

# Aktive optische Bildgebung zum Aufspüren von kleinen Methanlecks

## Active optical gas imaging to detect small methane leaks

Thomas Strahl<sup>1,2</sup>, Dr. Johannes Herbst<sup>1</sup>, Max Bergau<sup>2,3</sup>, Dr. Katrin Schmitt<sup>1,2</sup>, Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, Professur für Gassensoren, Universität Freiburg, Deutschland

<sup>3</sup>Endress+Hauser Process Solutions (DE) GmbH, Freiburg, Deutschland

thomas.strahl@ipm.fraunhofer.de

### Kurzfassung

Ein Gaskamerakzept zum Aufspüren von kleinen Methanlecks mit Leckraten zwischen 0,25 und 5 ml/min mit Hilfe von bildgebender Infrarotspektroskopie wird vorgestellt. Das Konzept basiert auf einer aktiven optischen Bildgebung und wurde mit einem abstimmbaren Interbandkaskadenlaser zur Methandetektion bei 3271 nm sowie einer schnellen und empfindlichen Wärmebildkamera für den mittleren Infrarotbereich (3–5  $\mu\text{m}$ ) umgesetzt. Das Leck bzw. die emittierte Gaswolke können mittels direkter Absorptionsspektroskopie in Kombination mit einem Algorithmus zur Bildverarbeitung und der HITRAN-Datenbank in einem einzigen Konzentrationsbild lokalisiert und quantifiziert werden. Die kalibrierungsfreie, pixelweise Bestimmung der Konzentration in  $\text{ppm}\cdot\text{m}$  mit einer pixelweisen Standardabweichung um 1  $\text{ppm}\cdot\text{m}$  wird demonstriert.

### Abstract

A gas camera concept for detecting small methane leaks with leakage rates between 0.25 and 5 ml/min is realized by infrared spectroscopy. The applied concept is based on an active optical gas imaging concept and was implemented with a tuneable interband cascade laser for methane detection around 3271 nm and a fast and sensitive thermal imaging camera for the mid-infrared range (3–5  $\mu\text{m}$ ). The emitted gas cloud and leak can be localized and quantified in a single image using direct absorption spectroscopy and HITRAN database in combination with image processing and an algorithm. A calibration-free, pixel-by-pixel determination of the concentration in  $\text{ppm}\cdot\text{m}$  with a pixelwise standard deviation around 1  $\text{ppm}\cdot\text{m}$  is demonstrated.

## 1 Einleitung

Die Erkennung von Gas als flüchtige Emission durch Leckagen spielt in vielen Bereichen eine zentrale Rolle. Eine frühzeitige Erkennung von Gaslecks kann durch gesundheitliche, sicherheitstechnische oder umwelttechnische Aspekte motiviert sein. Rechtliche oder wirtschaftliche Aspekte können ebenfalls eine Rolle spielen, um die Sicherstellung von industriellen Prozessen und die Funktionalität vieler Produkte zu gewährleisten. Insbesondere für Methanlecks (bzw. Erdgaslecks) ist die Visualisierung von unsichtbaren Gaslecks als Bild oder Video ein großer Wunsch, aber auch für viele Anwendungen. [1,2]

Mit Hilfe einer bildgebenden Laserspektroskopie im mittleren Infrarot wurde der Nachweis von Methanlecken mit einer Leckrate von wenigen Millilitern pro Minute demonstriert. In diesem Fall wurde eine Modulationsmethode gewählt, welche mit einer Bildrate von 125 Hz schnell ist, aber wenig spektrale Information über die Signatur der Methanabsorption nutzt oder enthält.[3]

Im Folgenden wird eine alternative Modulations- bzw. Bildverarbeitungsmethode vorgestellt, welche mehr spektrale Informationen der Methanabsorption nutzt. Der Vorteil besteht in einer allgemein robusteren und selektiveren Konzentrationsbestimmung. Das Ziel ist es mit dieser neuen Methode, die spektrale, räumliche und zeitliche Auflösung von einer Gaswolke aus einem Leck zu demonstrieren. Das Gas wird durch ein künstliches Leckszenario freigesetzt.

Die Gaskonzentration soll kalibrationsfrei durch die Wellenlängenmodulation des Lasers in Verbindung mit direkter Absorptionsspektroskopie (DAS, Beer-Lambert-Gesetz) bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird der untersuchte Bereich mit einem Interbandkaskadenlaser (ICL) beleuchtet und die diffus reflektierte Strahlung mit einer Mittelwellen-Infrarotkamera (MWIR) für den Bereich von 3–5  $\mu\text{m}$  erfasst. Viele Gase zeigen starke Absorptionscharakteristiken in diesem Wellenlängenbereich und könnten daher untersucht werden. Hier wurde Methan als Zielgas gewählt. Methan ist mit rund 90 % der Hauptbestandteil von Erdgas und die Methanleckererkennung eine der gefragtesten Anwendungen.

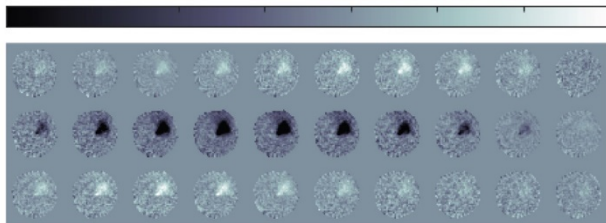
## 2 Aufbau und Durchführung

Das künstliche Leckszenario besteht aus einer kugelgestrahlten Aluminiumplatte (10×10  $\text{cm}^2$ ) mit einer zentralen Bohrung als „Leck“ (Durchmesser, 0,3 mm). Die kugelgestrahlte Oberfläche gewährleistet eine ausreichende diffuse Reflexion der einfallenden Laserstrahlung (Lambertsches Kosinusetz), um ein sog. nicht kooperatives Ziel einer realen Anwendung in der Nähe des Lecks zu imitieren. Als Leckgas wird reines Methan (100 %  $\text{CH}_4$ ) verwendet und die Leckrate wurde zwischen 0,25 und 5 ml/min variiert. Die Emissionswellenlänge des verwendeten ICLs (Nanoplus) beträgt etwa 3271 nm bei einer optischen Leistung

von ca. 5 mW. Die Wellenlänge ist abgestimmt auf eine Methanabsorptionslinie in diesem spektralen Bereich. Das Laserlicht wird auf die 2 Meter entfernte Leckplatte gerichtet und der Strahldurchmesser beträgt ungefähr 8 cm. Das rückgestreute Infrarotlicht wird mit Hilfe einer schnellen und synchronisierten Infrarotkamera (ImageIR 8320, 640x 512 Pixel, Infratec) aufgenommen. Hierbei wurde die Wellenlänge des Lasers durch einen Laserstrom periodisch moduliert (Sägezahn, 10 Hz) um den Bereich der Methanabsorptionslinie mit Hilfe von DAS zu analysieren. Die Kamera wurde mit einer Bildrate von 470 Hz betrieben, womit die Gasabsorption mit 47 Bildern (spektrale Stützstellen bzw. Wellenlängen) pro Rampe abgetastet werden kann.

### 3 Methode und Ergebnisse

Mit Hilfe von Bildverarbeitung und unter Berücksichtigung der Wellenlängen- bzw. Intensitätsmodulation des Lasers lässt sich eine (gefilterte) Form der zweiten Ableitung der Absorbanz nach der Wellenlänge darstellen (**Bild 1**). Das Methan, welches mit einer Leckrate von 1 ml/min ausströmt, wird in der Bildsequenz (3 x 10 Bilder bzw. spektrale Stützstellen) durch das hell-dunkel-hell Muster gut sichtbar. Dieses Muster lässt sich durch die zweite Ableitung einer Gasabsorptionslinie (Lorentzprofil bzw. Voigtprofil) nach der Wellenlänge erklären.

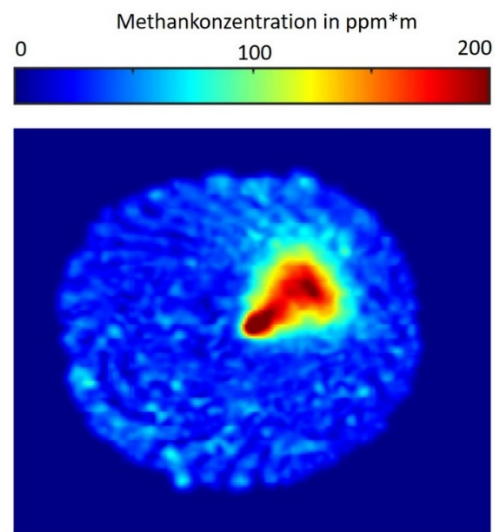


**Bild 1** Die Bildsequenz besteht aus 3 mal 10 Bildern und zeigt die spektrale Absorptionscharakteristik Methan in Form der zweiten Ableitung der Absorbanz nach der Wellenlänge.

Mit Hilfe von Parametern aus molekularspektroskopischen Datenbank HITRAN und einem Algorithmus lässt sich die generierte Bildsequenz (Bildrate, 470 Hz), welche innerhalb der 10 Hz Sägezahnmodulation generiert worden ist, in ein Konzentrationsbild (ohne weitere Kalibrierung) verarbeiten. Das Konzentrationsbild enthält pixelweise Informationen zur Methankonzentration in ppm\*m (**Bild 2**).

Basierend auf den Konzentrationsbildern können weitere Sequenzen (Videos) erstellt werden, welche insbesondere die Dynamik der Gaswolke rund um das Leck zeigen. Hierbei wird offensichtlich, dass die Gaswolke ausgehend vom Leck nicht stationär ist und eine hohe räumliche Dynamik aufweist. Des Weiteren zeigt sich, dass kleine Leckrate (< 0.5 ml/min) praktisch nur mit einer hohen Ortsauflösung zu erkennen sind, da sich das Methan aus dem Leck mit der Umgebungsluft sofort verdünnt und verflüchtigt. Unter Laborbedingungen konnte eine pixelweise Standardabweichung im Bereich von 1 ppm\*m demonstriert werden, was

eine empfindliche Methandetektion von unter 10 ppm\*m ermöglicht.



**Bild 2** Der Methanaustritt am Leck (1 ml/min) wird mit Hilfe der Methankonzentration dargestellt.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Eine empfindliche Gaskamera basierend auf einem aktiven optischen Bildgebungskonzept wurde mit einem ICL zur Methandetektion und einer Wärmebildkamera realisiert. Die Lokalisierung und Quantifizierung von Methanlecks zwischen 0,25 und 5 ml/min wird in einem einzigen Konzentrationsbild (Methankonzentration in ppm\*m) gezeigt. Eine kalibrierungsfreie, pixelweise Bestimmung der Methankonzentration in ppm\*m mit einer pixelweisen Standardabweichung um 1 ppm\*m wird demonstriert. Das Konzept zeigt ein bemerkenswertes Potenzial für die Leckerkennung bei sehr kleinen Leckagen, die auch auf andere infrarot aktive Gase im Bereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  übertragen werden kann. Des Weiteren bietet die Kombination aus räumlicher und-zeitlicher Information durch Konzentrationsbilder (Sequenz) eine sehr gute Grundlage für eine automatisierte Leckerkennung und -lokalisierung mittels künstlicher Intelligenz.

### 5 Literatur

- [1] Alvarez et. al.: "Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain," *Science* **361**, 186–188 (2018).
- [2] Nutt et. al.: "Developing a portable gas imaging camera using highly tunable active-illumination and computer vision," *Opt. Express* **28**, 18566–18576 (2020).
- [3] Strahl et. al.: "Methane leak detection by tunable laser spectroscopy and mid-infrared imaging," *Appl. Opt.* **60**, C68–C75 (2021)