

1.1 Abbildende Infrarotspektroskopie zur Fernerkundung von Gefahrstoffen

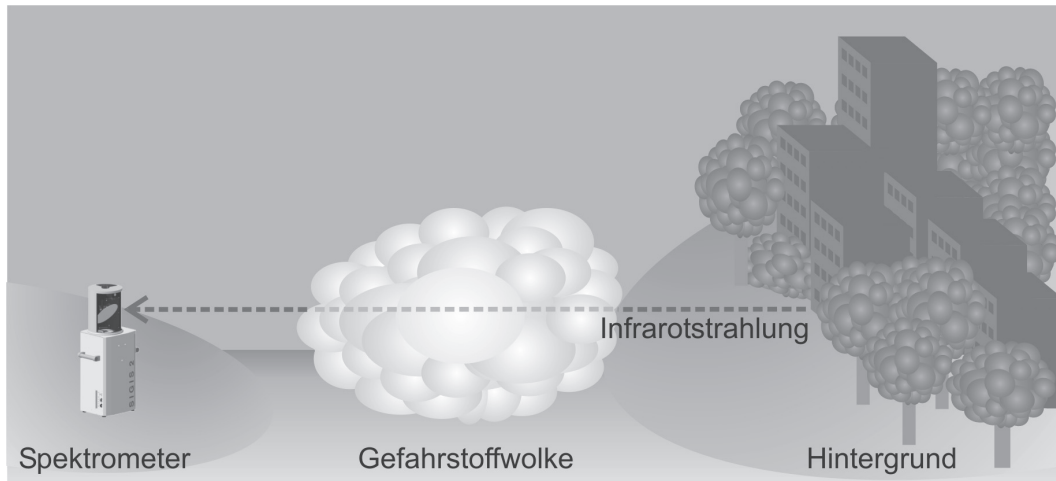


Abbildung 1: Fernerkundung von Gefahrstoffwolken mittels passiver Infrarotspektroskopie.

In Abbildung 1 ist die Wirkungsweise der Fernerkundung von Gasen mittels passiver Infrarotspektroskopie veranschaulicht. Die vom Spektrometer gemessene Strahlung enthält Anteile, die von der Gaswolke, von der Atmosphäre zwischen Spektrometer und jenseits der Wolke befindlichem Hintergrund und vom Hintergrund herrühren. Das analytische Prinzip basiert auf der Identifikation und Analyse stoffspezifischer, wellenlängenabhängiger Signaturen im Infrarotspektrum der Strahlung, die von den Molekülen der Gaswolke hervorgerufen werden [14]. Fast alle Moleküle besitzen die Eigenschaft, elektromagnetische Strahlung im infraroten Spektralbereich zu absorbieren und zu emittieren. Dies führt zu einer charakteristischen Reduktion bzw. Erhöhung der Intensität der Infrarotstrahlung des Hintergrundes.

Die am weitesten verbreitete Methode der Infrarotspektroskopie ist die Fourier-Infrarotspektroskopie [15] (auch Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie oder FTIR-Spektroskopie), bei der die Infrarotstrahlung, im Folgenden auch IR-Strahlung genannt, mit Hilfe eines Michelson-Interferometers moduliert wird, bevor sie auf einen Infrarotdetektor trifft. Die Modulation macht die Informationen über die spektrale Zusammensetzung der Strahlung im Detektorsignal zugänglich. Es ist eine

Reihe von mobilen FTIR-Spektrometern für die Fernerkundung entwickelt worden [16], [17]. Mit diesen Systemen ist jedoch zunächst nur die Messung in eine einzelne Beobachtungsrichtung, im Folgenden auch Peilrichtung genannt, möglich. Sowohl die Ausrichtung des Systems auf das Ziel als auch die Auswertung der Messdaten müssen manuell durchgeführt werden.

Der Nutzen eines Infrarot-Fernerkundungssystems kann erheblich gesteigert werden, wenn damit Abbildungen des zu überwachenden Bereichs generiert werden können. Zum einen können in der Abbildung auch kleinere Gefahrstoffwolken einfach gefunden werden, ohne dass aufwendig nach der korrekten Ausrichtung des Messsystems gesucht werden muss. Zum anderen können über die Stoffanalyse hinausgehende wichtige Informationen, wie Dimensionen und Quelle der Wolke, ermittelt werden. Einen technologischen Ansatz für den Aufbau eines abbildenden Systems stellt die Kombination eines FTIR-Spektrometers mit einem einzelnen Detektorelement und eines Spiegelsystems zur automatisierten Änderung der Peilrichtung des Systems dar. Hierdurch kann ein abbildendes System realisiert werden, ohne dass Kompromisse bei den spektralen Eigenschaften, die für die analytische Leistungsfähigkeit des Systems wichtig sind, eingegangen werden müssen [18].

Ein derartiges System, bei dem ein Interferometer mit einem Scannersystem kombiniert worden ist, wurde an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Institut für Messtechnik entwickelt und realisiert [19]. Es beinhaltet einen Algorithmus zur automatischen Analyse der in den jeweiligen Peilrichtungen gemessenen Spektren hinsichtlich des Vorhandenseins von Signaturen von Gefahrstoffen. Anhand der Ergebnisse des Algorithmus wird die zweidimensionale Abbildung des untersuchten Bereiches, im Folgenden Gefahrstoffbild genannt, erstellt.

Dieses System wurde vom Autor der vorliegenden Arbeit zunächst mit einem Videosystem, das auf einem Digitalen Signalprozessor (DSP) basiert, erweitert [13], [20]. Es ermöglicht die Aufnahme und die schnelle Verarbeitung von Bildern einer Video- oder Infrarotkamera. Auf diese Weise können Video- oder Infrarotbilder des Messgebietes aufgenommen und mit dem Gefahrstoffbild überlagert werden. Diese Bildüberlagerung ermöglicht die direkte Zuordnung der Messergebnisse zu den

zugehörigen Bereichen der Umgebung und erlaubt so eine einfache Interpretation des Gefahrstoffbildes. Die für das menschliche Auge unsichtbare Gefahrstoffwolke wird so in einem Bild der Umgebung dargestellt und kann damit einfach lokalisiert werden.

Wenn das Hintergrundbild mit einer Infrarotkamera aufgenommen wird, kann es bei bestimmten Messsituationen zur automatischen Ausrichtung des Gesichtsfelds des Infrarotspektrometers, also des Bereichs, aus dem Strahlung detektiert wird, genutzt werden. Beispielsweise können die Triebwerke eines Flugzeuges automatisch erkannt werden und das System kann zur Messung des Abgases automatisch auf ein Triebwerk eines Flugzeugs ausgerichtet werden [23]. Zur Messung von Gefahrstoffen bei Umgebungstemperatur können im Bild einer Infrarotkamera die Bereiche ermittelt werden, in denen die höchste Nachweisstärke für die Infrarotspektroskopie zu erwarten ist.

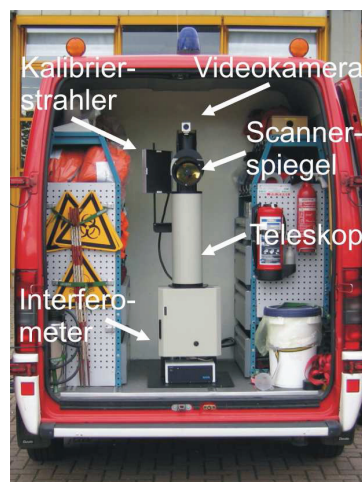


Abbildung 2: Fernerkundungssystem SIGIS im ABC-Erkundungsfahrzeug der Feuerwehr Mannheim.

Das Konzept und die gerätetechnische Realisierung des abbildenden Fernerkundungssystems sind stetig modifiziert und erweitert worden. Die Datenaufnahme-, Steuer- und Darstellungskomponenten der Software des Systems wurden hierbei vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickelt. Das erste Funktionsmodell des aktuell genutzten Systems trägt die Bezeichnung SIGIS (Scannendes Infrarot-Gasvisualisierungs-System) [18]. Von diesem Fernerkundungssystem existieren verschiedene Varianten für unterschiedliche

Applikationen. Es besteht aus einem Interferometer mit Teleskop, einem mit Schrittmotoren verstellbaren Scannerspiegel, einer Video- oder wahlweise Infrarotkamera und einem Referenzstrahler für eine radiometrische Kalibrierung, wie in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich zu einem Gerät an der TUHH wurden weitere Geräte für wissenschaftliche Institutionen in Deutschland, Großbritannien und Mexiko realisiert.

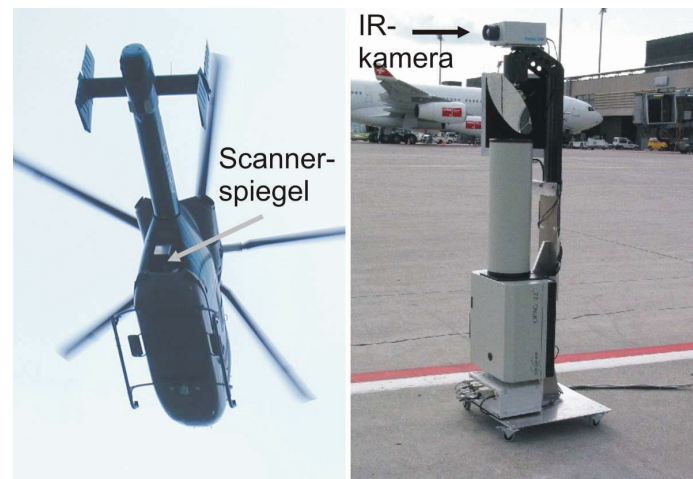


Abbildung 3: Fernerkundungssystem SIGIS in unterschiedlichen Konfigurationen. Einsatz in einem Hubschrauber (links) und auf einem Flughafen zur Fernanalyse von Flugzeugabgasen (rechts).

Dieses feldtaugliche, aber konzeptionell eher wissenschaftlich ausgelegte System wurde neben dem Haupteinsatzgebiet, der Ferndetektion von Gefahrstoffen im Rahmen des Katastrophenschutzes [21], unter anderem auch bei der Ferndetektion von Methan zur Pipelineüberwachung [22], bei der Messung der Emissionen von Flugzeugtriebwerken während des laufenden Betriebes auf Flughäfen [24], [25], [26], [27] (siehe Abbildung 3) und zur Erfassung z.B. der Schwefeldioxidemissionen aus Industrieanlagen [28] oder Vulkanen eingesetzt. Am Ätna und am Popocatepetl sind Messungen zur Erfassung der Konzentrationen von SO_2 , und HCl durchgeführt worden, um neue Erkenntnisse über die Vulkane und ihren Einfluss auf die Atmosphäre zu gewinnen [29]. Für den Einsatz am Stromboli ist ein auf dem Konzept der SIGIS basierendes, fernsteuerbares Fernerkundungssystem realisiert und am Kraterrand installiert worden. Mit diesem System erfolgt eine Dauerüberwachung der vom Vulkan emittierten Gase [30].

Zur Ausstattung der analytischen Task Forces wurde am Institut für Messtechnik der TUHH in Anlehnung an das Konzept des SIGIS-Systems ein neues feldtaugliches Fernerkundungssystem mit der Bezeichnung SIGIS 2 entwickelt [31], [32] (Abbildung 4). Die Systemsoftware wurde vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickelt. Zurzeit sind die analytischen Task Forces in Berlin, Dortmund, Hamburg, Köln, Magdeburg, Mannheim und München und darüber hinaus Feuerwehren in Rom, Wien und Kopenhagen mit diesem System ausgerüstet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei SIGIS 2-Systeme für Messungen eingesetzt. Diese wurden mit zusätzlichen Hard- und Softwarekomponenten ausgestattet, die für tomographische Messungen notwendig sind.



Abbildung 4: Fernerkundungssystem SIGIS 2. Links: SIGIS 2-System. Rechts: System in einem Messfahrzeug der Feuerwehr Hamburg.

Neben der Identifikation ermöglicht das System eine automatische Quantifizierung von Gefahrstoffen [1]. Quantifiziert wird die so genannte Säulendichte, das Integral der Konzentration eines Stoffes über den optischen Pfad. Vereinfachend wird diese Größe oft auch Konzentrations-Weglängenprodukt genannt. In Kombination mit den Abbildungseigenschaften des Systems können mit diesem Verfahren zweidimensionale Projektionen der Gaswolke (siehe Abschnitt 3.1.2) erstellt werden.

Das Verfahren, aus den Projektionen eines dreidimensionalen Objektes seine dreidimensionale Struktur zu rekonstruieren und darzustellen – die Tomographie – findet heutzutage in der Medizintechnik als bildgebendes Verfahren für die Diagnostik vielfach Verwendung [33]. Auch bei der Rekonstruktion der

Konzentrationsverteilung von Gasen sind tomographische Verfahren genutzt worden. Stuck [34] hat bereits 1977 die Verwendung von Laserabsorptionsmessungen für die tomographische Rekonstruktion der Verteilung von Luftschadstoffen vorgeschlagen. Dazu sollte ein Netzwerk von Detektoren für die Laserstrahlung verwendet werden. Die vorgeschlagene Methode ist jedoch für den Einsatz im Bereich der Fernerkundung von Gaswolken im Katastrophenfall zu aufwendig und unflexibel.

In jüngerer Zeit wurde die Differenzielle Optische Absorptionsspektroskopie (DOAS) für die tomographische Rekonstruktion von Gaswolken eingesetzt [35], [36]. Hier wird der sichtbare und ultraviolette Bereich des elektromagnetischen Spektrums untersucht. Der Einsatz im Katastrophenschutz ist jedoch nur mit starken Einschränkungen möglich. Das DOAS-Verfahren kann in einer aktiven Konfiguration unter Verwendung künstlicher Strahlungsquellen und in einer passiven Konfiguration ohne solche Quellen genutzt werden. In passiver Konfiguration kann DOAS nur bei Tageslicht eingesetzt werden. Die aktive Konfiguration erfordert die Platzierung einer Strahlungsquelle oder eines Reflektors jenseits der Wolke, was zum einen die Reichweite einschränkt und zum anderen im Fall einer Gefahrstoffwolke eine Gefahr für das Einsatzpersonal darstellt. Darüber hinaus besitzen einige Stoffe im ultravioletten Spektralbereich keine oder nur schwache Absorptionslinien (charakteristische Signaturen).

1.2 Zielsetzung und Gliederung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Charakterisierung eines tomographischen Verfahrens zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Konzentrationsverteilung von Gefahrstoffwolken. Das Verfahren soll in Zukunft dazu dienen, Informationen über Lage, Ausdehnung und Ausbreitung der Wolken und auch über die Gefahrstoffkonzentrationen innerhalb der Wolken für die Einsatzkräfte im Katastrophenschutz verfügbar zu machen.

Das Prinzip der Tomographie beinhaltet die Kombination mehrerer Projektionen, die von verschiedenen Positionen aus gleichzeitig gemessen worden sind. Hierzu sind so viele Messgeräte erforderlich, wie Projektionen gemessen werden. Weil von

hinreichend leistungsfähigen abbildenden Fernerkundungssystemen, wie dem SIGIS 2, nur wenige Geräte verfügbar sind, muss das zu entwickelnde Verfahren bereits bei zwei eingesetzten Geräten nutzbare Ergebnisse liefern.

Im folgenden Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Infrarotspektroskopie und der Fernerkundung mittels Infrarotspektroskopie dargestellt. Im Anschluss wird das Fernerkundungssystem SIGIS 2 beschrieben.

Im dritten Kapitel werden Verfahren zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Gefahrstoffwolken untersucht und das hierzu im Rahmen dieser Arbeit realisierte Verfahren dargestellt. Das Prinzip der Rekonstruktion aus Projektionen wird dargestellt. Es wird ermittelt, mit welchen Methoden die zugrunde liegende Verteilung rekonstruiert werden kann und welches Verfahren für die vorliegende Problemstellung am besten geeignet ist. Daran anschließend wird der entwickelte Rekonstruktionsalgorithmus, mit dem die Konzentrationsverteilung innerhalb der Wolke ermittelt wird, beschrieben und diskutiert.

Im vierten Kapitel wird das Verfahren anhand der Verarbeitung von Projektionen, die aus simulierten und damit bekannten Konzentrationsverteilungen errechnet wurden, charakterisiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulationen diskutiert und bewertet.

Im fünften Kapitel werden Rekonstruktionen von realen Gaswolken dargestellt und diskutiert, die aus im Rahmen von Feldmessungen in einem Industriegebiet gemessenen Projektionen berechnet wurden. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.