITRAN-Daten ist die Absorbanz für verschieden Spalten-Konzentrationen simuliert.

Unten: Das Absorbanz-Maximum ist über verschiedene Spalten-Konzentrationsbereiche geplottet. Für die betrachtete Konzentrationsbereiche zeigt sich ein lineares Verhältnis.

Bei Bildgebenden Verfahren fallen beim Abscannen einer Gaslinie große Datenmengen an, was eine Echtzeitauswertung sehr rechenintensiv werden lässt. Deshalb wird hier, wie von [2] vorgeschlagen, die Gaskonzentration nur anhand von zwei Wellenzahl-Punkten anhand der Absorbanz berechnet wird:

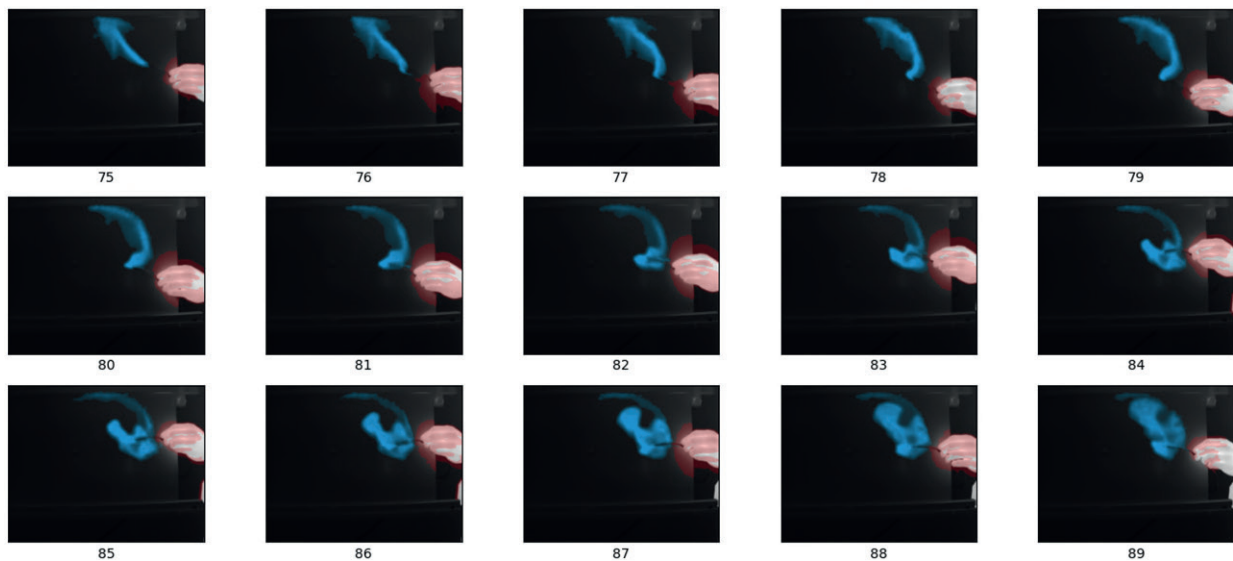
$$A(\lambda) = -\ln \left( \frac{I(\lambda) - I_{BG}}{I_0(\lambda) - I_{BG}} \right) \quad (1)$$

Der vorgeschlagene Algorithmus wird um ein weiteres Bild erweitert, um die thermische Hintergrundstrahlung aufzunehmen. Dies ermöglicht eine Methanquantifizierung auch auf heterogenen Infrarot-Reflektoren. Abb. 2 zeigt schematisch die Synchronisation von Laserstrom, der

nien trifft. Anhand der maximalen Absorbanz wird die Konzentration anhand einer HITRAN [4] Kalibrierung berechnet. Der lineare Zusammenhang zw. Konzentration und maximaler Absorbanz ermöglicht die sehr simple Konzentrationsquantifizierung ( $c$  = Spalten-Konzentration [ppm \* m]):

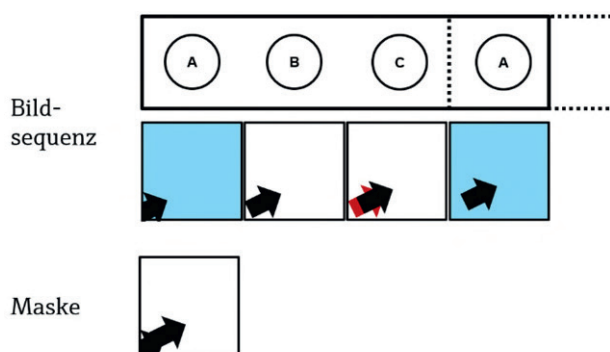
$$c = \eta \cdot A(\lambda_{peak}) \quad (2)$$

In Abb. 3 - Mitte ist die simulierte Absorbanz von Methan in Abhängigkeit der Säulenkonzentration geplottet. Der näherungsweise lineare Zusammenhang, wie in (2) verwendet, ist im unteren Teil der Grafik für bis zu 1000 ppm\*m gezeigt.



**Abb. 4** Es sind beispielhaft fünfzehn Frames aus einem Video, mit einem aus einem Schlauch austretendem Methanleck dargestellt. Die Infrarotinformation ist in schwarz-weiß visualisiert. Methan ist in Blau überlagert, wobei die Transparenz bzw. Opazität die Säulenkonzentration in  $\text{ppm} \cdot \text{m}$  widerspiegelt. Rot überlagert ist der maskierte Bereich, in dem Falschinformationen im Quotientenbild identifiziert wurden.

Die Rampe des Laserstroms um das Bild C, dargestellt in Abb. 2, dient einem Feedbackloop. Anhand einer zusätzlichen Fotodiode und einer Gas-Zelle wird die gewünschte Absorptionslinie aufgenommen, und der Laserstrom so adaptiert, dass die Bilder stets auf den gewünschten Positionen entlang der Gas-Linie aufgenommen werden.



**Abb. 5** Das echtzeitfähige Verfahren zur Ausmaskierung bewegter Objekte ist schematisch dargestellt.

Oben: In einer Bildsequenz führt das bewegte Objekt im Quotienten Bild zu falschen Gas-Informationen. Diese sind schematisch rot in Bild C dargestellt.

Unten: Durch die Verrechnung zweier sequentieller Hintergrundbilder (blau hinterlegt) wird eine Maske erzeugt, anhand welcher die Falschinformationen durch bewegte Objekte ausmaskiert werden.

## Bewegte Objekte

Die beschriebene Auswertemethode der bildgebenden Infrarotspektroskopie funktioniert gut für starre Kamera und Bildszenen. Sobald sich jedoch Objekte im Bild bewegen, werden diese im Quotienten-Bild (vgl. Gl. 1) als falsche Gassignale interpretiert. Hier kann die in jeder Bild-Sequenz zusätzlich aufgenommene Hintergrundinformation nebst der Adaption an heterogene Infrarotreflektoren einen weiteren Zweck erfüllen.

Anhand von jeweils zwei sequentiellen Hintergrundbildern kann der Bereich der Objekt-Trajektorie in Echtzeit ausmaskiert werden. Das Vorgehen ist in Abb. 4 dargestellt. Die beiden Hintergrundbilder werden mittels Absolutdifferenz und Binarisierungs-Threshold zu einer Maske verrechnet. Diese wird mit auf die erkannten Gasinformation angewendet und Falschinformationen durch bewegte Objekte werden vermieden.

## Ergebnisse

Abb. 5 Es sind beispielhaft fünfzehn Frames aus einem Video, mit einem aus einem Schlauch austretendem Methanleck dargestellt. Die Infrarotinformation ist in schwarz-weiß visualisiert. Methan ist in Blau überlagert, wobei die Transparenz bzw. Opazität die Säulenkonzentration in  $\text{ppm} \cdot \text{m}$  widerspiegelt. Rot überlagert ist der maskierte Bereich, in dem Falschinformationen im Quotientenbild identifiziert wurden. zeigt eine aufgenommene Bildsequenz eines künstlichen Methan-Lecks. Der Gasfluss

betrug 40 ml/min bei 100% CH<sub>4</sub>. Das Methan strömte aus einem Gasschlauch. Ein bewegtes Objekt wurde durch die Hand, welche den Gasschlauch hielt. In rot ist der als „bewegtes Objekt“ erkannte Bereich überlagert. In den Frames 76 bis 84 ist zu sehen, dass die Infrarotstrahlung der Hand, welche vom Hintergrund reflektiert wird, ebenfalls zu Signalen im Quotienten- bzw. Differenzbild führt und hier ausmaskiert wird. Blau überlagert ist Methan. Dabei stellt die Opazität die Säulenkonzentration dar.

## Zusammenfassung und zukünftige Arbeiten

Ein Aufbau und zur Echtzeit Methan-Visualisierung und Quantifizierung mittels aktiver Infrarot-Bild-Spektroskopie ist realisiert. Dabei kommt eine auf [2] beruhende, hier jedoch erweiterte Quantifizierungsmethodik zum Einsatz. Bei einem Gasfluss von 40 ml/min werden Methanlecks klar visualisiert und quantifiziert. Bewegt Objekte im Bild führen nicht zu Falschinformationen.

Basierend auf diesen Daten sind weitere Verarbeitungsschritte geplant, um zusätzliche Informationen zu erhalten. Beispielfhaft sei hier die Sensor-Fusion mit RGB und Tiefendaten genannt, um für Menschen intuitivere Bilder darzustellen. Weiterhin kann hiermit die Genauigkeit der Methan Quantifizierung durch Herausrechnen von Umgebungsmethan verbessert werden.

Auch bleibt die Anwendbarkeit der aktiven Gasvisualisierung auf weniger guten Infrarotreflektoren zu zeigen, sowie die Messdistanz zu erhöhen. Ein Ansatz, der dies potenziell erfüllen könnte, wäre ein „Methan- Scanner“ der mit einem fokussierten Laserstrahl das Sichtfeld in einem Raster abfährt.

## Literatur

- [1] K. J. Nutt, N. Hempler, G. T. Maker, G. P. A. Malcolm, M. J. Padgett, and G. M. Gibson, “Developing a portable gas imaging camera using highly tunable active-illumination and computer vision,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 13, p. 18566, Jun. 2020, doi: 10.1364/OE.389634.
- [2] T. Strahl, J. Herbst, A. Lambrecht, E. Maier, J. Steinebrunner, and J. Woellenstein, “Methane leak detection by tunable laserspectroscopy and mid-infrared imaging,” *Appl. Opt.*, Mar. 2021, doi: 10.1364/AO.419942.
- [3] J. Titchener, D. Millington-Smith, C. Goldsack, G. Harrison, X. Ai, and M. Reed, “Single Photon Lidar Gas Imagers for Practical and Widespread Continuous Methane Monitoring,” p. 23.
- [4] “The HITRAN2020 molecular spectroscopic database - ScienceDirect.” <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407321004416?via%3Dihub> (accessed Oct. 29, 2021).