

Hermann Sewerin GmbH
Gütersloh

Smarte drohnenbasierte Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Methanemissionen

Abschlussbericht über das von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt
geförderte Kooperationsprojekt

Projektlaufzeit: 01.03.2021 bis 31.05.2023

Az: 35407/01

Datum: Juni 2023

Zuwendungsempfänger	Autoren
Hermann Sewerin GmbH	Dr. rer. nat. Stephan Rosendahl Dipl.-Ing. Carsten Supply Patrick Pötter-Saße (M.Sc.)
Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel	Lars Kistner (M.Sc.) Dr.-Ing. Robert Schmoll Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll

Inhalt

Inhalt	2
Abbildungsverzeichnis	3
Symbole und Abkürzungen	5
Zusammenfassung	8
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	9
1.2 Stand der Technik	9
1.3 Vorhabensziel	11
2 Szenariendefinition und Anforderungsanalyse	13
2.1 Definition relevanter Leckageszenarien	13
2.2 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation	21
2.3 Zusammenfassende Bewertung	23
3 Beschaffenheit des Experimentalsystems	24
3.1 Aufbau des Messsystems	24
3.2 Softwareintegration	27
4 Messmethoden- und Verfahrensentwicklung	31
4.1 Inspektionsplanung und Verfahren zur Kartierung und Quantifizierung von Methankonzentrationen	31
4.2 Messmodell zur Verortung der Methankonzentrationen	33
4.3 Verfahren zur Windgeschwindigkeitsschätzung	34
4.4 Messmodell zur Schätzung des Leckmassenstroms	35
5 Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse	36
5.1 Messtechnische Eigenschaften des Messsystems	36
5.2 Untersuchung relevanter Einflussgrößen auf die Messung	42
5.3 Versuche im Freifeld	47
6 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse	50
Fazit	51
Literaturverzeichnis	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche Einsatzszenarien eines smarten, fliegenden Messsystems zur Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Methanemissionen.	13
Abbildung 2: Beispiele von freiverlegten Gasleitungen an Brücken über Bahntrassen (oben) sowie Gewässern (unten).....	15
Abbildung 3: Beispiel einer Rissbildung am Rohrschutz and einer Brückenleitung über einem Gewässer.....	16
Abbildung 4: Beispiel einer Biogasanlage mit Fermenter, Nachgärer und Tragluftdach. Entnommen aus [30].	17
Abbildung 5: Beispiel von Rohrdurchführungen (a) und Übergänge von Behälterwand und Membrane (b) an Biogasanlagen. Entnommen aus [61].	18
Abbildung 6: Messpunkte einer Deponiebegehung mit einem FID nach [67].	21
Abbildung 7: Messmodul bestehend aus: (a) Gimbal, (b) Distanzsensor, (c) Übersichtskamera, (d) Detailkamera, (e) USB-Hub, (f) TDLAS und Gehäuse.....	24
Abbildung 8: Drohne DJI M300 mit: (a) Originalem Landegestell mit (b) prototypischer Landegestellverlängerung und (c) DJI Schnellverschluss mit gedämpfter Halterung.....	25
Abbildung 9: (a) Drohne DJI M300 mit (b) Bordcomputer, (c) Zusatzkomponentengehäuse, (d) TB60-Akkus, (e) Adapterplatte für Gimbal, (f) verlängertem Landegestell und (g) Messmodul.....	26
Abbildung 10: Gesamtsystem mit: (a) Drohnensystem, (b) Messlaptop, (c) RTK-Station, (d) Batteriekoffer, (e) 3D-Anemometer und (f) Funkfernbedienung.....	27
Abbildung 11: RViz-Nutzeroberfläche des Messsystems mit (a) 3D-Ansichtsbereich, (b) eigenen Werkzeugen, (c) Live-Kameraansicht und eigenen Visualisierungserweiterungen, (d) Anzeige von Messwerten und (e) Bedienelementen zum Ausführen von Aktionen.....	28
Abbildung 12: Die drei möglichen Ebenen im 3D-Ansichtsbereich: (a) technische Karte (Quelle: OpenStreetMap) (b) Satellitenbild (Quelle: HVBG) und (c) selbsterzeugtes Orthofoto.....	29
Abbildung 13: Grafische Oberfläche „rqt_ros“ zum Analysieren, Schneiden und Zusammensetzen von rosbags.....	30
Abbildung 14: Zwei Inspektionsmethoden: (a) Rasterscan aus verschiedenen Positionen und (b) Nadir-Scan mit Pendelbewegung während eines Rasterfluges.....	31
Abbildung 15: Grafische Benutzereingabe für die Scanmethoden. (a): Rasterscan aus einer festen Perspektive. (b): Scan in Nadir-Richtung mit den Parametern für einen Pendelbereich und die Pendelgeschwindigkeit.....	32
Abbildung 16: (a) Abgestecktes Zielgebiet mit dem (b) Ergebnis der automatisch berechneten Route und die (c) dazugehörige grafische Eingabemaske.....	32
Abbildung 17: (a) 2D-Konzentrationskarte, (b) Punktwolke mit allen Messungen, (c) gefilterte Punktwolke; die Farbskala geht dabei von weiß (kein Gas) zu blau (hohe Gaskonzentration).....	33
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Beziehung von Positionsmessung und Ausrichtungen der verschiedenen Koordinatensysteme.....	33
Abbildung 19: Flugroute, Platzierung des Anemometers und dominierende Windrichtung bei der Erzeugung des Trainingsdatensatzes.....	34
Abbildung 20: Referenzmesszelle.....	36
Abbildung 21: Referenz-Konzentrationsmessung von 1.000 bis 9.000 ppm m mit 10 % Methan-Stickstoffgemisch.....	37
Abbildung 22: Referenz-Konzentrationsmessung von 10.000 bis 80.000 ppm m mit 99,995 % Methan.....	37

Abbildung 23: Ansprechverhalten des Sensors (Sprungantwort).....	38
Abbildung 24: Abhängigkeit der gemessenen integralen Methankonzentration von der Scangeschwindigkeit.....	39
Abbildung 25: Gasprüfstand	39
Abbildung 26: Punktwolke und Häufigkeitsverteilung der Quantifizierung im Laborprüfstand bei einer Freisetzung von 1,1 l/min Methan.....	40
Abbildung 27: Punktwolke und Häufigkeitsverteilung der Quantifizierung im Laborprüfstand bei einer Freisetzung von 2,2 l/min Methan.....	41
Abbildung 28: Quantifizierung für die 11 Messpunkte mit den höchsten Quantifizierten Normvolumenströmen je eingestelltem Massenstrom dargestellt jeweils als Boxplot. links: 0 l/min, Mitte: 1,1 l/min und rechts: 2,2 l/min.....	41
Abbildung 29: Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Signalqualität des zurückgestreuten Messlaserstrahls des Gassensors, Tag 1 bei kompletter Bewölkung, Tag 2 und 3 wolkenlos.	42
Abbildung 30: Schätzung der Windgeschwindigkeit aus der Drohnenschräglage bei Schwebeflug (Bodengeschwindigkeit der Drohne ≈ 0) mit gemessener Windgeschwindigkeit am Anemometer.....	43
Abbildung 31: Gegenüberstellung von Polynom 1. bis 4. Grades für Modellierung des Zusammenhangs zwischen Schräglage und Windgeschwindigkeit.....	44
Abbildung 32: Drohne auf in globalen Koordinaten bekanntem Referenzpunkt.....	44
Abbildung 33: Positionsabweichung ohne Basisstation in den x- und y-Koordinaten für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen	45
Abbildung 34: Positionsabweichung mit Basisstation in den x- und y-Koordinaten für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen	45
Abbildung 35: Positionsabweichung in der z-Koordinate für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen. Links: ohne Basisstation. Rechts: mit Basisstation....	46
Abbildung 36: Positionsabweichung mit SAPOS-Basisstation in den x und y Koordinaten für verschiedene Tage	46
Abbildung 37: Scan-Methoden zum Finden von Methankonzentrationen. Die gezeigte Fläche ist etwa 10 m x 8 m groß und enthält 3 Gasproben mit einer Größe von etwa 10 cm x 10 cm. (a) 2D-Rasterkarte, (b) Punktwolke mit allen Messwerten, (c) gefiltert Punktwolke, mit Punktdichten in Abhängigkeit der Höhe der Methankonzentration.....	47
Abbildung 38: Versuchsaufbau im Freifeld mit: (a) messender Drohne, (b) Anemometer, (c) Methanflasche, (d) Prüfstand für Freistrahleakagesimulator mit Laptop zur Datenaufzeichnung und Steuerung des Mass-Flow-Controllers	48
Abbildung 39: Gasquantifizierung bei Freifeldexperimenten ohne Freisetzung von Methan .	48
Abbildung 40: Quantifizierung bei Freifeldexperimenten und einer Freisetzung von 1,1 l/min Methan	49
Abbildung 41: Quantifizierung bei Freifeldexperimenten und einer Freisetzung von 2,2 l/min Methan	49
Abbildung 42: Quantifizierung für die 11 Punkte mit den höchsten quantifizierten Normvolumenströmen je eingestelltem Referenzvolumenstrom dargestellt jeweils als Boxplot. links: 0 l/min, Mitte: 1,1 l/min und rechts: 2,2 l/min.....	50

Symbole und Abkürzungen

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
\hat{q}_V	Geschätzter Normvolumenstrom	l_n/min
\hat{q}_m	Geschätzter Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
A_{MK}	Durchströmte Fläche des Messkegels	m^2
\bar{c}	Mittlere Methankonzentration	–
C_{ppmm}	Integrale Gaskonzentration	–
M_{CH_4}	Molare Masse von Methan	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
R_{CH_4}	Spezifische Gaskonstante von Methan	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{K}}$
T_U	Umgebungstemperatur	K
T_N	Temperatur bei Normalzustand	K
\dot{V}	Volumenstrom	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
p_U	Umgebungsdruck	Pa
p_N	Druck bei Normalzustand	Pa
α	Öffnungswinkel des RMLD-Laserkegels	rad
ρ	Dichte von Methan	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
d	Messdistanz	m
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
l_n	Normliter – Gasvolumen in Litern bei Normdruck (1,01325 bar) und Normtemperatur (0°C)	$\frac{\text{m}^3}{1000}$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
API	Application Programming Interface
CH ₄	Methan
DIN	Deutsches Institut für Normung
DJI	Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
FID	Flammenionisationsdetektor
FreeRTOS	Free Real-Time Operating System
GPS	Global Positioning System
HVBG	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation
iOS	Apples mobiles Betriebssystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Infrarot
LDAR	Leak Detection and Repair
LIDAR	Light Detection And Ranging
LNG	Liquefied Natural Gas
MFC	Mass Flow Controller
MSDK	Mobile SDK
OSDK	Onboard SDK
ppm	parts per million
ppm m	parts per million meter
PSDK	Payload SDK
ROS	Robot Operating System
RTK	Real Time Kinematic
RTOS	Realtime Operating System
RViz	ROS Visualization
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der Deutschen Landesvermessung
SDK	Software Development Kit
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus
UTM	Universal Transverse Mercator
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WLAN	Wireless Local Area Network

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Smarte drohnenbasierte Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Methanemissionen“ wurde ein fliegendes Messsystem zum Detektieren, Lokalisieren, Kartieren und Quantifizieren von Methanemissionen prototypisch aufgebaut und im Labor und in Freifeldversuchen evaluiert. Dieses Messsystem soll zukünftig eine kostengünstige Inspektion von örtlich überschaubaren, aber teilweise schlecht erreichbaren, Gasanlagen, wie beispielsweise Biogasanlagen, Deponien oder Erdgasleitungen an Brücken ermöglichen. Hierdurch kann eine wesentlich effizientere Erfassung von Gasleckagestellen erreicht werden. Zusätzlich wird durch das Messsystem eine Quantifizierung der Leckagemenge ermöglicht. Dies führt zu einem objektiven Entscheidungskriterium für eine schnelle Reparatur und damit zu einer direkten und effektiven Reduktion von hoch-klimaschädlichen Methanemissionen.

Das fliegende Messsystem besteht aus einer kommerziell-verfügbaren, industriellen Quadrocopter-Drohne und einem selbst-aufgebautem Messmodul für die Fernmessung integrierter Methankonzentrationen. Die Drohne genügt dem aktuellen Stand der Technik und verfügt über eine hochgenaue Positionsbestimmung (Echtzeitkinematik, RTK) sowie verschiedene Sicherheitsfunktionen (Kollisionsvermeidung, Position-Hold, Wegpunktflug und Return-to-Home). Unter anderem ermöglichen diese Funktionen einen teilautomatisierten Betrieb des Messsystems, welche auch den erhöhten Sicherheitsanforderungen von Gasanlagen Sorge tragen. Das Messmodul besteht aus einem Infrarot-laseroptischen Methansensor, einem Laser-Distanzsensor, einer Übersichtskamera und einer Detailkamera. Dieses Messmodul ist auf einem 3-Achsen-Gimbal montiert, welcher zur Stabilisierung der Sensorausrichtung und zum Abscannen des Inspektionsareals dient. Die Bedienung des Messmoduls und die Echtzeitvisualisierung der Messdaten erfolgt auf einem Laptop am Boden.

Der Aufbau eines fliegenden Messsystems stellt hohe Ansprüche an das Messmodul. Mechanische Randbedingungen, wie geringes Gewicht, Robustheit und präzise Ausrichtung sind mit den elektrischen Anforderungen in Einklang zu bringen. Hierbei gilt es Komponenten mit niedriger Leistungsaufnahme, sowie vibrationsunempfindliche Leitungen und Stecker zu verwenden. Des Weiteren müssen Softwareanforderungen bzgl. Schnittstellen zu Sensoren, Gimbal und Drohne auf die begrenzte Rechenleistung in der Luft und die begrenzte Datenrate zum Messlaptop am Boden abgestimmt werden. Neben diesen flugtechnischen Randbedingungen steht die Messaufgabe im Vordergrund. Insbesondere die Empfindlichkeit des Methansensors und die Unsicherheit des integralen Methankonzentrationswertes ist von zentraler Bedeutung. Um zeiteffizient scannen zu können, muss außerdem die Sensordynamik optimiert sein. Die Charakterisierung des Messmoduls erfolgte in verschiedenen Laborversuchen sowie bei Testmessungen des Gesamtsystems im Freifeld.

Wird eine erhöhte Methankonzentration im Inspektionsraum detektiert, so ist diese zu lokalisieren. Hierzu wird die Drohnenposition und -ausrichtung, sowie der Gimbalwinkel und der gemessene Zielabstand genutzt. Dies ermöglicht die Erstellung von Methankonzentrationskarten. Um nun die Emissionen quantifizieren zu können (Angabe eines Normvolumenstromes), muss neben der Methankonzentration unter anderem auch die Windgeschwindigkeit (und -richtung) bekannt sein. Grundsätzlich kann diese über die Schräglage der Drohne ermittelt werden. Um diesen Zusammenhang zu ermitteln, wurden die Telemetriedaten der Drohne von den verschiedenen Testflügen ausgewertet und mit den herrschenden Windbedingungen verglichen. Dadurch konnte ein datengetriebenes Modell entwickelt und validiert werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das aufgebaute Messsystem für die vorgesehene Messaufgabe geeignet ist.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Klimawandel stellt die globale Gesellschaft vor enorme Herausforderungen. Es ist notwendig, Treibhausgasemissionen massiv zu reduzieren. Methan (CH_4) ist nach Kohlendioxid (CO_2) das zweithäufigste Treibhausgas [1]. Insbesondere aufgrund der wesentlich höheren Klimawirksamkeit (28-fach höhere Klimawirkung als CO_2 im 100-Jahres Vergleich bzw. 84-fach höhere Klimawirkung als CO_2 im 20-Jahres Vergleich [2]) wird in der Reduktion von Methan-Emissionen aktuell ein großes Potenzial zur schnellen Eindämmung der globalen Erwärmung gesehen. Insbesondere die Verringerung von anthropogenen (vom Menschen gemachten) Emissionen ist dringend erforderlich.

Methan ist alleine im Energie- und Industriesektor in 2019 für 6 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Dabei gelten laut IPCC 50 - 80 % dieser Emissionen als vermeidbar [1]. Auch in Deutschland ist Methan in Form von Erdgas ein wesentlicher Energieträger. In 2021 sind rund 30 % - 40 % des Endenergieverbrauchs (in allen Sektoren außer dem Verkehr) dem Gas (insbesondere Erdgas) [3] zuzurechnen. Aktuell (2023) werden fünf Flüssigerdgasterminals (LNG-Terminals) für insgesamt rund 10 Milliarden € gebaut [4]. Ebenfalls nicht zu vergessen ist die nach wie vor steigende Anzahl an Biogasanlagen sowohl national [5] wie auch international [6]. Selbst bei einem Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff ist zu erwarten, dass Methan als Energieträger zumindest mittelfristig (15 – 20 Jahre) Verwendung findet. Allerdings liegt gerade in diesem Zeitraum das größte Potenzial, durch die Vermeidung von Methanemissionen den Klimazielen näher zu kommen.

Die erste empfohlene Maßnahme im Positionspapier „Unterschätztes Treibhausgas Methan“ des Umweltbundesamtes [7] lautet daher: „Konsequente und regelmäßige Durchführung von Programmen zur Erkennung und Reparatur von Leckagestellen in der Gasinfrastruktur (Leak Detection And Repair (LDAR)-Programme)“. Dies lässt sich auch in anderen Quellen wiederfinden [8], [9]. Nun ist die aktuelle Technik, beschrieben Abschnitt 1.2, nicht in der Lage, diese Aufgabe effizient umzusetzen. Genau an diesem Punkt setzt das durchgeführte Projekt mit der „Smarten Methan Drohne“ an.

1.2 Stand der Technik

Methansensorik

Waren früher noch Menschen mit dem Beruf des Gasriechers im Einsatz, so setzten sich schnell in-situ Gaskonzentrationsmessgeräte durch, welche (mit verschiedenen, weiterentwickelten Messprinzipien) noch heute Stand der Technik sind [10], [11]. Diese Geräte müssen mit dem zu detektierenden Gas in Berührung kommen (in-situ).

Für die Inspektion schwer zugänglicher Bereiche wurden Fernmessgeräte, welche meist Absorptionseigenschaften von CH_4 in verschiedenen Infrarot-(IR-)Wellenlängen ausnutzen, entwickelt [12], [13]. Es sind punktuell bzw. kleinflächig messende Geräte, wie z.B. die aktiven TDLAS-Sensoren (tunable diode laser absorption spectroscopy) [13], [14], [15], verfügbar. Bei diesem Messverfahren wird ein IR-Laserstrahl zunächst in einer Wellenlänge, in der Methan absorbiert, ausgesandt und die Intensität der Reflexion gemessen. Anschließend wird der Vorgang in einer Wellenlänge, in der Methan nicht absorbiert, wiederholt. Aus dem Verhältnis

der Intensitäten der detektierten reflektierten Strahlung kann auf die integrale Methankonzentration im Messpfad geschlossen werden [13]. Um für linienförmige oder flächige Bereiche Gaskonzentrationskarten zu erstellen, muss diese Technik abtastend eingesetzt werden. Dies erfolgt bisher jedoch nur im Bereich teurer Spezialmesstechnik [16] oder in der aktuellen Forschung [13], [14]. Neben den aktiven Verfahren sind auch passiv messende, bildgebende Gaskameras verfügbar [13], [17]. Diese nutzen ebenfalls Absorptionseigenschaften von Methan im IR-Spektralbereich, allerdings wird hierbei statt einem aktiven IR-Laser passiv die vorhandene IR-Hintergrundstrahlung verwendet [18]. Der Vorteil von Gaskameras liegt in der direkten bildlichen Darstellung einer Leckage. Ein großer Nachteil dieser Systeme ist die Querempfindlichkeit zu anderen Gasen. So kann Wasserdampf oder durch Konvektion aufsteigende Luft bereits fälschlicherweise als Methanleckage interpretiert werden. Außerdem sind passiv messende Systeme weniger empfindlich als aktive, laserbasierte Systeme. Kleinere Leckagen können dadurch leicht übersehen werden. Gaskameras suggerieren hier eine Nutzerfreundlichkeit die in der Praxis nur bedingt gegeben ist. Große Leckagen können mit dem System sehr anschaulich dargestellt werden. Tatsächlich ist jedoch viel Erfahrung nötig um die Gaskamera zuverlässig zur Leckortung auch kleinerer Leckagen nutzen zu können. Schlussendlich sind Gaskameras im Vergleich zu TDLAS-Sensoren sehr teuer in der Anschaffung.

Quantifizierung von Methanleckagen

In-situ Messgeräte können in erster Linie Leckagen nur detektieren und lokalisieren. Um eine quantitative Abschätzung der massenbezogenen Emissionsrate durchzuführen, können Korrelationsfaktoren eingesetzt werden [19], [20], diese sind aber mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Soll der Methanmassenstrom genauer bestimmt werden, ist ein Auffangen bzw. aktives Ansaugen des entweichenden Gases möglich [12], [21]. Dadurch werden Druckschwankungen erzeugt, was wiederum zu großen Unsicherheiten in der ermittelten Gasmenge führt. Am Markt verfügbare Geräte zum Ansaugen wurden für Erdgas entwickelt und dürfen, wegen einer möglichen Vergiftung des Detektors, nicht für schwefelhaltige Gase, wie z.B. Biogas oder Deponiegas, eingesetzt werden [22]. Ebenso ist die Kapselung der Leckage mit erheblichem Aufwand verbunden und wird nur in Ausnahmefällen durchgeführt.

Die fernmesstechnische Quantifizierung von Leckagen ist derzeit aktiver Gegenstand der Forschung. Kommerziell ist ein System, welches mit einer teuren Gaskamera von einem US-Anbieter arbeitet, verfügbar [23], [24], [25]. Das dem System zugrundeliegende Messmodell beinhaltet jedoch viele Annahmen und Einschränkungen. Auch ist eine sehr teure Hyperspektalkamera verfügbar [26], welche eine genaue fernmesstechnische Quantifizierung ermöglicht. Diese wird ebenfalls im Bereich der Forschung eingesetzt [27], [28], ist für den Praxiseinsatz jedoch unerschwinglich. In vorhergehenden Arbeiten des Fachgebiets Mess- und Regelungstechnik wurde mithilfe einer Gaskamera [17] und zusätzlich mit einem TDLAS-Sensor ein fernmesstechnisches System zur Quantifizierung von Methanleckagen aufgebaut [29], [30]. Die Gaskamera wird hierbei zum einen zur Gaskonzentration und Ausrichtung des Messsystems zum anderen aber auch für die Messung der Methanströmungsgeschwindigkeit mittels Bildverarbeitung eingesetzt.

Ein alternativer, vielversprechender Ansatz zur Quantifizierung von Methanleckagen, welcher auch hier verfolgt wird, ist die Verwendung vergleichsweise kostengünstiger TDLAS-Sensoren sowie die Messung der Windgeschwindigkeit, um durch eine Massenbilanz die entweichende Methanmenge zu quantifizieren [14], [15], [31]. Die Details zu diesem Verfahren sind in Abschnitt 4 zu finden.

Fliegende Messsysteme

Für die Detektion und Lokalisierung von Methanleckagen in großen Arealen oder bei ausgedehnten Infrastrukturen, wie z.B. Pipelinetrassen, gibt es Anbieter, welche mit Helikoptern und speziell entwickelter Messtechnik Inspektionen durchführen, um Methanleckagen zu kartieren [16]. Für kleinere, überschaubare Bereiche sind neuerdings Systeme von unbemannten Multicopter-Drohnen mit IR-optischen Methanfernmessgeräten am Markt erhältlich, z.B. [32]. Dies wurde ermöglicht, da neuere Entwicklungen von TDLAS-Sensoren leichter und damit drohentauglich sind, z.B. [33]. Oft messen die TDLAS-Sensoren an Multicopter-Drohnen ausschließlich vertikal nach unten [32], [34], [35], [36], [37]. Dies kann z.B. bei Brücken oder komplexeren Anlagen die Detektion und Lokalisierung einer Leckage erschweren oder sogar unmöglich machen. Zur vollständigen Erfassung und Quantifizierung einer ausgedehnten Leckage ist eine positionstreue, jedoch flexible Ausrichtung des Messsystems notwendig. Dazu können TDLAS-Sensoren mit modernen Stabilisierungs- und Schwenk-Neige-Einheiten (Gimbal) kombiniert werden [38], [39]. Bisher fliegen diese Multicopter-Drohnen jedoch ausschließlich entlang vorher festgelegten Strecken oder werden manuell gesteuert. Eine Auswertung der Daten erfolgt im Regelfall erst nach der Befliegung. Eine Quantifizierung der Leckagemenge ermöglichen die kommerziell verfügbaren Systeme mit TDLAS Sensoren nicht. Es gibt neuerdings fliegende Systeme, ausgestattet mit methansensitiver Insitu-Messtechnik, die eine Quantifizierung der Gesamtemission einer Anlage ermöglicht [40]. Diese Systeme arbeiten jedoch in größerer Höhe. Die Lokalisierung einzelner defekter Komponenten ist nur sehr begrenzt möglich. Die Lokalisation erfolgt durch Modellrechnung auf Basis von Winddaten und Gaskonzentrationskarten. Einzelne Anlagenteile können nicht inspiziert werden. Auf Basis der Informationen ist zunächst keine spezifische Wartungsplanung möglich.

Im Bereich der Forschung werden TDLAS-Sensoren an Drohnen sowohl für die Quantifizierung, als auch für andere Aufgaben eingesetzt. Neben den in der Regel eingesetzten Multicopter-Drohnen gibt es eine Starrflügler-Drohne, welche allerdings mit In-situ-Sensorik ausgestattet ist [41]. Eine Arbeitsgruppe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat zunächst eine Multicopter-Drohne mit in-situ Messtechnik ausgestattet [42], [43], [44], nutzt nun aber einen TDLAS-Sensor mit Gimbal [45], [46], [47], [48]. Eine Quantifizierung der Leckage erfolgt in diesen Arbeiten allerdings nicht. Die Quantifizierung mittels scannendem TDLAS [14] und Multicopter-Drohne [15], [31] wurde in der Forschung erfolgreich getestet. Hierbei wird allerdings keine optimierte Ausrichtung des Sensors oder eine intelligente, sich situativ anpassende Pfadplanung betrachtet.

1.3 Vorhabensziel

Ziel des Projektes war es, die Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Methanemissionen mit einem smarten, drohnen-basierten Messsystem zu prototypisch zu entwickeln.

Das geplante Messsystem sollte in der Lage sein Gasleckagen, die im Betrieb von Anlagen auftreten, mittels methanselektiver, laserbasierter Fernmesstechnik zu detektieren. Die Leckage sollte im Anschluss lokalisiert und quantifiziert werden. Ein fliegendes Messsystem kann große Bereiche in kürzester Zeit inspizieren. Außerdem können schlecht erreichbare Stellen wie bspw. Kuppeln von Gasspeichern oder freiliegende Versorgungsleitungen (z.B. Erdgas) bei Brücken mit deutlich geringerem Zusatzaufwand untersucht werden. Insbesondere der Aspekt Quantifizierung ist hierbei von zentraler Bedeutung. Etablierte Verfahren zur Quantifizierung wie sie zuvor beschrieben wurden, sind aufwendig und mit großen Unsicherheiten behaftet. Durch die wesentliche Vereinfachung des Arbeitsablaufes mit einem smarten, fliegenden

Messsystem könnten deutlich öfter und umfangreicher Messungen der Methanemissionen erfolgen. Durch diese Erweiterung der Inspektionsmöglichkeiten können Leckagen schneller entdeckt und beseitigt werden. Dies führt zu einer direkten Minderung von Methanemissionen. Bisher gibt es am Markt kein geeignetes fliegendes System, das Leckagen direkt detektieren und auch noch zeit- und kosteneffektiv mit geringen Unsicherheiten quantifizieren kann.

In diesem Projekt sollte eine kommerziell erhältliche Drohne, ausgestattet mit modernsten Sicherheits- und Unterstützungssystemen mit einem selbstentwickelten Messmodul kombiniert werden. Eine intelligente, bedienerfreundliche Steuersoftware sollte den praxistauglichen „Ein-Personen-Betrieb“ des Messsystems und damit eine kosteneffiziente Inspektion ermöglichen. Eine smarte Systemsteuerung zur intelligenten Ausrichtung des Messsystems sollte aufgebaut werden. Auf Basis von detektierten Methan-Emissionen soll das System optimierte Flugrouten zur detaillierteren Lokalisierung und Quantifizierung errechnen und vorschlagen (semi-autonomer Betrieb). Diese Funktionen sind am Markt einzigartig. Hier sollten insbesondere die jahrelangen praktischen Erfahrungen in der Lecksuche, welche die Firma Sewerin in das Projekt miteinbringt, genutzt werden, um das System spezifisch zu entwickeln und zu optimieren.

Nach der Demonstration der Sicherheit des Systems und mit den erforderlichen Genehmigungen soll das fliegende Messsystem im öffentlichen Raum z.B. zur Überprüfung des Erdgasnetzes, von Biogasanlagen, Deponien oder für Brückeninspektionen genutzt werden. Das modulare System mit wechselbarem Messmodul stellt zudem eine Plattform für verschiedene Inspektionsaufgaben dar. Beispielsweise würde sich durch Anpassung der Messausrüstung auch eine mobile Überwachung, Kartierung und Quantifizierung der Stickoxid- oder Feinstaubbelastung in Ballungsgebieten realisieren lassen.

2 Szenariendefinition und Anforderungsanalyse

2.1 Definition relevanter Leckageszenarien

Die Lecksuche aus der Luft bringt, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, mehrere Vorteile. Im Folgenden sollen verschiedene praktische Szenarien, in der das smarte Drohnenmesssystem eingesetzt werden kann, diskutiert werden. Die möglichen Einsatzgebiete, die auch für erste Feldversuche mit dem „Smartem Messsystem“ in Frage kommen, sind in Abbildung 1 dargestellt. Dazu zählen freiverlegte Leitungen für den Gastransport, Brückenleitungen, Biogasanlagen sowie Deponien. Diese Installationen und Anlagen eignen sich zur Befliegung und sind für erste Feldversuche gut zugänglich.

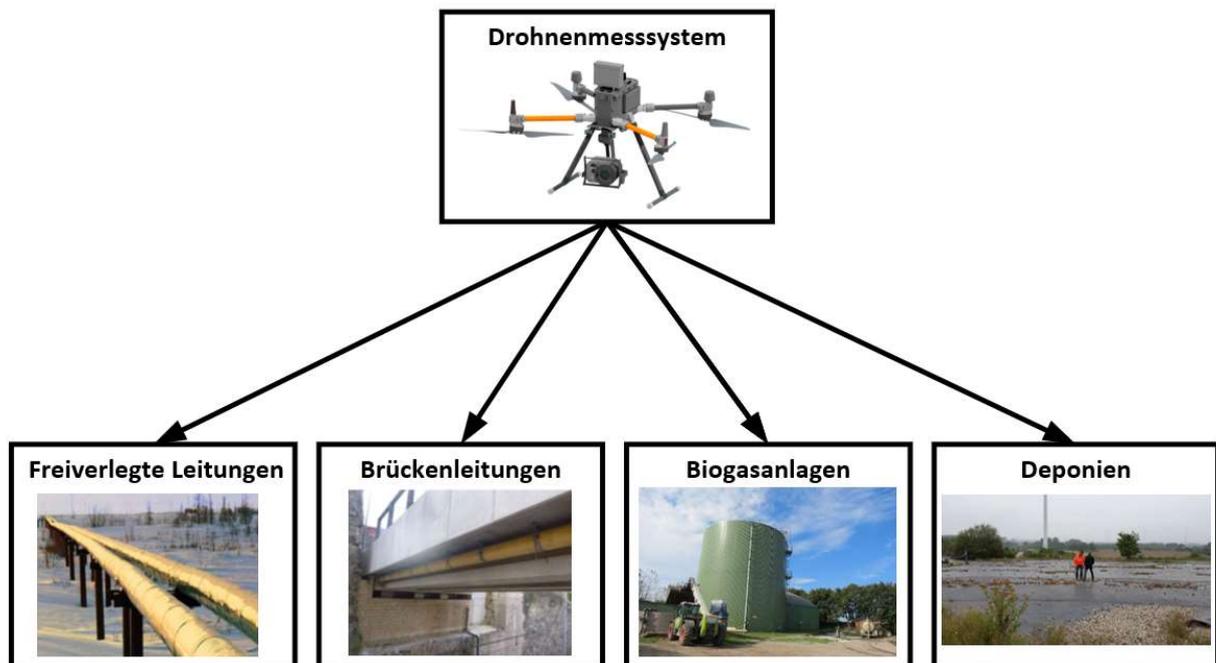


Abbildung 1: Mögliche Einsatzszenarien eines smarten, fliegenden Messsystems zur Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Methanemissionen.

Eine weitergehende Verwendung des „Smarten Messsystems“ für z.B. Verdichterstationen oder andere Industrieanlagen ist perspektivisch ebenso vorstellbar. Aufgrund der technischen Komplexität der Anlagen und den damit verbundenen Prüfungsanforderungen konnten diese in diesem Projekt noch nicht untersucht werden. Es wird erwartet, dass bei diesen Anlagen auch zusätzliche luftfahrtrechtliche Vorgaben hinsichtlich der Befliegung mit Drohnen beachtet werden müssen.

1. Freiverlegte Leitungen

Zum Stichtag 31.12.2021 betrug die gemeldete Gesamtnetzlänge in Deutschland etwa 529.000 km mit ~11,3 Mio. Ausspeisepunkten [49]. Davon sind 117.000 km Gasleitung (teilweise freiverlegt) mit Betriebsdrücken > 1 Bar beaufschlagt. Die Anforderungen an die Prüfung

dieser Infrastruktur ist im DVGW-Regelwerk festgelegt [50] [51] [52]. In Tabelle 1 sind die Zeitabstände für die Prüfung angegeben.

Tabelle 1: Anforderungen an die Prüfzyklen von Gasleitungen. Auszug aus dem DVGW-Regelwerk [50] [51] [52].

Betriebsdruck	Überprüfung auf Leckstellen	Erweiterte Zustandsprüfung
≤ 5 bar	4 Jahre	4 Jahre
> 5 bar; ≤ 16 bar	2 Jahre (außerhalb Bebauung) 1 Jahr (innerhalb Bebauung)	2 Jahre
>16 bar	2 Monate (Begehung/Befahrung innerhalb Bebauung) 1 Monat (Befliegung innerhalb Bebauung) 4 Monate (Begehung/Befahrung außerhalb Bebauung) 1 Monat (Befliegung außerhalb Bebauung)	2 Jahre (Rohrbefestigungen & Korrosionsschutz)

Im Hinblick auf die verwendete Messtechnik sind ebenfalls die vom DVGW aufgestellten Regeln zu beachten [53]. Seit 2019 wird erstmalig auch die optische Messtechnik im Regelwerk mit aufgeführt. Das smarte Drohnensystem fällt mit seinem laserbasierten Methansensor in diese Kategorie und lässt sich daher nach den im Regelwerk bekannten Verfahren bewerten und einsetzen.

Die Überprüfung von freiverlegten Fernleitungen mit Betriebsdrücken >16 bar kann nach dem DVGW-Regelwerk mittels Befliegung durchgeführt werden und ist alle vier Wochen durchzuführen [52]. Diese Inspektionen werden bereits seit einigen Jahren mit optischer Messtechnik aus einem Helikopter durchgeführt. Hierfür gilt ein gesondertes DVGW-Merkblatt [54]. Die Inspektion mit dem Helikopter sind jedoch mit einigen Problemen verbunden. In den Sommermonaten wird die Sicht auf die Leitungen durch das Laubwerk der Bäume behindert [55]. Mit einem Drohnensystem wäre eine Inspektion im Tiefflug möglich. Weiterhin werden in der Praxis die Leitungen nur bis zum Ortsrand mit dem Helikopter geprüft [55]. Innerorts wird die Prüfung der Leitungen mit in-situ Messtechnik nach den DVGW-Verfahren [50] [51] durchgeführt. Hier ist mit einer Drohne eine durchgängige Kontrolle auch innerhalb der Bebauung aus der Luft möglich. Die Ausführungen zur Befliegung sind im DVGW-Regelwerk [52] allgemein gehalten und können auch für Drohnen angewendet werden. Schlussendlich sind die Anschaffungs- und Betriebskosten einer Drohne im Vergleich zu einem Helikopter deutlich geringer.

Leckagen an Fernleitungen sind erfahrungsgemäß Punktleckagen an Flanschverbindungen. Leitungsbrüche durch Materialermüdung der Rohrleitungen sind aufgrund des guten Korrosionsschutzes vergleichsweise selten, sie können aber auch durch seismische Aktivität (z.B. in Bergbaugebieten) oder nahe gelegenen Bauarbeiten verursacht werden.

Freiverlegte Leitungen sind gute Kandidaten für eine Lecksuche mittels Drohne. Im Vergleich zur konventionellen Begehung zu Fuß, mitunter durch unwegsames Gelände, bietet die Befliegung eine effizientere Alternative. Für die Anwendung des Messsystems in Siedlungsnähe bleibt zu beachten, dass die Systemsicherheit gewährleistet sein muss. Hierzu finden sich in Abschnitt 2.3 detailliertere Angaben.

2. Brückenleitungen

Die Prüfung von Gasleitungen an Brücken zählt zu den wiederkehrenden Aufgaben des Gasspürers. Die Anzahl an Brückenleitungen in Deutschland ist unserer Kenntnis nach bisher in keinem öffentlichen Monitoringbericht erfasst worden. Die Spezialisten aus der Rohrnetzüberprüfung der Firma Sewerin inspizieren bereits mehrer hundert Brückenleitungen im Jahr.



Abbildung 2: Beispiele von freiverlegten Gasleitungen an Brücken über Bahntrassen (oben) sowie Gewässern (unten)

Auch hier ist die Art der Prüfung und das Prüfungsintervall im DVGW-Regelwerk beschrieben. Daneben existieren noch die Vorgaben des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur [56]. Beide Regelwerke fordern eine jährliche Überprüfung der Gasleitung sowie eine Überprüfung des Rohrschutzes sowie der Rohrbefestigung im 2-jährigem Intervall. Beim Rohrschutz handelt es sich um eine Kunststoffhülle, welche die Rohre umschließt. Bei der Sichtprüfung des Rohrschutzes sowie der Rohrbefestigungen sollen mechanische Beschädigungen entdeckt und behoben werden (siehe Abbildung 3). Die Sichtprüfung soll vom smarten

Drohnen-system durch Nutzung von hochauflösenden Kamerabildern während der Lecksuche durchgeführt werden. Insbesondere Schäden am Rohrschutz fallen bei Inspektionen regelmäßig auf und können gut behoben werden. Sie entstehen durch die einwirkende UV-Stahlung,



Abbildung 3: Beispiel einer Rissbildung am Rohrschutz and einer Brückenleitung über einem Gewässer

welche den Kunststoff brüchig macht. Hinzu kommen die Temperaturunterschiede in den Jahreszeiten sowie die Eigenbewegung der Brücke. Diese Beschädigungen können gut behoben werden, wenn sie rechtzeitig entdeckt werden. Seltener hingegen sind Gasleckagen zu finden. Sie treten hauptsächlich, wie auch bei freiverlegten Leitungen, als Punktquellen an den Flanschverbindungen auf. Das Methan sammelt sich erfahrungsgemäß im Raum zwischen Rohrleitung und Brückenkörper.

Die Brückenleitungen führen zumeist über Autobahnen, Bahntrassen, Talbrücken und Gewässer (siehe Abbildung 2). Herkömmliche Prüfungen sind daher in der Regel mit enormen logistischen Herausforderungen verknüpft, wie z.B. Teilsperren von Autobahnen mit daraus resultierenden Verkehrsstörungen und etwaigen Unfällen. Es werden auch regelmäßig Hubarbeitsbühnen sowie schwere Brückenuntersichtgeräte eingesetzt, um den Gasspürer in die Nähe der Rohrleitung zu bringen. Diese Prüfungen sind mit enormen Kosten und Zeitaufwand verbunden.

Die Nutzung von Drohnensystemen für diese Art der Überprüfung würde einen großen Mehrwert bedeuten, wenn sich dadurch der logistische Aufwand verringert lässt. Der Start einer Drohne ist mit deutlich weniger Aufwand verbunden, als der Aufbau einer Arbeitsbühne. In Bereichen mit Personenverkehr sowie sonstigem bebautem Gebiet ist auch hier eine hohe Systemsicherheit zu gewährleisten. In der Nähe vom Straßenverkehr ist darauf zu achten, die Verkehrsteilnehmer nicht zu erschrecken und somit das Risiko von Verkehrsunfällen nicht zu erhöhen.

3. Biogasanlagen

Biogas zählt zu den erneuerbaren Energien und ist eine Säule der Energiewende. Es gibt in Deutschland 2021 etwa 9800 Biogasanlagen [57]. Die Prüfung von Biogasanlagen gewinnt nach Inkrafttreten der „*Technischen Regeln für Anlagensicherheit 120*“ [58] immer mehr an Bedeutung.



Abbildung 4: Beispiel einer Biogasanlage mit Fermenter, Nachgärer und Tragluftdach. Entnommen aus [30].

Die Ortung von Gasleckagen von Biogasanlagen sind daher für den Anlagenbetreiber zur Erfüllung seiner gesetzlichen Verpflichtungen und aus ökonomischen Aspekten interessant. Weiterhin hat der Betreiber für seine Mitarbeiter ein sicheres Arbeitsumfeld zu schaffen. Dazu zählt auch die Vermeidung von Emissionen zur Wahrung der Arbeitssicherheit. Schlussendlich kommt die Reduzierung der Emissionen auch den Anwohnern der Biogasanlage und den Nutzern von Biogas zugute. Die Erzeugung von Biogas ist nur dann klimaschonend solange die Anlage leckdicht betrieben wird. Die Prüfung von Biogasanlagen ist somit von gesamtgesellschaftlicher Relevanz.

Die Prüfung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung des DVGW-Regelwerks [51] [59] ist seit Inkrafttreten der TRAS120 nicht mehr ausreichend. So fordert die TRAS120 explizit die Überprüfung mit geeigneten optischen Verfahren, während das DVGW-Regelwerk dies nicht zwingend vorsieht. In der Praxis werden bei Biogasanlagen daher häufig Gaskameras zur Leckortung eingesetzt. Der Ablauf einer solchen Inspektion ist erstmalig in der Richtlinie „*Diffuse Emissionen - Optische Gasdetektion zur Überprüfung von Anlagen – Biogasanlagen*“ beschrieben [60]. Diese ist seit 11/2022 als Entwurfsfassung verfügbar. Die Richtlinie beinhaltet hauptsächlich die Inspektion mit Gaskameras, die Verifikation von Leckagen mittels laserbasierter Messtechnik wird aber ebenfalls thematisiert.

Zu erwarten sind sowohl punktuelle als auch flächige Leckagen. Sie treten der Erfahrung nach gehäuft an folgenden Stellen auf:

- Verbindung zwischen Behälterwänden und Gasmembranen (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5)
- Rohrdurchführungen/Schauenster (siehe Abbildung 5)
- Überdruck-/Unterdrucksicherungen
- Flanschverbindungen an Rohrleitungen
- Lüftungsklappen Tragluftdach (Querstromlüftung)
- Gasmembranen bei Einfoliendächern (Löcher in Folie)
- Dichtungen an Rührwerken



Abbildung 5: Beispiel von Rohrdurchführungen (a) und Übergänge von Behälterwand und Membrane (b) an Biogasanlagen. Entnommen aus [61].

In vorangegangenen Projekten zur Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen an Biogasanlagen [62] [61] sind bei verschiedenen Biogasanlagen Leckagen in der Größenordnung zwischen $8 \text{ l}_N/\text{h}$ und $2653 \text{ l}_N/\text{h}$ (Mittelwert von $\sim 110 \text{ l}_N/\text{h}$) quantifiziert worden. Diese Größenordnung ist auch für die Befliegung mit dem Drohnensystem zu erwarten.

Da Biogasanlage aufgrund des Emissionsschutzes meist siedlungsfern errichtet werden, sind sie in der Regel gut für Befliegungen geeignet. Jedoch ist darauf zu achten, dass die Drohne nicht in explosionsgefährdete Bereiche gelenkt wird. Ferner sind Biogasanlagen in einigen Fällen auch mit Stallungen für die Tierhaltung verbunden. Daher ist auch hier die System-sicherheit zu gewährleisten.

4. Deponien

Deponien haben aufgrund der Umsetzung organischer Reststoffe ein enormes Emissionspotenzial für methanreiches Gas. In Deutschland gab es 2021 knapp 1000 Deponien in denen fast 40 Mio t Abfälle gelagert wurden [63]. Es wird angegeben, dass in deutschen Deponien jährlich etwa 500.000 t Methan entstehen [64]. Zwar konnte die Emission von Methan aus Deponien in Deutschland zwischen 1990 und 2015 bereits um ca. 70 % bedingt durch Innovationen in der Abfallverarbeitung sowie der Sammlung (aktive Entgasung) und Verwertung des emittierten Methans gemindert werden [65]. Regelmäßige Prüfungen sind vorgeschrieben: „Die Wirksamkeit der aktiven Entgasung ist auf der Deponieoberfläche und im Deponierandbereich im Rahmen der Fremdkontrolle halbjährlich mittels FID zu überwachen“ [66]. Beim FID (Flammenionisationsdetektor) handelt es sich um ein methansensitives Messgerät welches Gas aus der Umgebung über eine Sonde (Glockensonde) aktiv ansaugt und analysiert. Das Gerät wird am Körper getragen und der Gasspürer geht damit die Deponie ab. FID-Begehungen erlauben eine hohe Zahl an Einzelmessungen zu moderaten Kosten. Obwohl die Verordnung [66] bereits nicht mehr aktuell ist, wird ihr Inhalt in der Praxis immer noch angewendet. Nach der Handlungshilfe „Messungen auf Deponien mit dem Flammenionisationsdetektor“ [67] und der VDI-Richtlinie " Messen von Deponiegas“ [68] eignet sich eine FID-Begehung zur

- Wirkungskontrolle von aktiven Entgasungsanlagen
- Feststellung und Lokalisierung von Deponiegasaustrittsstellen oder Gasmigrationen
- Prüfung von Gaskollektoren, Gasleitungen und Gassperren auf Leckagen
- Erkennung von Änderungen der Gasemission im Zeitverlauf
- Eingrenzung der Ursache von Vegetationsschäden.

Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet und können Hinweise auf Probleme bei der Entgasung oder auf Schäden bei der Oberflächenabdichtung liefern. Die Anforderungen und Grundsätze einer FID-Begehung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Anforderungen an Messungen auf Deponien [67].

Merkmal	Anforderungen und Grundsätze
1. Zufällige Auswahl innerhalb einer Rasterung	Messung an gesamter Deponieoberfläche: ➤ Mindestens drei zufällig gewählte Punkte innerhalb eines quadratischen Messrasters mit 20m Seitenlänge.
2. Gezielte Auswahl	Messung an Auffälligkeiten und besonders interessierenden Stellen, wie: ➤ Wuchtschäden ➤ Rutschungen ➤ Risse und Spalten im Gelände ➤ Wandungen und Dichtungsbereiche an baulichen Anlagen durch die Oberflächenabdichtung, wie Gaskollektoren, Schächte, Kabelzugschächte, Fundamente ➤ Übergänge zwischen abgedichteten und nicht-abgedichteten Bereichen der Deponieoberfläche, Einbindegräben und Kunststoffabdichtungsbahnen ➤ Sensible Einrichtungen im Deponieumfeld ➤ Ausgewählte Werte über 1000 ppm der letzten FID-Begehung

3. Verdichtung	Messungen um Messstellen mit Werten über 100 ppm: ➤ Jeweils 4 Messungen radialsymmetrisch im Abstand von 3 m
4. Wiederholungsmessung und Qualitätssicherung	Auswahlkriterien für Messort und -zeitpunkt: ➤ An mindestens 20 % der Bereiche mit Konzentrationswerten über 1.000 ppm jeweils arbeitstäglich am Ende der FID-Begehung

Die Anwendbarkeit der Grenzwerte der Methankonzentration in der Einheit (ppm) aus **Tabelle 2**, basierend auf [67] ist für ein fliegendes Messsystem zunächst nicht gegeben, da das Fernmesssystem die Methankonzentration im ganzen Messweg aufsummiert und in Einheiten (ppm*m) ausgibt. Hier können jedoch Vergleichsmessungen durchgeführt werden um entsprechende Grenzwerte der integralen Gaskonzentration zu bestimmen. Diese könnten zukünftig auch zur Erweiterung des Regelwerks herangezogen werden.

Des Weiteren sind verschiedene Randbedingungen zu erfüllen, sowie Messungen der Umgebungsbedingungen am Messtag durchzuführen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Randbedingungen für FID-Begehungen auf Deponien am Messtag nach [67].

Merkmal	Genauigkeit	Rhythmus
1. Lagebestimmung der Messstellen mit GPS oder terrestrischer Einmessung	± 2 m	
2. Lufttemperatur	± 1°C	Alle 2-3 Stunden
3. Luftdruck	± 1 mbar	Alle 2-3 Stunden
4. Windgeschwindigkeit in Bodennähe (2,00 bis 2,50 m über Geländeniveau)	± 0,5 m/s	Stündlich
5. Windrichtung	verbale Beschreibung	Alle 2-3 Stunden
6. Niederschlagsverhältnisse	verbale Beschreibung	Im Tagesverlauf

In Abbildung 6 ist eine Beispielkarte mit den Messpunkten einer FID-Begehung aus der Handlungshilfe [67] dargestellt.

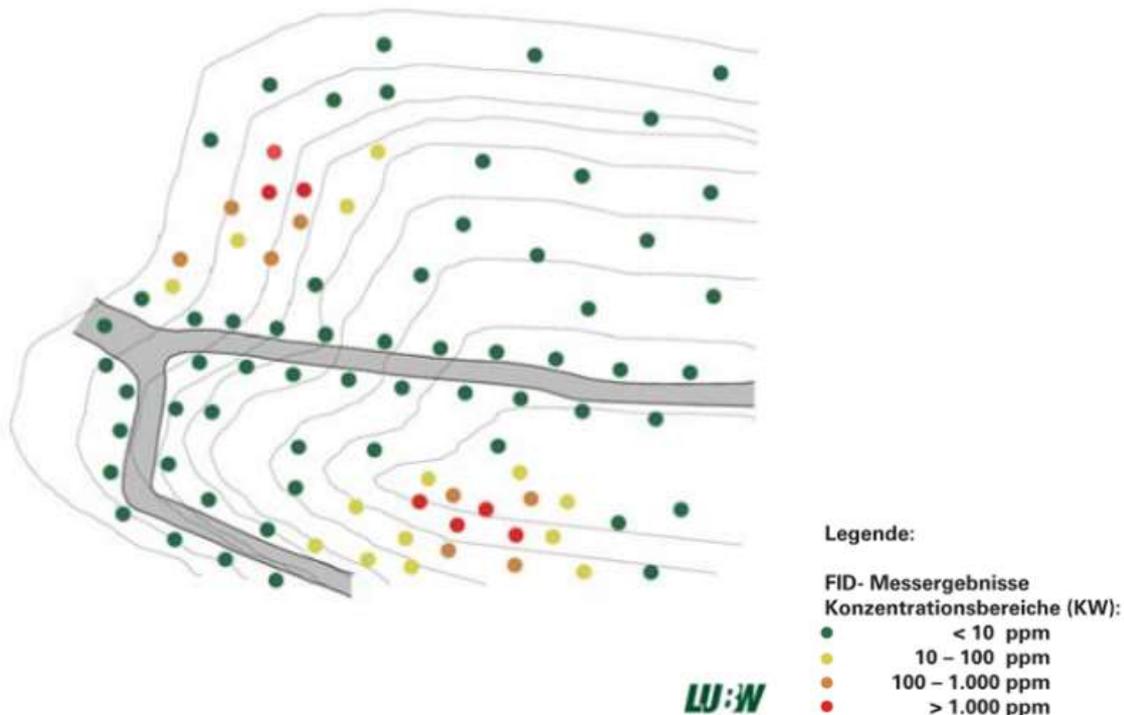


Abbildung 6: Messpunkte einer Deponiebegehung mit einem FID nach [67].

Die Dichte an Messpunkten richtet sich auch nach den Anforderungen bzgl. Der Messaufgabe (siehe Tabelle 2). Mit einem fliegenden Messsystem soll eine ähnliche Konzentrationskarte erstellt werden können.

Eine Quantifizierung der Emission ist mit dem FID nicht möglich. Zeitaufwendige Verfahren dazu sind als VDI/DIN Richtlinie verfügbar [69]. Des Weiteren weist das FID eine hohe Quersensitivität zu anderen Kohlenwasserstoffen auf, die fälschlicherweise als Methanleckage interpretiert werden könnten.

Deponien scheinen gute Einsatzgebiete zur Inspektion mit drohnenbasierten Systemen zu sein, sofern ein laserbasierter Methansensor eingesetzt wird. Deponien lassen sich gut überfliegen und mit einem fliegenden Messsystem lässt sich eine deutlich höhere Messwertdichte erreichen, als dies zu Fuß möglich ist. Durch die Abtastung aus der Luft werden auch Schäden, die durch eine Begehung zu Fuß entstehen könnten, vermieden. Neben den abgedeckten Lagerstätten sind Deponien mitunter auch mit Biogasanlagen sowie Solarkollektoren¹ ausgestattet. Auch hier sind in beiden Fällen Inspektionsflüge notwendig, sodass mit einem entsprechenden Messgerät die komplette Anlage inspiziert werden könnte.

2.2 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation

Im Folgenden sollen die notwendigen Anforderungen, die sich aus den Messzenarien ergeben gesammelt und bewertet werden.

¹ Neben der Sichtprüfung der Solaranlagen, die mit dem geplanten Sensorsystem durchgeführt werden kann, werden üblicherweise auch thermografische Aufnahmen gemacht. Dies ist jedoch nicht Teil dieses Projekts.

Tabelle 4: Systemspezifikation des fliegenden Messsystems

Anforderung	Spezifikation	Technische Machbarkeit
UAV		
Systemsicherheit	Autostart und -landung Automatische Kollisionsvermeidung Return-To-Home-Funktion Position Hold	✓ ✓ ✓ ✓
Traglast	> 2,5 kg	✓
Flugdauer	> 15 min	✓
Schnittstelle & Interface	Flugsteuerung über zugehörige Fernsteuerung. Zusätzlich: separate Kommunikation zu einer Bodenstation (Flugsteuerung über Bodenstation, Steuerbefehle Nutzlast, Telemetrie Nutzlast und Drohne)	✓
Positionierung & GPS	Präzise Positionsbestimmung auf < 1m für wiederholbare Messungen	✓
Bodenstation		
Interface	Drahtlose Kommunikation zwischen Bodenstation und Messsystem/UAV	✓
Bedienung	Steuerung der Nutzlast Steuerung der Drohne (Smarte Features) Visualisierung der Messdaten Ablesbarkeit des Displays „Outdoor“	✓
Nutzlast		
Messsystem	Methanselektive, optische Ferndetektion Keine Querempfindlichkeit zu Wasserdampf und anderen Kohlenwasserstoffen Sensitivität: 5 ppm*m Messfrequenz: > 10 Hz Interface: Seriell (USB)	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Detailbild	Auflösungsvermögen ~2 mm bei 20 m Entfernung Interface: Seriell (USB)	Anspruchsvoll in Kombination mit übriger Sensorik (Gewicht)
Übersichtsbild	Sichtbereich S: $40^\circ < S < 70^\circ$ Interface: Seriell (USB)	✓ ✓
Distanzsensor	Reichweite: 100 m Auflösung: < 10 cm Messfrequenz: > 10 Hz Interface: Seriell (USB)	✓ ✓ ✓ ✓
Mechanische Verbindung zum UAS	Schwenk-Neigeeinheit (Gimbal) Ausrichtung der Nutzlast; Sicht nach vorne, Sicht nach unten; rechts/links bis zu $\pm 90^\circ$, Sicht nach oben, wenn möglich; Interface: Seriell (USB)	✓ ✓ ✓

2.3 Zusammenfassende Bewertung

Ein fliegendes Messsystem zur punktgenauen Ortung von Leckagen, ohne Querempfindlichkeiten zu anderen Substanzen und mit der Möglichkeit zur Quantifizierung ist eine am Markt einzigartige Kombination. Dadurch ließe sich neben der Leckortung auch eine Klassifizierung der Leckagen durchführen und eine Wartungsliste priorisieren.

Die identifizierte Systemspezifikation ist mit heutigen technischen Möglichkeiten größtenteils zu realisieren. Von Seiten der Messtechnik ist zu beachten, dass alle vorhandenen Daten (integrale Gaskonzentration, GPS-Position, Distanz, Umgebungsbedingungen) genutzt werden sollen, um die Messsituation eindeutig zu dokumentieren. Darüber hinaus soll das System durch eine Modellrechnung jede Leckage quantifizieren. Die Aufnahme von Detailbildern in Kombination mit der übrigen Sensorik ist hauptsächlich aus Gründen des maximal zulässigen Abfluggewichts problematisch. Es wird eine Kamera mit guten optischen Eigenschaften benötigt, die gleichzeitig ein geringes Eigengewicht aufweist.

Weiterhin soll das System im „Ein-Personen-Betrieb“ gesteuert werden können. Der Pilot soll in der Lage sein, zudem auch die Messung mittels Unterstützung der smarten Systemsteuerung durchführen zu können. Basierend auf den aufgezeichneten Messwerten soll das System Handlungsempfehlungen aussprechen, die den Gasspürer bei seiner Inspektion unterstützen. In diesem Zusammenhang wird auch ersichtlich, dass neben der Sensitivität des Messsystems die Systemsicherheit des UAV der wichtigste Aspekt für eine spätere kommerzielle Verwendung darstellt. Hier gab es in den letzten Jahren jedoch einige technische Innovationen, die genutzt werden können. Moderne Drohnen verfügen über Rundum-Kollisionsschutz, sodass Zusammenstöße mit Objekten vermieden werden. Verschiedenste Sensoren und Kameras messen den Abstand zu Objekten und verhindern im Bedarfsfall eine Kollision. Außerdem gehört die GPS-basierte Return-To-Home-Funktionen mittlerweile bereits bei kleinsten Drohnen zum Standard: Im Fall schwindender Akkuladung oder dem Abriss der Kommunikation kehrt die Drohne zur festgelegten Ausgangsposition zurück. Beide Funktionen sind insbesondere für die spätere Verwendung in Siedlungsnähe essenziell. Die Position-Hold-Funktion ist ein weiteres wichtiges Feature moderner Systeme. Die Drohne hält ihre Position, wenn keine Steuerbefehle von der Fernbedienung kommen, bis ihre Akkuladung fast verbraucht ist. Sie kehrt dann zur Ausgangsposition zurück. Sie gleicht auch Beeinträchtigungen durch plötzliche Windveränderungen automatisch aus und stabilisiert ihre Position. Dies ist wichtig, falls der Pilot aus medizinischen Gründen während des Fluges ausfällt. Der Flug würde dann automatisch zu einem sicheren Ende kommen, sobald die Akkuladung verbraucht ist. Ein unkontrolliertes Abstürzen wird dadurch verhindert. Zudem hilft diese Funktion, den Ein-Personen-Betrieb zu realisieren. Der Pilot muss nicht die ganze Zeit die Hände am Joystick haben. Er kann sich auch im Videostream die Messdaten ansehen und die Ergebnisse bewerten, ohne die Fluglage der Drohne durch unwillkürliche Handbewegungen zu verändern.

Zusammenfassend lassen sich alle gesetzten Anforderungen an Messsystem, Drohne und Bodenstation mit kommerziell erhältlichen Komponenten realisieren.

3 Beschaffenheit des Experimentalsystems

Das aufgebaute Experimentalsystem umfasst das fliegende Messsystem, bestehend aus Messmodul, Bordcomputer, Zusatzkomponentenbox und der Drohne „Matrice M300“ von DJI, sowie den am Boden platzierten Messlaptop, der RTK-Referenzstation und einem 3D-Ultraschallanemometer, siehe Abbildung 10. In diesem Kapitel werden der Aufbau des Messsystems, die Softwarearchitektur, die Funktionen der Visualisierung und die Datenaufzeichnung beschrieben.

3.1 Aufbau des Messsystems

Aufbau des Messmoduls

Das Messmodul bildet die Grundlage für die messtechnischen Fähigkeiten des Messsystems. Es besteht aus einem Infrarot-laseroptischen Sensor zur Ermittlung der integralen Gaskonzentration, einem Laser-Distanzsensor und zwei Kameras, zusammengefasst in einem eigens entwickelten Gehäuse, welches zusammen mit einem USB-Hub an einem Gimbal montiert ist (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Messmodul bestehend aus: **(a)** Gimbal, **(b)** Distanzsensor, **(c)** Übersichtskamera, **(d)** Detailkamera, **(e)** USB-Hub, **(f)** TDLAS und Gehäuse

Der Sensor zur Ermittlung der integralen Gaskonzentration ist ein „Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer“ (TDLAS). Nach Datenblatt kann es die integrale Gaskonzentration für Methan im Messpfad in einem Messbereich von 0 bis 40.000 ppm m aus bis zu 50 m Entfernung ermitteln. Die Messpfadlänge wird mit einem laserbasierten Distanzsensor ermittelt. Er

ist für Distanzen von 0,2 bis 100 m geeignet. Beide Sensoren benötigen einen Reflexionshintergrund, der einen Teil der ausgesendeten IR-Strahlung zurückwirft. Zusätzlich sind am Messmodul zwei Kameras verbaut. Die erste Kamera hat einen diagonalen Öffnungswinkel von 67° und dient als Übersichtskamera für den Inspekteur, um die Ausrichtung des Messmoduls und den Inspektionort zu überwachen. Die zweite Kamera hat einen diagonalen Öffnungswinkel von 38° , sodass hochauflösende Detailbilder des Inspektionortes aufgenommen werden können. Alle Sensoren sind über einen USB-Hub mit dem Bordcomputer verbunden, um die Sensordatenfusion zu realisieren und aufzuzeichnen.

Integration von Messmodul und Drohne

Das originale Landegestell der Drohne bietet eine Bodenfreiheit von 0,28 m. Der originale Schnellverschluss für Nutzlasten an der Drohne erlaubt eine maximale Belastung mit bis zu zwei Nutzlasten mit jeweils bis zu 700 g Gewicht (siehe Abbildung 8). Das Gewicht und die Größe der Sensoren erfordert einen Gimbal mit höherer Traglast und Bauraum, welcher bei dem gewählten Modell höher ist als die verfügbare Bodenfreiheit. Daher musste sowohl der originale Schnellverschluss für DJI-Gimbals ersetzt als auch das Landegestell verlängert werden. Der DJI-Schnellverschluss wurde durch eine Adapterplatte ersetzt, welche an der Drohne die Schraubverbindungen von DJI nutzt und zum eingesetzten anderen Gimbal passt. Um eine Beeinträchtigung der Abstandssensoren und des Start- bzw. Landeverhaltens durch ein verlängertes Landegestell zu untersuchen, wurde zunächst ein Prototyp des Landegestells getestet (siehe Abbildung 8 b). Daraufhin wurde durch eine Modifikation des originalen ein neues Landegestell gebaut. Das neue Landegestell (siehe Abbildung 9 f) hat 3 Einstellmöglichkeiten, um die Länge zu verändern. Dadurch lässt sich eine Bodenfreiheit von 0,28, 0,32 oder 0,36 m einstellen. Das montierte Messmodul hängt unter der Drohne und ist mit zwei USB3-Kabeln und zwei Stromkabeln mit den Komponenten auf der Drohne verbunden.

Auf der Drohne befindet sich auf einem DJI-Befestigungssystem der Bordcomputer „Manifold2-C“ von DJI, ein Intel i7 Computer mit kleinem Formfaktor, und ein eigenentwickeltes Zusatzkomponentengehäuse, das einen USB-Hub, ein WLAN-Funkmodul, ein USB-Seriell-Adapter und die Verteilung der Stromversorgung enthält. Die Zusatzkomponentenbox wird benötigt, da die verfügbaren Anschlussmöglichkeiten am Bordcomputer und eine einzelne Buchse als Stromversorgung für die vielen Komponenten nicht ausreichend sind. Eine OSDK-

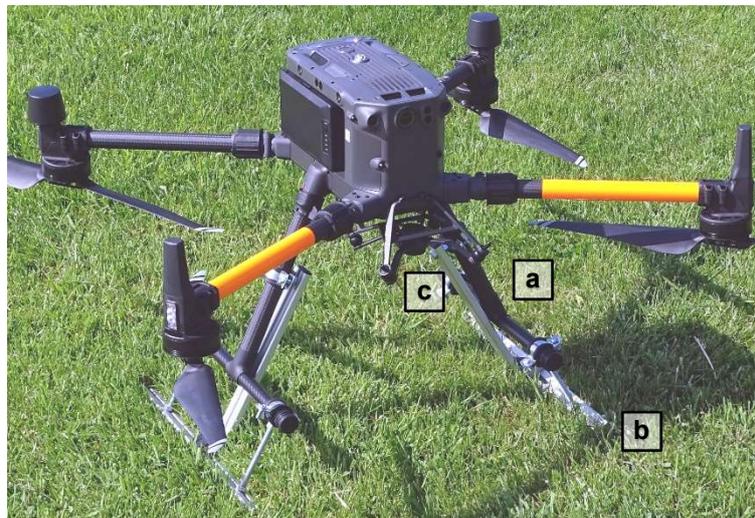


Abbildung 8: Drohne DJI M300 mit: (a) Originalem Landegestell mit (b) prototypischer Landegestellverlängerung und (c) DJI Schnellverschluss mit gedämpfter Halterung



Abbildung 9: (a) Drohne DJI M300 mit (b) Bordcomputer, (c) Zusatzkomponentengehäuse, (d) TB60-Akkus, (e) Adapterplatte für Gimbal, (f) verlängertem Landegestell und (g) Messmodul

Adapterbox (Onboard SDK) ermöglicht die Kommunikation mit der Drohne über zwei serielle Schnittstellen und stellt einen 24 V Anschluss zur Verfügung, der bis 4 A belastet werden kann. Über diesen internen Spannungswandler der Drohne werden alle Komponenten des Drohnensystems elektrisch versorgt.

Gesamtsystem

Zum gesamten System gehören zusätzlich zum Drohnensystem noch die RTK-Basisstation „D-RTK 2“ von DJI, zwei Funkfernbedienungen „DJI Smart Controller Enterprise“, die Batterieaufbewahrung und Ladestation „IN2BS“ von DJI, ein Messlaptop und ein Ultraschall 3D-Anemometer von Thies CLIMA (siehe Abbildung 10). Die RTK-Basisstation dient der Verbesserung der Positionsbestimmung mittels globaler Navigationssatellitensysteme. Durch die stationäre Positionierung der RTK-Station können Positionsbestimmungsfehler erkannt und der Drohne so zeitabhängige Korrekturdaten gesendet werden. Die Verbindung von RTK-Station und Drohne erfolgt über die Funkfernbedienung. Ist die Funkfernbedienung mit dem Internet verbunden, kann auf die RTK-Basisstation verzichtet und die Korrekturdaten können von festinstallierten Referenzstationen abgefragt werden. In Deutschland ist dies z.B. der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS. SAPOS ist ein Netzwerk von rund 270 Referenzstationen in Deutschland, die von den Bundesländern betrieben werden. Die Batteriestation dient der sicheren Aufbewahrung und als Ladestation für die Akkus der Funkfernbedienungen, der RTK-Station und für die Akkus der Drohne. Der Messlaptop dient der Visualisierung der Messergebnisse und der Überwachung des Systems sowie vieler Messgrößen während der Messkampagne. Über die Visualisierung auf dem Messlaptop kann außerdem die Inspektion gestartet werden.

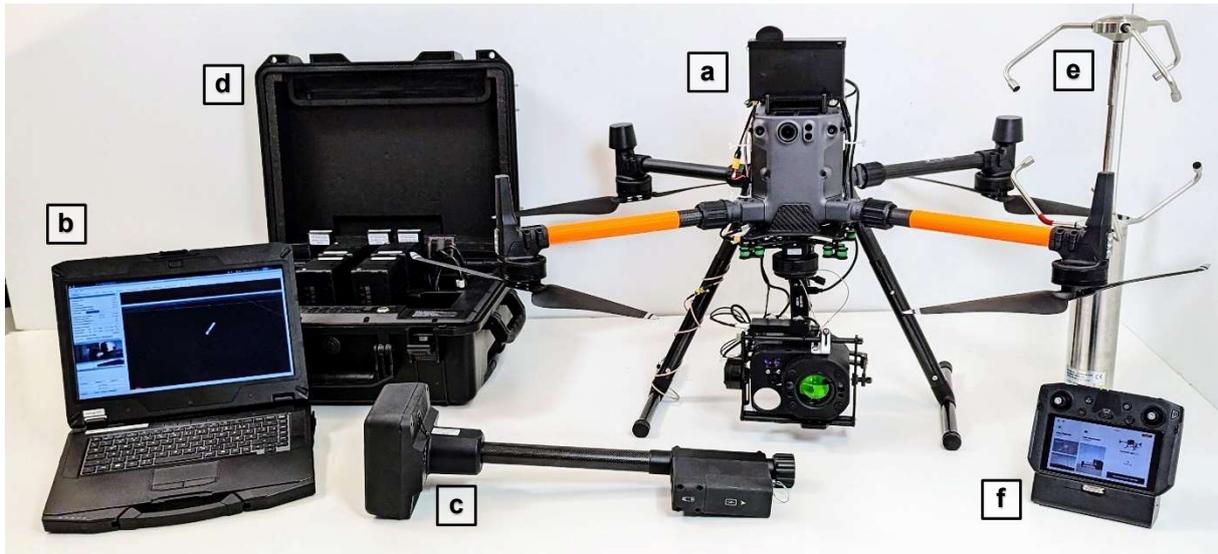


Abbildung 10: Gesamtsystem mit: (a) Drohnensystem, (b) Messlaptop, (c) RTK-Station, (d) Batteriekoffer, (e) 3D-Anemometer und (f) Funkfernbedienung

DJI-Entwicklerschnittstellen und Dokumentation

Die Firma DJI bietet für ihre Drohnen mehrere „Software Development Kits“ (SDKs) an. Die drei relevantesten und am aktivsten weiterentwickelten SDKs sind das „Mobile SDK“ (MSDK), „Onboard SDK“ (OSDK) und „Payload SDK“ (PSDK). Das MSDK ist für alle Consumer oder kommerziellen Drohnen verfügbar und funktioniert ausschließlich mit Android oder iOS Geräten, die mit einer DJI-Fernsteuerung verbunden sind. Über das MSDK können Zustände der Drohne abgefragt, Kamerabilder verarbeitet oder Einfluss auf die Drohnensteuerung genommen werden, solange eine Funkverbindung besteht. Außerdem kann über das MSDK mit Geräten, die über den OSDK oder PSDK-Anschluss an der Drohne angeschlossen sind, Daten ausgetauscht werden.

OSDK und PSDK sind für die kommerziellen Drohnen mit den entsprechenden Anschlüssen an der Drohne verfügbar. An den gleichnamigen Anschlüssen an der Drohne kann ein Linux- oder FreeRTOS-System angeschlossen und die Funktionen der SDKs können genutzt werden. Beide SDKs können Zustände der Drohne, Sensoren oder Kamerabilder abfragen oder in das Flugverhalten der Drohne eingreifen. Mit der Version 3 des PSDK-Frameworks wurden OSDK und PSDK zusammengefasst. Das OSDK wird daher nicht mehr weiterentwickelt, aber weiterhin unterstützt.

3.2 Softwareintegration

Alle entwickelten Softwaremodule wurden für das Robot Operating System (ROS)-Framework geschrieben. Bei ROS handelt es sich um eine Sammlung von Open Source Softwarebibliotheken und Programmen zur Entwicklung von Robotikanwendungen insbesondere im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Robot Operating System

ROS verfolgt eine Microservices-Architektur, bei der die ROS-Programme, Nodes genannt, möglichst einfach gehalten werden und über definierte Nachrichtenkanäle, Topics genannt, mit anderen ROS-Programmen kommunizieren. Durch diesen Ansatz können Programme, wie

zum Beispiel Gerätetreiber oder Visualisierungen, in anderen Projekten wiederverwendet werden. Durch die Verknüpfung von mehreren einfachen ROS-Programmen lassen sich auf diese Weise komplexe Systeme aufbauen. Durch die Systemarchitektur von ROS laufen alle Prozesse unabhängig voneinander und können mit einer individuellen Zyklusfrequenz laufen oder ereignisbasiert ihre Aufgaben ausführen. ROS-Programme können auch Dienste, sogenannte Services, anbieten. Die Abarbeitung der Dienste erfolgt nicht zyklisch, sondern auf Anfrage, zum Beispiel durch Klicken eines Knopfes in einer Bedienoberfläche.

DJI bietet durch das Projekt „DJI Onboard SDK ROS“ (OSDK-ROS) eine Schnittstelle zwischen dem OSDK und ROS. Die Schnittstelle ermöglicht eine einfachere Nutzung von Sensorwerten oder Zuständen der Drohne in ROS-Programmen. OSDK-ROS hat eine sehr lückenhafte Dokumentation. Bei vielen Sensorwerten ist die Einheit und der Wertebereich nicht dokumentiert und muss im Vorfeld systematisch durch Aufruf der entsprechenden Funktion ermittelt werden. Dies wurde sukzessive für alle benötigten Sensorwerte und Zustände der Drohne durchgeführt, sodass die OSDK-ROS Anwendung in diesem Projekt genutzt werden konnte.

Visualisierung und Funktionen der Bodenstation

Die Visualisierung basiert auf der ROS-Visualisierung „RViz“, die über ein 3D-Ansichtsfenster verfügt und durch eigene Werkzeuge, Anzeigeelemente und Funktionspanele erweitert wurde (Abbildung 11). Dazu gehört ein Anzeigeelement für Live-Messwerte, verschiedene Visualisierungsebenen für den 3D-Ansichtsbereich, mehrere Eingabeelemente zum Ausführen und Parametrieren verschiedener Funktionen und eine Kameraansicht aus der Perspektive des Gimbals mit einem Kreis für den Messfläche des Gassensors (rot) und einem Kreis für den Messfläche des Distanzsensors (blau).



Abbildung 11: RViz-Nutzeroberfläche des Messsystems mit (a) 3D-Ansichtsbereich, (b) eigenen Werkzeugen, (c) Live-Kameraansicht und eigenen Visualisierungserweiterungen, (d) Anzeige von Messwerten und (e) Bedienelementen zum Ausführen von Aktionen

In dem Anzeigeelement für Messwerte werden die wichtigsten Sensorwerte live angezeigt. Dazu gehört die integrale Gaskonzentration, die Signalqualität des TDLAS-Sensors, die Messpfadlänge, die Winkelgeschwindigkeit und die resultierende Scangeschwindigkeit am Boden. Außerdem werden die Messwerte der Windgeschwindigkeit und -richtung von dem Anemometer und der entsprechenden Werte aus der Schätzung aus der Drohnenlage sowie die absolute Ausrichtung der Drohne und des Gimbals angezeigt. Die Ausrichtung der Drohne bezieht sich auf die geografische Nordausrichtung und die Ausrichtung des Gimbals bezieht sich auf die relative Ausrichtung zur Drohne.

Durch verschiedene Visualisierungsebenen können im 3D-Ansichtsbereich eine Karte, Satellitenbilder und selbst aufgenommene Luftbilder, sog. Orthofotos, angezeigt werden (Abbildung 12). Nach erfolgten Messungen kann die Gaskonzentration als 2D-Rasterkarte und als Punktwolke dargestellt werden. Die Punktwolke enthält mehrere Dimensionen, untere anderem die Gaskonzentration und die Farb- und Windwerte jedes Messpunktes. Die Punktwolke wird neben der Visualisierung für die Analyse der Gaskonzentrationen und für die Quantifizierung verwendet.

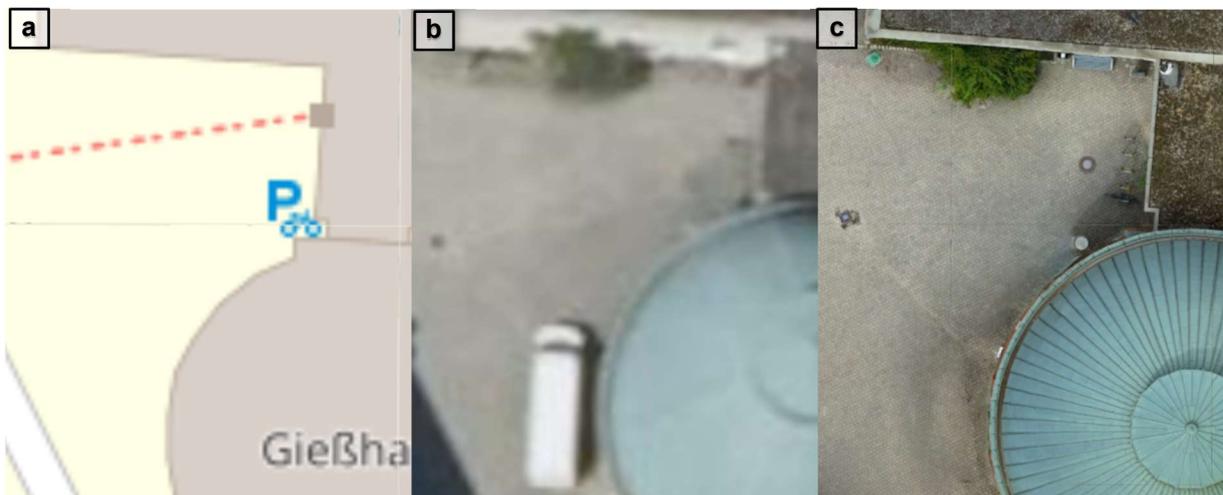


Abbildung 12: Die drei möglichen Ebenen im 3D-Ansichtsbereich: **(a)** technische Karte (Quelle: OpenStreetMap) **(b)** Satellitenbild (Quelle: HVBG) und **(c)** selbstgezeugtes Orthofoto

Umsetzung der Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung erfolgt mit zwei unterschiedlichen Ansätzen. Der erste Ansatz nutzt das ROS-Werkzeug „rosbag“. Durch rosbags werden alle Sensorsignale und Kamerabilder, aber auch Eingabesignale wie Steuereingaben für den Gimbal oder für die Drohne mit dazugehörigen Metadaten, wie Uhrzeit, Datentyp, usw. aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Sensorsignale können jederzeit wieder abgerufen und von den ROS-Programmen verarbeitet werden. Für die verarbeitenden ROS-Programme besteht dabei kein Unterschied zu den Messdaten, die während der Laufzeit erzeugt wurden. Außerdem können die Bild- und Zeitreihen in Programmen visualisiert und untersucht werden (siehe Abbildung 13). Der zweite Ansatz benutzt die Punktwolken, welche über die Visualisierung gespeichert werden können. Eine Punktwolke enthält so viele Punkte wie während der Messdauer Messwerte des Gassensors angefallen sind. Jeder Punkt enthält die Koordinaten des Messpunktes, Gaskonzentration, Intensitätswert des Gassensorsignals, Messfleck-Koordinaten, Drohnen-Koordinaten, die geschätzte und gemessene Windgeschwindigkeit und – richtung, den Farbwert des Messpunktes und die Messdistanz. Der Farbwert des Messpunktes ist die dominierende Farbe aus dem

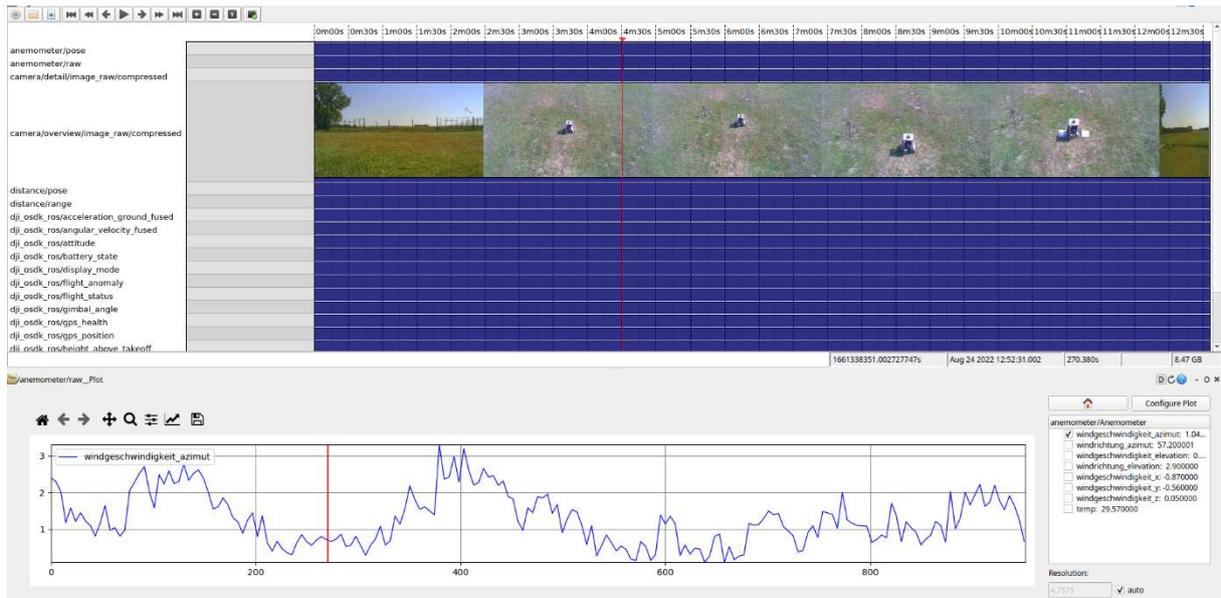


Abbildung 13: Grafische Oberfläche „rqt_ros“ zum Analysieren, Schneiden und Zusammen-
setzen von rosbags

Teil des Kamerabildes, an dem sich der Messpunkt befindet. Beim ersten Ansatz gehen keine Daten verloren und die Messkampagne kann nachträglich mit korrigierten oder verbesserten ROS-Programmen neu ausgewertet werden. Dafür werden etwa 5 GB Speicherplatz für eine fünfzehnminütige Messkampagne benötigt. Der zweite Ansatz erzeugt bei der gleichen Messkampagne eine etwa 6 MB große Punktwolkendatei. Die Daten können neu ausgewertet werden, sind aber auf die zuvor als wichtig festgelegten Kenngrößen beschränkt. Die Kamerabil-
der zu den Messpunkten stehen im zweiten Fall nicht zur Verfügung.

4 Messmethoden- und Verfahrensentwicklung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die verschiedenen Koordinatensysteme verrechnet werden, wie eine Inspektionsplanung erfolgt, welche Verfahren es zur Kartierung der Methankonzentration gibt und wie das Messmodell zur Emissions-Quantifizierung funktioniert.

4.1 Inspektionsplanung und Verfahren zur Kartierung und Quantifizierung von Methankonzentrationen

Zur Inspektion eines Gebietes auf Methanemissionen wurden zwei verschiedene Ansätze entwickelt. Beim ersten Ansatz wird die Drohne durch den Piloten an eine endliche Anzahl an Positionen gesteuert. Die Drohne wird auf das Inspektionsziel ausgerichtet und ein Raster-Scan mittels des Gimbals gestartet, siehe Abbildung 14 a. Bei dem Scan lassen sich Parameter wie die Scan-Fenstergröße, die Scan-Geschwindigkeit und ob zeilen- oder spaltenweise gescannt wird einstellen (siehe Abbildung 15 a). Das Verfahren eignet sich besonders gut, um Vorwissen zu nutzen, wo Leckagen zu erwarten sind. Außerdem ist es geeignet für Inspektionsobjekte, bei denen die Höheninformation von besonderer Bedeutung sind, da durch seitliche Scans Leckagen an (senkrechten) Wänden genau lokalisiert und durch verschiedene Posen 3D-Objekte umfassend inspiziert werden können.

Beim zweiten Ansatz wird der Sensor nahezu vertikal ausgerichtet und die Drohne bewegt, um ein Gebiet zu inspizieren, siehe Abbildung 14 b. Der Ausrichtungswinkel lässt sich dabei einstellen, wobei 0° einer horizontalen und 90° einer vertikalen Ausrichtung entspricht. In der Himmelsnavigation wird der vertikal nach unten gerichtete Vektor auch als Nadir bezeichnet. Eine genau vertikale Ausrichtung ist aus mehreren Gründen unvorteilhaft. Der Messpunkt liegt bei vertikaler Ausrichtung im Abwind der Drohne was die Wahrscheinlichkeit erhöht, die zu inspizierende Luft mit gasfreier Luft aus höheren Luftschichten zu vermischen. Zudem befindet sich der Gimbal bei dieser Position in oder nah an der Gimbal-Lock-Position, bei der zwei Drehachsen parallel zu einander liegen und die Steuermöglichkeiten eingeschränkt sind. Zusätzlich zu der Drohnenbewegung kann ein Pendelbereich und eine Pendelgeschwindigkeit eingestellt werden, um durch Rollbewegungen des Gimbals während des Abfliegens einer Route das Messmodul einen breiteren Streifen inspizieren zu lassen. Die grafische Eingabemaske für die Scan-Parameter beim zweiten Ansatz ist in Abbildung 15 b zu sehen.

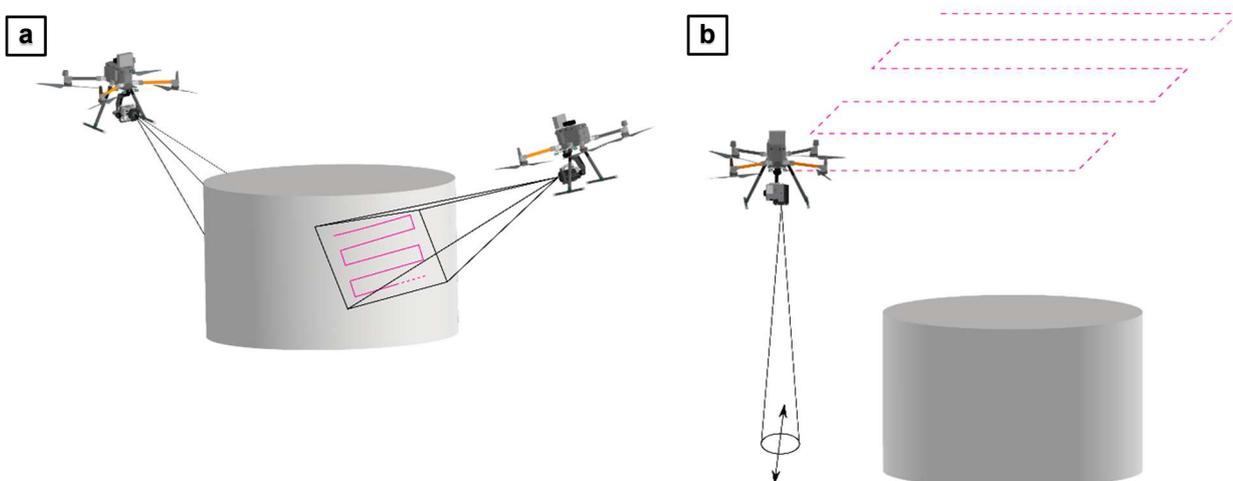


Abbildung 14: Zwei Inspektionsmethoden: (a) Raster-Scan aus verschiedenen Positionen und (b) Nadir-Scan mit Pendelbewegung während eines Rasterfluges

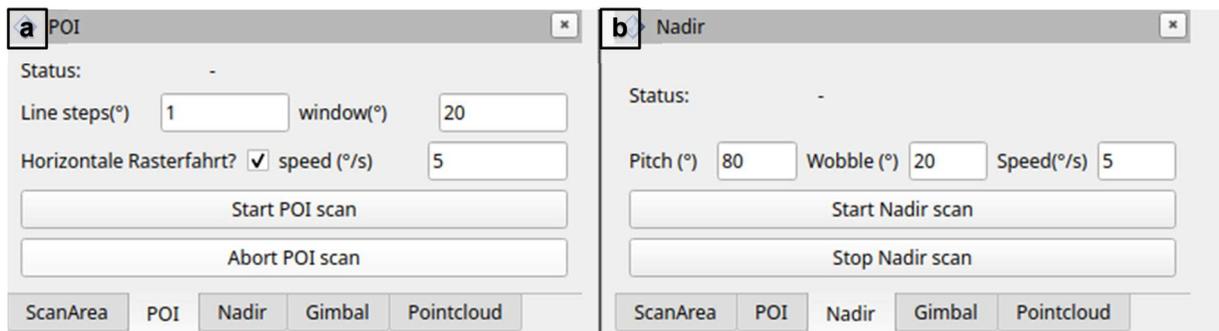


Abbildung 15: Grafische Benutzereingabe für die Scanmethoden. **(a):** Rasterscan aus einer festen Perspektive. **(b):** Scan in Nadir-Richtung mit den Parametern für einen Pendelbereich und die Pendelgeschwindigkeit.

Um eine einfache und vollständige Inspektion zu ermöglichen, wurde eine automatische Routenberechnung implementiert (siehe Abbildung 16). Diese benötigt vom Benutzer die Eingabe eines abgesteckten Zielgebietes (siehe Abbildung 16 a), welches über ein Werkzeug eingegeben werden kann, und einige Parameter wie Fluggeschwindigkeit, Abstand der Flugbahnen, Flughöhe und der Ausrichtung der Flugbewegungen, welche in der grafischen Eingabemaske eingegeben werden können (siehe Abbildung 16 c). Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 16 b zu sehen. Das Zielgebiet liegt dabei auf der Starthöhe, der Pfad auf der eingestellten Flughöhe, hier 11 m.

Unabhängig von der eingesetzten Scanmethode oder auch bei der Kombination mehrerer Methoden liegen die Ergebnisse als 2D-Konzentrationskarte (siehe Abbildung 17 a) und als mehrdimensionale Punktwolke vor. Die Punktwolken können alle Messungen enthalten (siehe Abbildung 17 b) oder es können die Punkte mit niedriger Konzentration auf 4 Punkte pro Quadratmeter reduziert werden (siehe Abbildung 17 c).

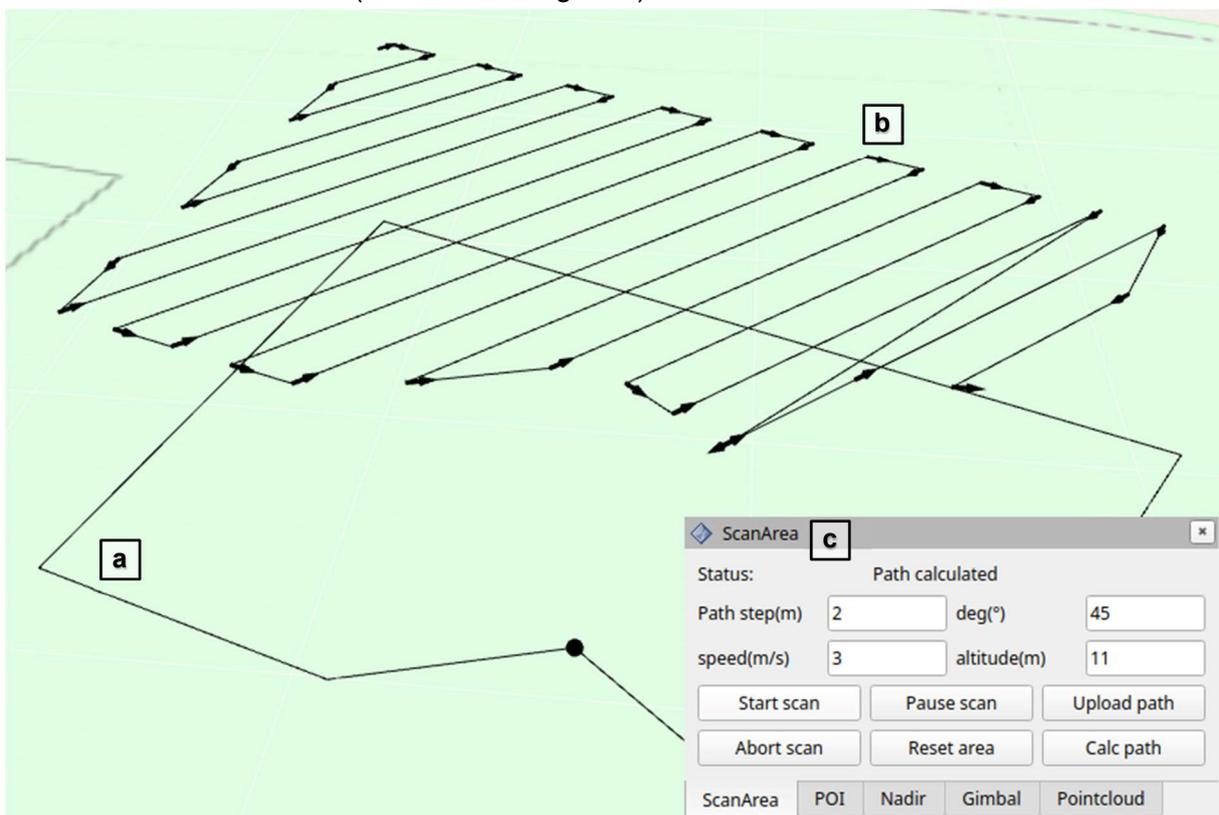


Abbildung 16: **(a)** Abgestecktes Zielgebiet mit dem **(b)** Ergebnis der automatisch berechneten Route und die **(c)** dazugehörige grafische Eingabemaske

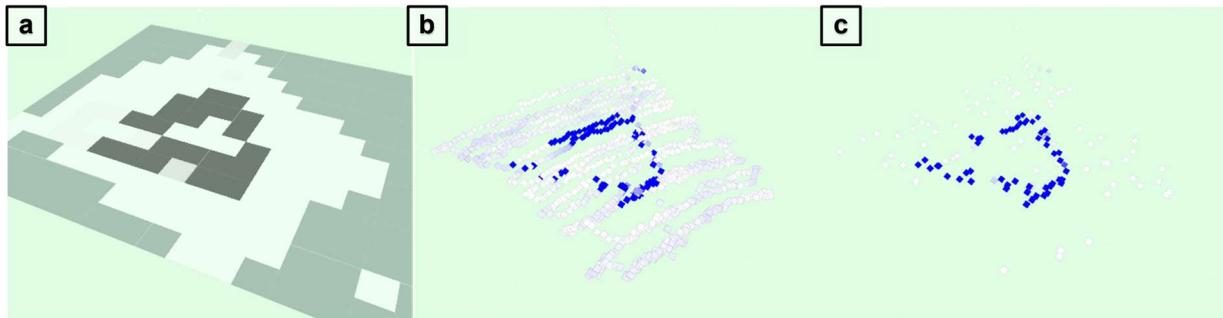


Abbildung 17: (a) 2D-Konzentrationskarte, (b) Punktwolke mit allen Messungen, (c) gefilterte Punktwolke; die Farbskala geht dabei von weiß (kein Gas) zu blau (hohe Gaskonzentration)

4.2 Messmodell zur Verortung der Methankonzentrationen

Damit die punktuellen Messungen der Gaskonzentration im Punktwolkenraum bzw. in der Karte visualisiert werden können, müssen verschiedene Sensorwerte fusioniert und Koordinatensysteme transformiert werden. Die Position der Drohne wird in Kugelkoordinaten im weltweiten geodätischen Referenzsystem EPSG:4326 gemessen. Es erfolgt eine Umrechnung in UTM-Koordinaten, einem globalen kartesischen Koordinatensystem, in Meter. Über die geometrischen Beziehungen der Konstruktion und die Ausrichtung des Gimbals und der Drohne sowie die Entfernungsmessung des Distanzsensors kann die Position jeder Komponente oder jeden Punktes bis zum Messfleck in global definierten UTM-Koordinaten bestimmt werden. Für den Zusammenhang der verschiedenen Koordinatensysteme siehe Abbildung 18.

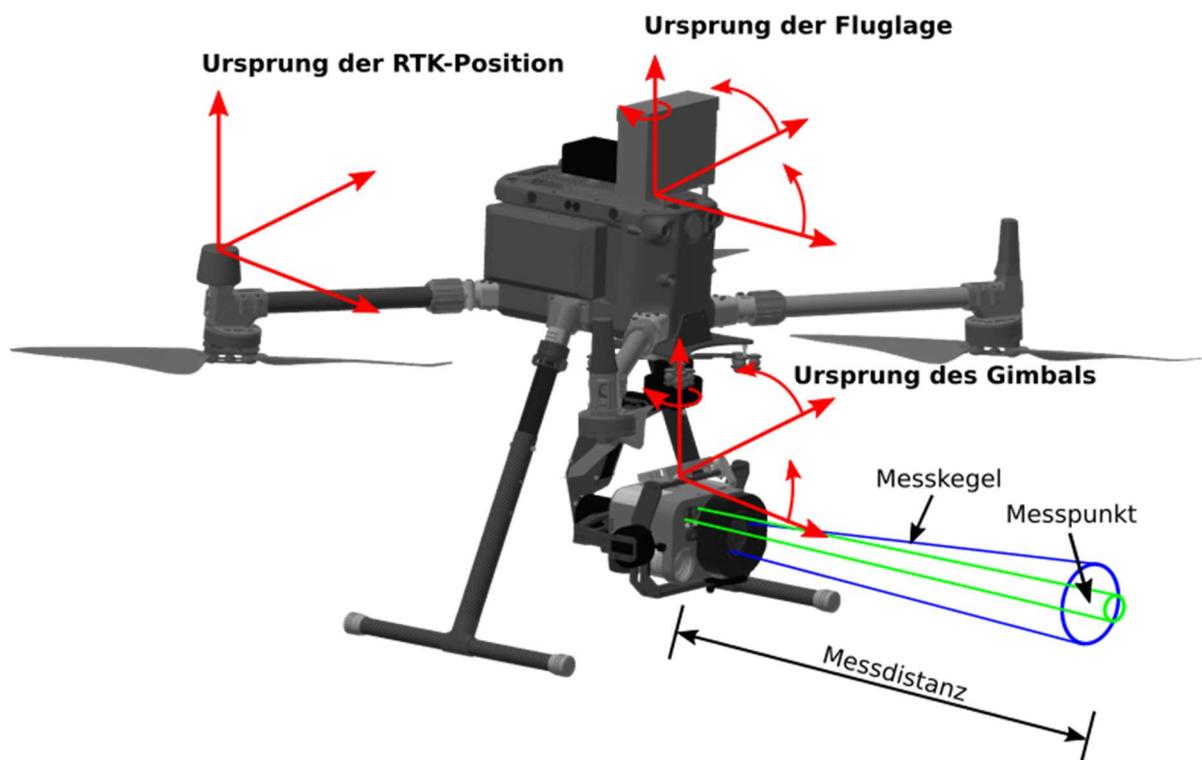


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Beziehung von Positionsmessung und Ausrichtungen der verschiedenen Koordinatensysteme

4.3 Verfahren zur Windgeschwindigkeitsschätzung

Die Windgeschwindigkeit wird durch das 3D-Anemometer in Bodennähe (ca. 1,8 m) gemessen. In kontrollierten Testumgebungen kann das Anemometer frei platziert werden und so zum Beispiel die Windgeschwindigkeit in Leckagenähe messen. Ein praktikablerer Ansatz ist es, die Windgeschwindigkeit mit der Drohne zu messen und so eine lokale und zum Messzeitpunkt ermittelte Windmessung zu erhalten, ohne ein Anemometer aufzubauen und mehrfach versetzen zu müssen. Die Montage von Windsensoren an Drohnen ist grundsätzlich möglich, bedarf aber eines gewissen Aufwandes, um den Sensor außerhalb der durch die Drohnenrotoren erzeugten Turbulenzen zu montieren. Zur Vermeidung weiteren Gewichts und einer mechanisch ausladenden Konstruktion zur Sensormontage wird daher auf einen physischen Sensor verzichtet und durch einen Softsensor, also ein in Software realisierter Sensor, welcher den Zusammenhang von Fluglage und Windgeschwindigkeit nutzt, realisiert: Eine Drohne im positionshaltenden Schwebeflug nimmt bei windstillen Bedingungen eine horizontale Lage ein. Mit zunehmendem Wind ergibt sich ein höherer Anstellwinkel entgegengesetzt zur Windrichtung, um die Winddrift auszugleichen und die Position zu halten. In der Literatur sind Vorgehensweisen beschrieben, um in kontrollierten Umgebungen, wie einem Windkanal oder in einem Labor mit Ventilatoren, physikalische [70] oder datengetriebene [43] Modelle zu erstellen, die den Zusammenhang zwischen Schräglage und Windgeschwindigkeit beschreiben.

Da das gesamte System für die an der Universität Kassel verfügbaren Windkanäle zu groß ist, wurde der Ansatz gewählt, die Trainingsdaten im Freifeld zu erzeugen. Dazu wurden rechteckige Flugrouten mit verschiedenen Fluggeschwindigkeiten abgeflogen (siehe Abbildung 19) und die Windgeschwindigkeit und -richtung mit dem Anemometer in der Mitte der Flugroute gemessen.

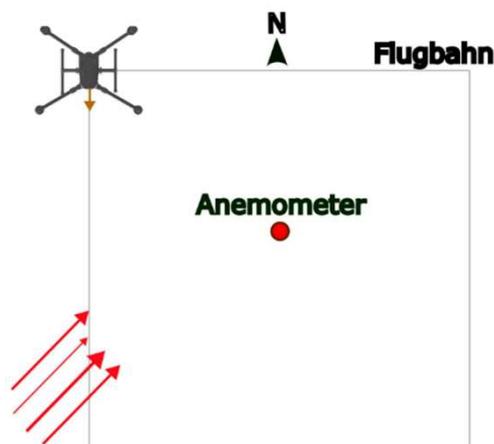


Abbildung 19: Flugroute, Platzierung des Anemometers und dominierende Windrichtung bei der Erzeugung des Trainingsdatensatzes

4.4 Messmodell zur Schätzung des Leckmassenstroms

Zur Schätzung des Massenstroms einer Methanleckage wird die integrale Methankonzentration C_{ppmm} , die Windgeschwindigkeit v_{Wind} und die Länge der Messstrecke d verwendet. Aus der integralen Methankonzentration und Messdistanz wird die mittlere Methankonzentration \bar{C} bestimmt:

$$\bar{C} = \frac{C_{ppmm}}{d \cdot 10^6} \quad (1)$$

Zur Bestimmung des Volumenstroms \dot{V} wird die durchströmte Fläche des Messkegels A_{MK} benötigt. Die Fläche wird über die Messdistanz und den optischen Öffnungswinkel α des Gassensors bestimmt:

$$A_{MK} = d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) d \quad (2)$$

Über die Fläche und die Windgeschwindigkeit v_{Wind} lässt sich der Gesamtvolumenstrom von Luft und Methan durch den Messkegel berechnen:

$$\dot{V} = A_{MK} \cdot v_{Wind} \quad (3)$$

Für die Massenbestimmung wird die Dichte ρ von Methan benötigt:

$$\rho = \frac{p_U M_{CH_4}}{R_{CH_4} T_U} \quad (4)$$

Dabei ist p_U der Umgebungsdruck, T_U die Umgebungstemperatur, M_{CH_4} die molare Masse und R_{CH_4} die spezifische Gaskonstante von Methan. Dadurch kann über die Methandichte, die mittlere Methankonzentration und den Volumenstrom der Massestrom \hat{q}_m geschätzt werden:

$$\begin{aligned} \hat{q}_m &= \rho \bar{C} \dot{V} \\ &= \frac{p_U M_{CH_4}}{R_{CH_4} T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{d \cdot 10^6} \cdot A_{MK} \cdot v_{Wind} \\ &= \frac{p_U M_{CH_4}}{R_{CH_4} T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{d \cdot 10^6} \cdot d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) d \cdot v_{Wind} \\ &= \frac{p_U M_{CH_4}}{R_{CH_4} T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) d \cdot v_{Wind} \end{aligned} \quad (5)$$

Für die Angabe von Leckagemengen ist neben dem Massenstrom auch die Angabe in Normliter pro Stunde gebräuchlich. Normliter ist nach DIN 1343 das Volumen eines Stoffes bei Normaltemperatur $T_N = 273,15 \text{ K} = 0^\circ \text{ C}$ und Normaldruck $p_N = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$ [71]. Damit ergibt sich der Normvolumenstrom \hat{q}_V mit der Gleichung:

$$\begin{aligned} \hat{q}_V &= \frac{p_U T_N}{p_N T_U} \bar{C} \dot{V} \\ &= \frac{p_U T_N}{p_N T_U} \cdot \frac{C_{ppmm}}{10^6} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) d \cdot v_{Wind} \end{aligned} \quad (6)$$

5 Durchgeführte Versuche und erzielte Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den Untersuchungen des Gassensors in Bezug auf die absolute Genauigkeit, den Reichweitentest, das Ansprechverhalten auf neue Werte, die Scangeschwindigkeit und die Quantifizierung am Gasprüfstand vorgestellt. Anschließend wird auf die Umgebungsbedingungen eingegangen und deren Einfluss auf die Messung sowie die Genauigkeit der Positionierung der Drohne behandelt. Abschließend werden die Ergebnisse von Freifeldversuchen vorgestellt.

5.1 Messtechnische Eigenschaften des Messsystems

Ziel der Untersuchungen in diesem Abschnitt war es, die messtechnischen Eigenschaften des Gassensors hinsichtlich seiner Messunsicherheit, der Reichweite und dem dynamischen Ansprechverhalten zu untersuchen.

Absolute Genauigkeit: Versuche mit Referenzmesszelle im Labor

Die absolute Genauigkeit des Gassensors wurde mit einer justierbaren Referenzmesszelle untersucht (siehe Abbildung 20). Die Messzelle ist in der Tiefe einstellbar. Dadurch wird das Behältervolumen verändert und ein Weg des Laserstrahls durch unterschiedlich tiefe Gaswolken erzeugt.



Abbildung 20: Referenzmesszelle

Durch Verwendung unterschiedlicher Prüfgase und Veränderung des Behältervolumens lassen sich unterschiedliche integrale Gaskonzentrationen reproduzierbar einstellen. Der Anzeigewert des Gassensors wird mit den eingestellten Gaskonzentrationen verglichen, um dadurch die Genauigkeit des Sensors zu ermitteln.

Für den Messbereich unter 10.000 ppm m wurde eine Mischung aus 10 % Methan und 90 % Stickstoff genutzt sowie die Referenzmesszellentiefe zwischen 1 und 9 cm Tiefe variiert. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 21 zu sehen. Für den Messbereich ab 10.000 ppm m wurde Methan N45 (99,995 %) verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 zu sehen.

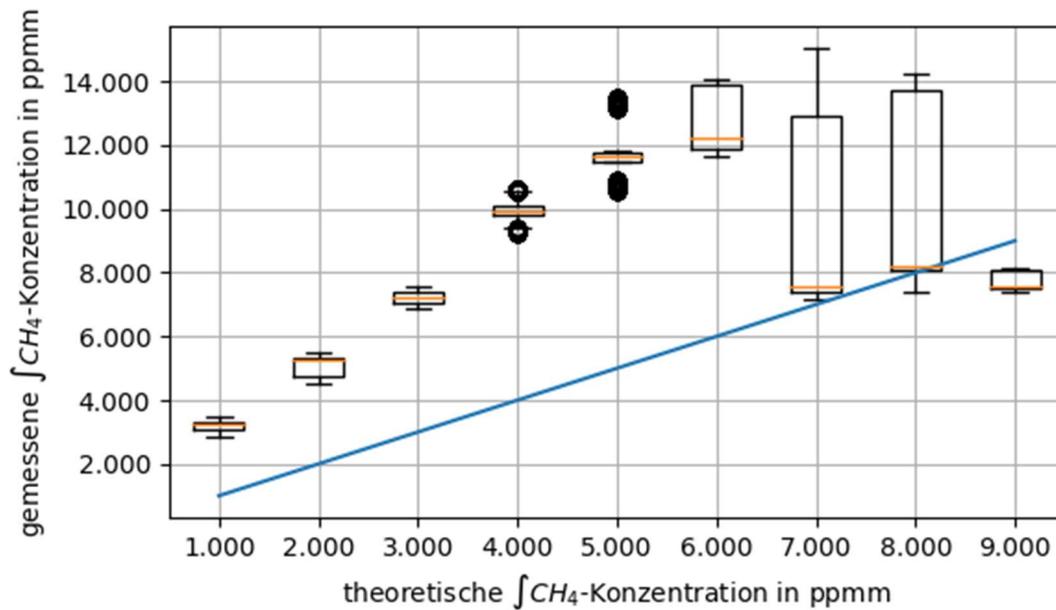


Abbildung 21: Referenz-Konzentrationsmessung von 1.000 bis 9.000 ppm m mit 10 % Methan-Stickstoffgemisch

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass integrale Konzentrationswerte bis 6.000 ppm m (theoretische Methankonzentration) deutlich überschätzt werden. Ab 9.000 ppm m bis zur oberen Messbereichsgrenze des Sensors von 40.000 ppm m sind die Abweichungen deutlich geringer, siehe Abbildung 21 und Abbildung 22. Auch darüber hinaus liefert der Sensor noch höhere Messwerte, der Sensor kann jedoch keine Messwerte über 50.000 ppm m anzeigen.

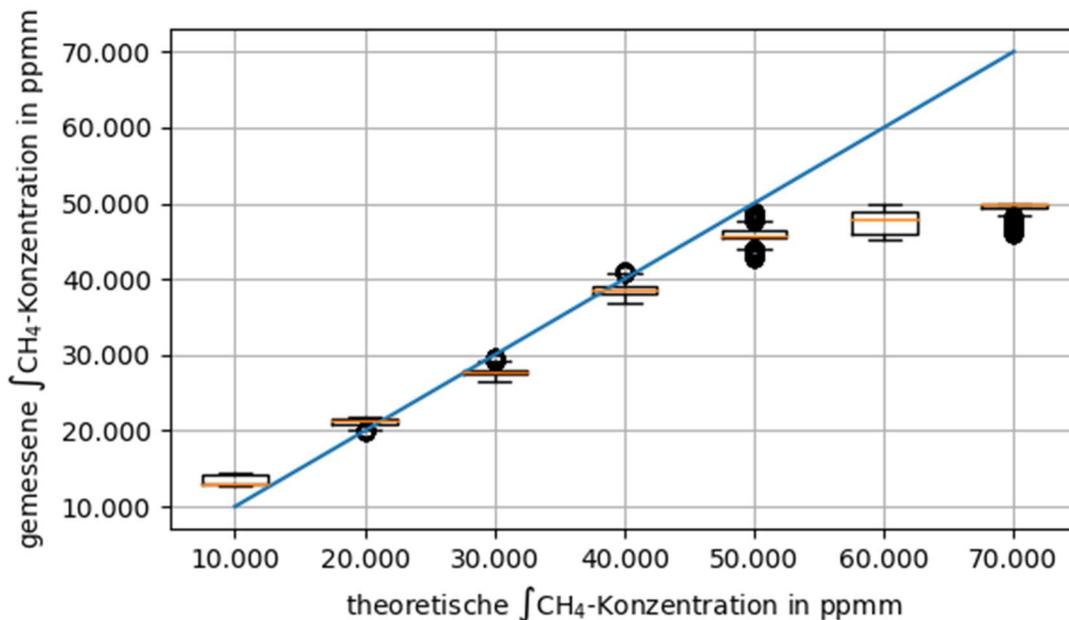


Abbildung 22: Referenz-Konzentrationsmessung von 10.000 bis 80.000 ppm m mit 99,995 % Methan

Reichweitentest

Es wurden Reichweitentests des Methansensors mit ungefähr 30 cm x 30 cm großen methan-gefüllten Tüten durchgeführt. Mit einem handgehaltenen Sensor ist es bereits ab etwa 30 m Entfernung praktisch nicht möglich, die Methanprobe anzuvisieren und den Sensor lang genug auf die Probe ausgerichtet zu halten, um eine gültige Messung zu erhalten. Wird der Gimbal verwendet, kann die Probe auch bei einer Distanz von 50 m gefunden und die Messung durchgeführt werden. Es ist zu beachten, dass diese Messungen in Innenräumen stattgefunden haben, sodass die IR-Störstrahlung vernachlässigbar war. Im Außenbereich kann je nach Wetterverhältnissen und Reflexionshintergrund die nutzbare Messdistanz geringer ausfallen. Flugversuche und Messungen an Methanleckagen im Freifeld haben gezeigt, dass Messdistanzen im Bereich von 7 bis 20 m für das Drohnensystem eine günstige Größenordnung darstellen.

Ansprechverhalten und Schwenkgeschwindigkeit

Zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens des Sensors wurde das Ansprechverhalten auf sprunghafte Messwertänderungen und die maximale Scangeschwindigkeit untersucht. Der Gassensor liefert mit einer Frequenz von annähernd 13 Hz neue Werte. Für die Untersuchung der Ansprechzeit auf sprunghafte Konzentrationsänderung wurde zum Zeitpunkt $t = 0$ eine Platte zwischen Sensor und Gasprobenbehälter entfernt, siehe Abbildung 23 für eine Messung. Nach zwei Zyklen, also 0,15 s, liefert der Sensor im Mittel einen Wert von mehr als 68 % des Endwertes. Im Mittel erreicht der Messwert nach 1,06 s 95 % seines Endwertes.

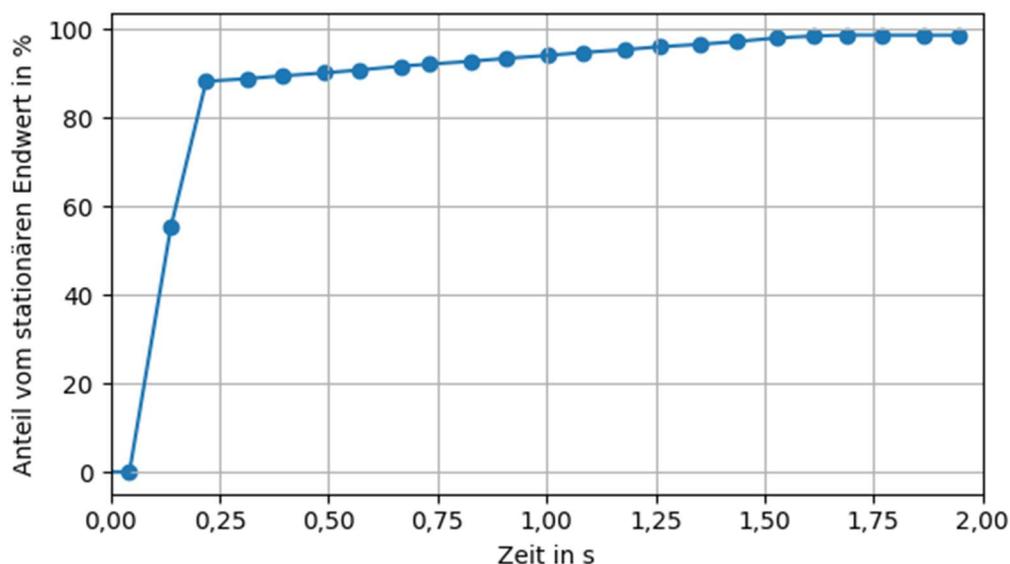


Abbildung 23: Ansprechverhalten des Sensors (Sprungantwort)

Für das Projekt ist der scannende Einsatz von besonderer Bedeutung, daher wurde die Abhängigkeit des Messwertes von der Scangeschwindigkeit in $^{\circ}/s$ ermittelt, siehe Abbildung 24. Die Messdistanz war im Mittel 2,7 m und die Probe 0,07 m breit, das entspricht $1,49^{\circ}$ Scanwinkel. Betrachtet man den maximalen Messwert bei einer Scangeschwindigkeit von $0,25^{\circ}/s$ als Referenzwert (100 %), dann werden bei einer Scangeschwindigkeit von $6^{\circ}/s$ nur 65 % und bei $8^{\circ}/s$ weniger als 30 % des Ausgangswertes erreicht.

Theoretisch betrachtet liegen bei einer Scangeschwindigkeit von $8^{\circ}/s$, noch 2,4 Messwerte auf dem Probenbehälter. Der starke Abfall des Konzentrationswertes deckt sich daher mit der Untersuchung des Ansprechverhaltens aus Abbildung 23.

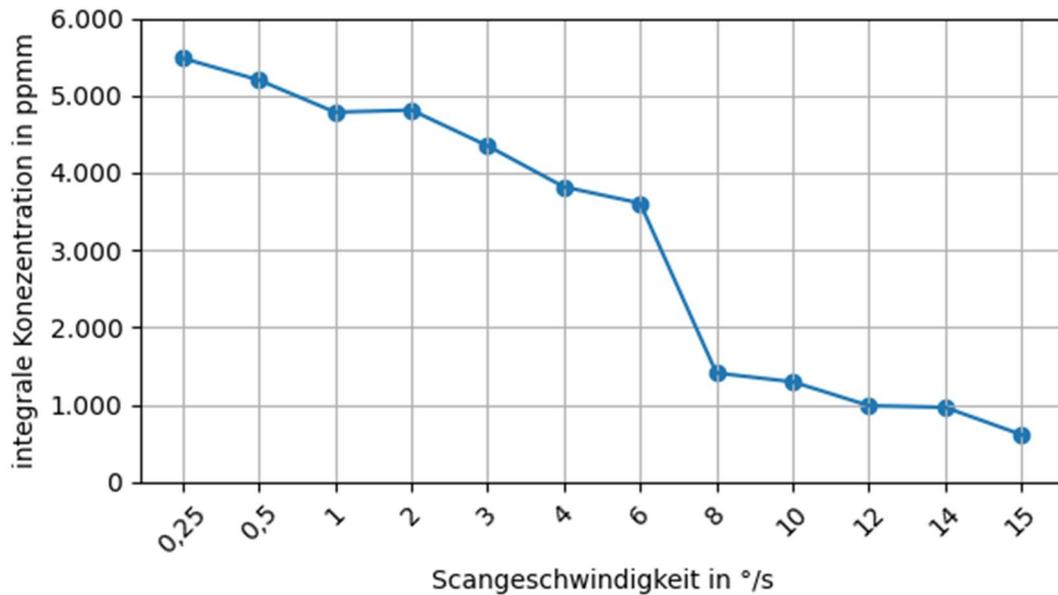


Abbildung 24: Abhängigkeit der gemessenen integralen Methankonzentration von der Scangeschwindigkeit

Quantifizierung mit offener Strömung im Labor

Der zweite Aufbau ist ein Gasprüfstand zur Freisetzung von Methan bei mittels Massenflussregelung bekanntem Massenfluss bzw. Normvolumenstrom, siehe Abbildung 25. Im Prüfstand können verschiedene Normvolumenströme freigesetzt und sicher abgesaugt werden. Er dient zur Untersuchung von Freistrahlerversuchen und Quantifizierung bei bekannten Normvolumenströmen.



Abbildung 25: Gasprüfstand

In dem gezeigten Beispiel wurden Normvolumenströme von 0; 1,1; 1,65 und 2,2 l_n/min Gasvolumenstrom durch den MFC eingestellt. Für jeden Punkt aus der Punktwolke erfolgt eine Quantifizierung nach Gleichung (6) aus Abschnitt 4.4. Da im Versuchsaufbau die Gasgeschwindigkeit unbekannt ist, wurde sie mittels des Datensatzes, bei dem 1,65 l_n/min Methan freigesetzt wurde, auf 0,044 m/s geschätzt und für alle Versuche als konstant angenommen. In Abbildung 26 ist die Auswertung bei einer Freisetzung von 1,1 l_n/min gezeigt. Links ist die Punktwolke dargestellt und rechts das Histogramm der Quantifizierungen zu sehen. Aus 13 Messungen folgt eine Schätzung des Normvolumenstrom von 1,0 – 1,25 l_n/min , aus allen weiteren folgt ein kleinerer Normvolumenstrom. In Abbildung 27 ist das Gleich für einem Normvolumenstrom von 2,2 l_n/min zu sehen. Drei Messungen liegen im Bereich von 2,5 – 2,75 l_n/min , sechs im Bereich von 2,25 – 2,5 l_n/min , keine im Bereich von 2,0 – 2,25 l_n/min und 23 im Bereich von 1,75 – 2,0 l_n/min . Die Boxplots der höchsten 11 Quantifizierungen sind in Abbildung 28 für 0,0; 1,1 und 2,2 l_n/min gezeigt.

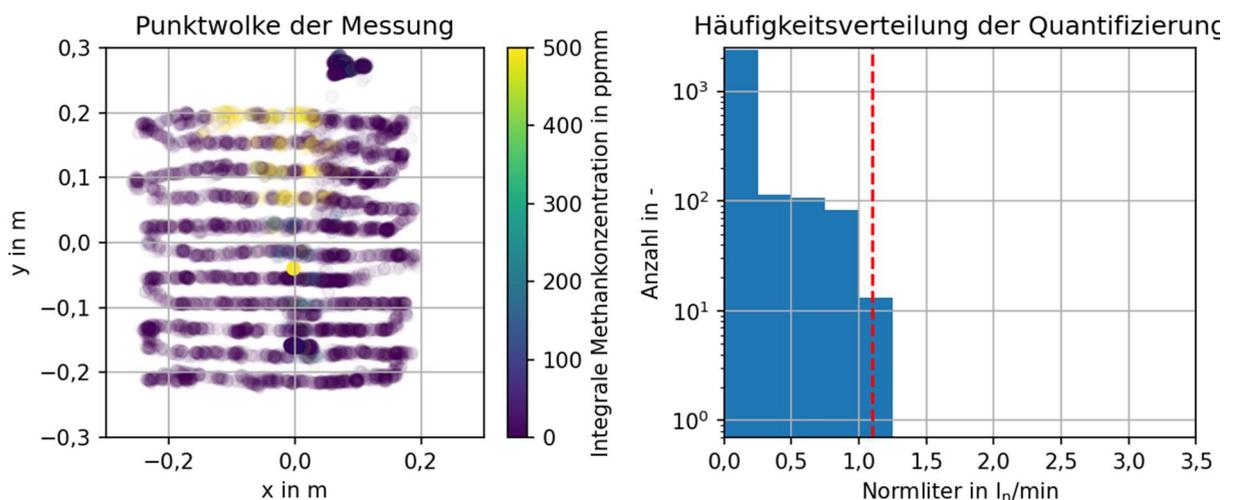


Abbildung 26: Punktwolke und Häufigkeitsverteilung der Quantifizierung im Laborprüfstand bei einer Freisetzung von 1,1 l_n/min Methan

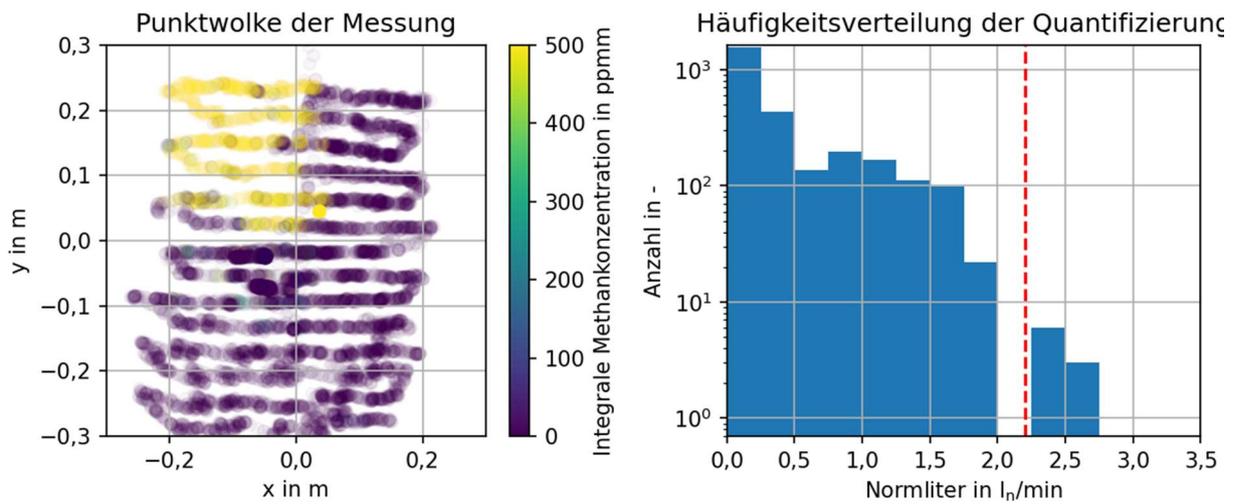


Abbildung 27: Punktwolke und Häufigkeitsverteilung der Quantifizierung im Laborprüfstand bei einer Freisetzung von 2,2 I_n/min Methan

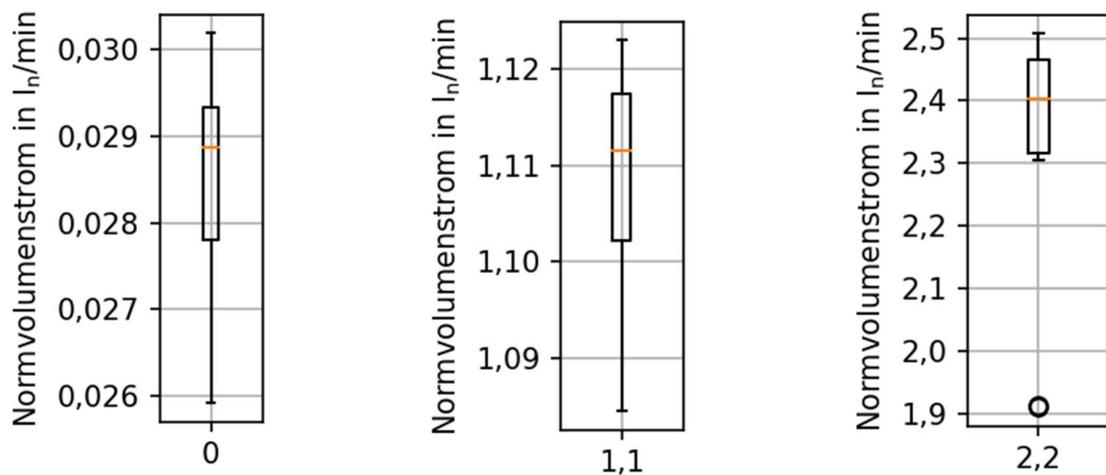


Abbildung 28: Quantifizierung für die 11 Messpunkte mit den höchsten Quantifizierten Normvolumenströmen je eingestelltem Massenstrom dargestellt jeweils als Boxplot. links: 0 I_n/min, Mitte: 1,1 I_n/min und rechts: 2,2 I_n/min

5.2 Untersuchung relevanter Einflussgrößen auf die Messung

Einfluss von Messdistanz, Messhintergrund und Sonneneinstrahlung

Der Gassensor verwendet IR-Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen, um die Methankonzentration zu ermitteln. Die Signalqualität bzw. die Stärke der Rückstrahlung wird mit einem Wert von 1 bis 14 vom Messgerät bewertet. 1 steht dabei für ein starkes, 14 für kein auswertbares Signal. Eine quantitative Bedeutung der Zahlen ist nicht dokumentiert. Die Signalstärke sinkt mit steigender Messdistanz, ist jedoch stark von dem Material und der Ausrichtung des Objektes am Ende der Messstrecke abhängig. Da auf den Messdistanzen bis 20 m Steine, Beton, Tapeten, Holz, lackierte oder gebürstete Metalle, Gras, Erde oder Sand geeignete Materialien sind, stellt dies für die üblichen Messungen aus der Luft kein Problem dar. Lediglich Bäume und Sträucher sind zum Teil keine geeigneten Reflexionshintergründe, wie es auch schon in der Arbeit [47] festgestellt wurde. In Abhängigkeit der Eigenschaften und Ausrichtung des Messhintergrundes kann der Laserstrahl auch so reflektiert werden, dass er nicht zum Sensor zurückgeworfen wird. Eine solche Totalreflektion hat sich bei den durchgeführten Versuchen nicht als Problem erwiesen.

Bei Messkampagnen wurde beobachtet, dass die Intensität der Sonneneinstrahlung einen deutlichen Einfluss auf die Signalqualität hat. Bei ähnlichen Messbedingungen ist an Tagen mit komplett deckender Bewölkung (siehe Abbildung 29 Tag 1) die Signalqualität deutlich höher als an Tagen ohne Bewölkung (siehe Abbildung 29 Tag 2 und 3). Die Messung der Methankonzentrationen ist in beiden Situationen möglich. Eine genaue Untersuchung der Auswirkung auf die realisierbare Messdistanz oder die Empfindlichkeit ist nicht erfolgt. Hierzu sind noch umfangreiche zusätzliche Messreihen erforderlich.

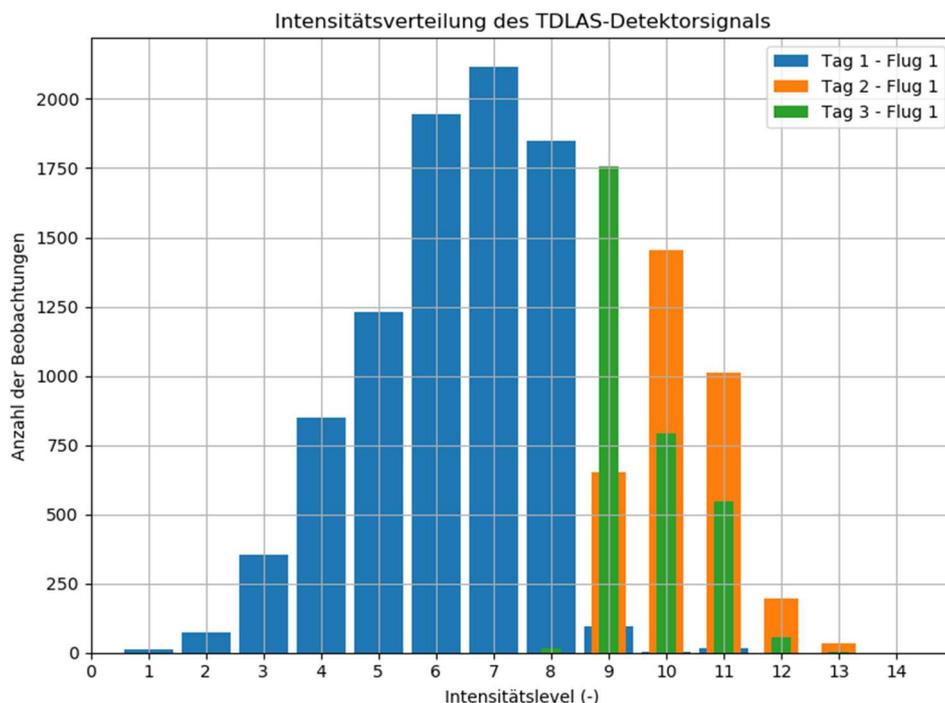


Abbildung 29: Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Signalqualität des zurückgestreuten Messlaserstrahls des Gassensors, Tag 1 bei kompletter Bewölkung, Tag 2 und 3 wolkenlos.

Schätzung der Windgeschwindigkeit aus der Schräglage

Die Daten zur Schätzung der Parameter des Modells, was die Windgeschwindigkeit v_{wind} aus der Schräglage ψ angibt, wurden im Freifeld aufgenommen. Da im Außenbereich immer Turbulenzen und Wind vorhanden sind, wurde die mittels eines Anemometers gemessene Windgeschwindigkeit zusätzlich zur Fluggeschwindigkeit berücksichtigt. Durch einen räumlichen Versatz der Windmessung mit dem Anemometer zur Drohne sind dabei Abweichungen zu erwarten. Durch die hohe Anzahl an Trainingsdaten und durch die Anordnung als geschlossene Flugroute sollten sich Abweichungen bei der Windeinflusskorrektur kompensieren. Für die Modellierung des Zusammenhanges wurden Polynomansätze ersten bis vierten Grades untersucht (siehe Abbildung 31). Durch die Modelle zweiten bis vierten Grades konnten nur Verbesserungen $< 1\%$ bei der Regression erreicht werden. Daher genügt es den Modellansatz ersten Grades zu verwenden. Die geschätzte Windgeschwindigkeit ergibt sich zu:

$$v_{\text{wind}} = 0,821 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \psi$$

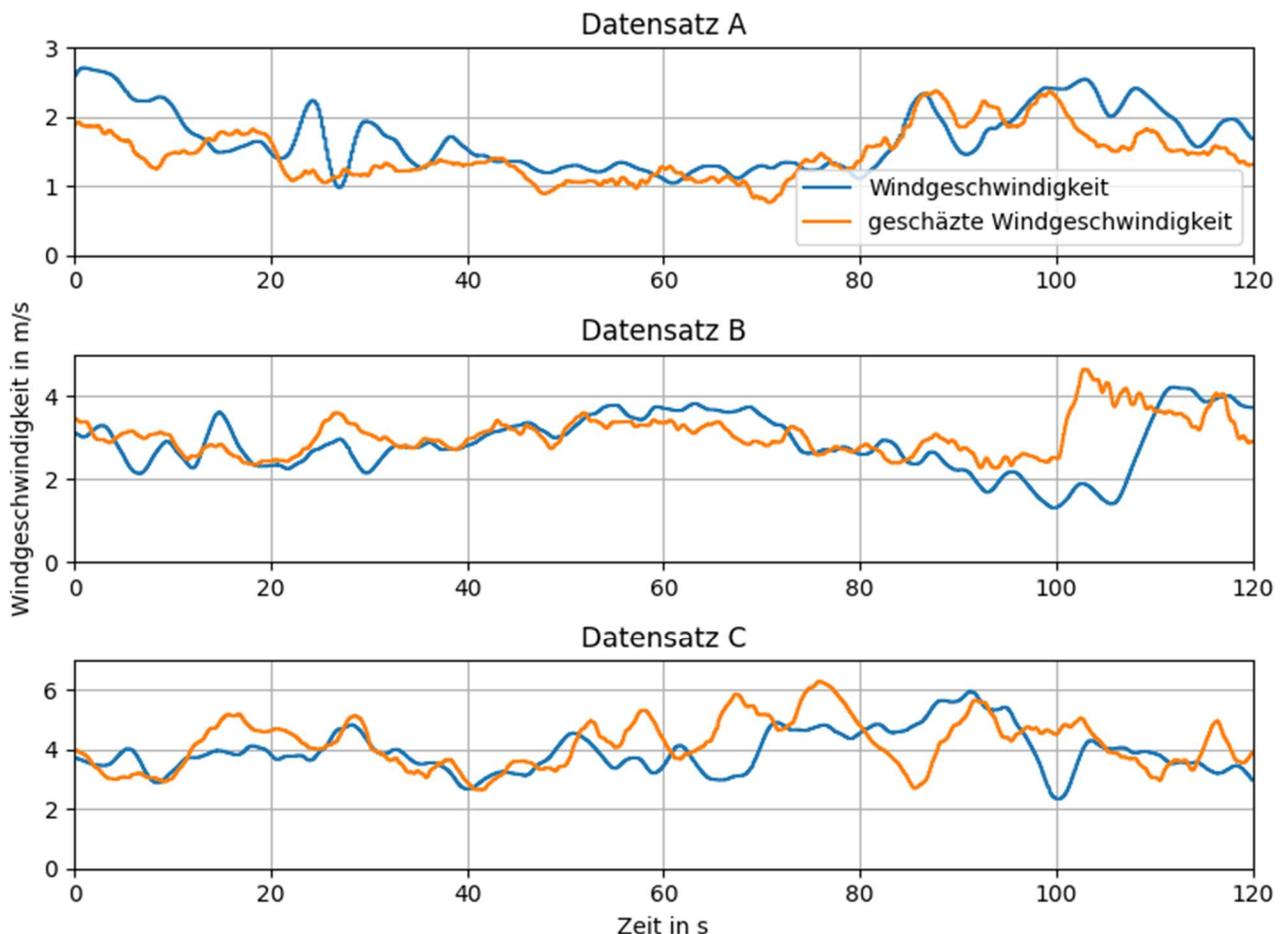


Abbildung 30: Schätzung der Windgeschwindigkeit aus der Drohnenschräglage bei Schwebeflug (Bodengeschwindigkeit der Drohne ≈ 0) mit gemessener Windgeschwindigkeit am Anemometer

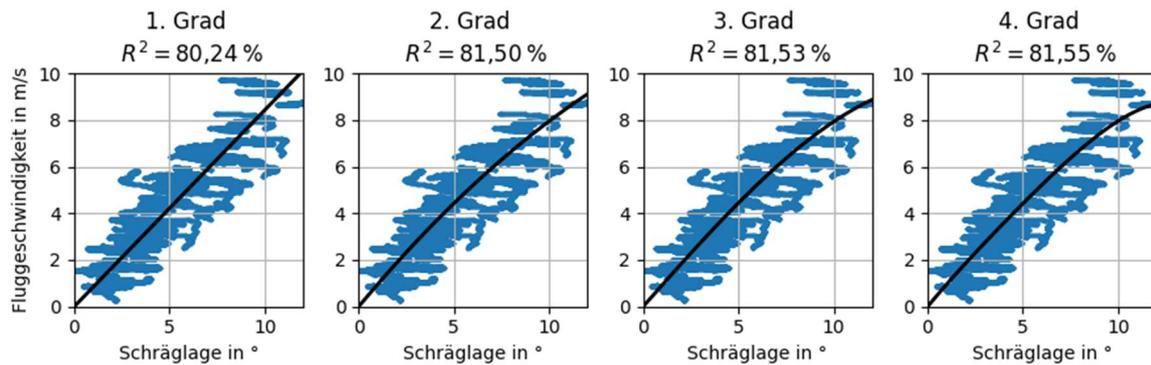


Abbildung 31: Gegenüberstellung von Polynom 1. bis 4. Grades für Modellierung des Zusammenhangs zwischen Schräglage und Windgeschwindigkeit.

Genauigkeit der Positionsbestimmung

Die Verbesserung der Positionsbestimmung durch Nutzung der RTK-Basisstation wurde untersucht. Um die Unsicherheit bei der Positionsbestimmung zu untersuchen, wurde ein Vermessungspunkt, dessen wahre Koordinaten im globalen Koordinatensystem bekannt sind, gewählt, siehe Abbildung 32. Dadurch kann die Abweichung der Positionsbestimmung über einen längeren Zeitraum bei verschiedenen Wettersituationen und Satellitenkonstellationen untersucht werden.



Abbildung 32: Drohne auf in globalen Koordinaten bekanntem Referenzpunkt

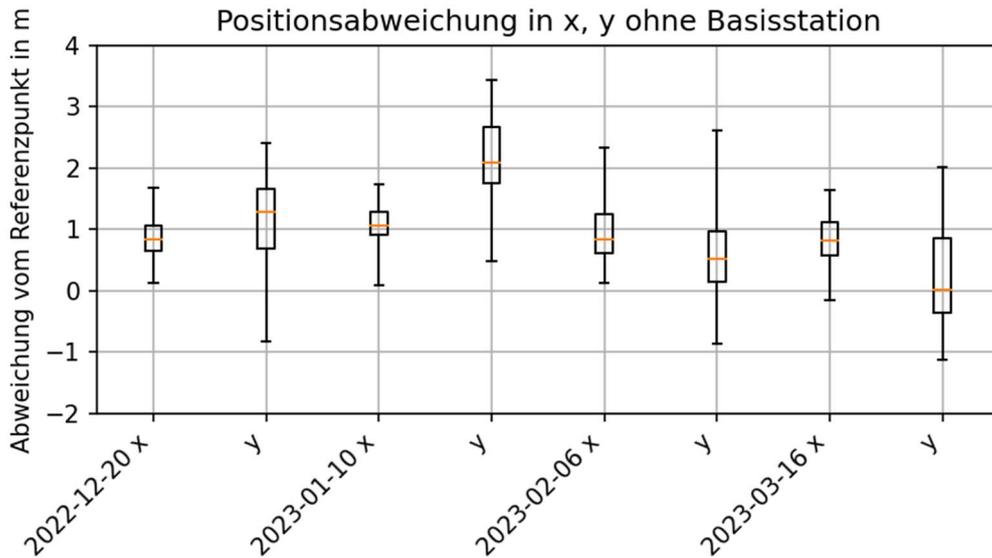


Abbildung 33: Positionsabweichung ohne Basisstation in den x- und y-Koordinaten für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Position ohne Basisstation an vier verschiedenen Tagen mit Aufzeichnung von über 30 min zwischen 1,55 und 3,49 m in der horizontalen (siehe Abbildung 33) und 4,66 und 7,78 m in der vertikalen Richtung (siehe Abbildung 35 links) schwanken. Messdaten, die über mehrere Minuten erzeugt werden, können daher ohne den Einsatz einer Basisstation nicht sinnvoll fusioniert werden. Beim Einsatz einer mobilen Basisstation reduziert sich die Schwankungsbreite auf 0,02 bis 0,05 m (siehe Abbildung 34) in der Horizontalen und 0,07 bis 0,11 m in der Vertikalen (siehe Abbildung 35 rechts). Eine hohe Genauigkeit der Positionsbestimmung ist für die Messdatenfusion wichtig, da andernfalls die Fusionierung zu einer Methankonzentrationskarte bzw. die genaue Verortung von Leckagen

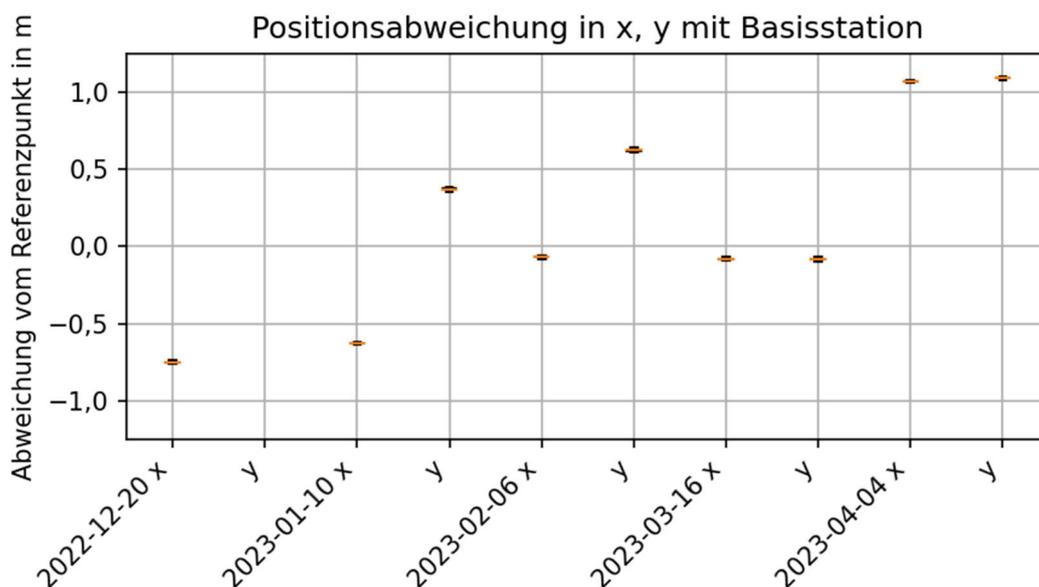


Abbildung 34: Positionsabweichung mit Basisstation in den x- und y-Koordinaten für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen

nicht möglich ist. Für wiederkehrende Messungen, z. B. jährliche Inspektionen, oder zum Verorten der Leckagen in globalen Koordinaten, z. B. zum Abgleich mit anderen Datenquellen, ist darüber hinaus eine hohe Präzision (Wiederholgenauigkeit) wichtig. Für den Referenzpunkt zeigt sich mit Basisstation eine mittlere Abweichung von -0,44 bis 0,26 m in horizontaler (siehe Abbildung 34) und -5,52 bis -10,12 m in vertikaler (siehe Abbildung 35 rechts) Richtung.

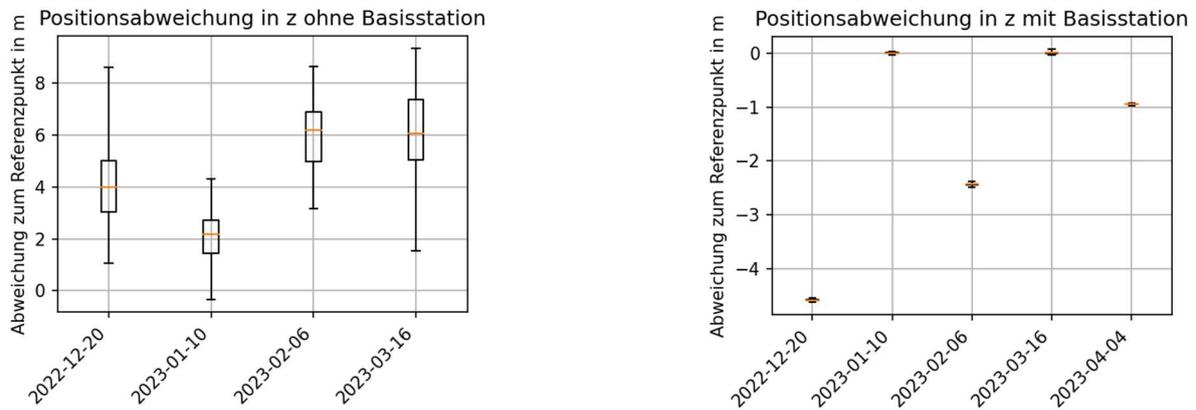


Abbildung 35: Positionsabweichung in der z-Koordinate für mindestens 30 Minuten lange Datensätze an verschiedenen Tagen. **Links:** ohne Basisstation. **Rechts:** mit Basisstation

Durch den Einsatz der festinstallierten Referenzstation des SAPOS-Netzwerkes über eine Internetverbindung kann, ohne Aufstellen einer eigenen Referenzstation, eine hohe Präzision erreicht werden. Beim Einsatz des SAPOS-Netzwerkes ergibt sich eine Schwankung der Position von 0,02 bis 0,04 m (siehe Abbildung 36) in der Horizontalen und 0,07 m in der Vertikalen. Die SAPOS-Stationen kennen ihre wahre Position im globalen Koordinatensystem. Der eigenen Referenzstation fehlt diese Information und sie erlaubt nicht, die Position einzugeben, falls diese bekannt wäre. Für den Referenzpunkt zeigt sich eine mittlere Abweichung von -0,38 bis 0,21 m in horizontaler Richtung (siehe Abbildung 36) und damit eine höhere Genauigkeit als beim Betrieb einer eigenen Basisstation.

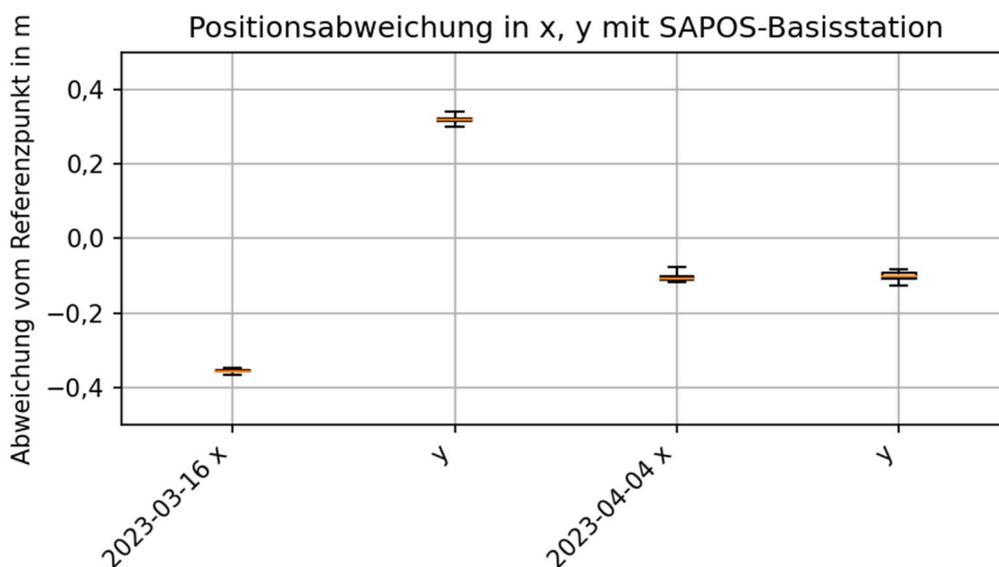


Abbildung 36: Positionsabweichung mit SAPOS-Basisstation in den x und y Koordinaten für verschiedene Tage

5.3 Versuche im Freifeld

Die Versuche im Freifeld haben an mehreren Tagen auf einem Fluggelände in der Nähe von Gütersloh stattgefunden und dienten der Erprobung des Systems inklusive der schrittweise erweiterten Software. An den über das Jahr verteilten Testtagen wurde das System bei verschiedenen Witterungsbedingungen getestet und Scan-Methoden zur Konzentrationskartierung und Emissions-Quantifizierung wurden angewendet.

Kartierung der Methankonzentration

Zur Kartierung der Methankonzentration wurde sowohl der Rasterscan mit dem Gimbal als auch die orthogonale Ausrichtung des Messmoduls beim Überfliegen des Zielgebietes getestet. Abbildung 37 zeigt das Ergebnis einer solchen Kartierung in den drei Visualisierungsformen 2D-Rasterkarte, ungefilterte Punktwolke und eine in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte gefilterte Punktwolke. Das dargestellte Inspektionsgebiet hat eine Größe von etwa 10 m x 8 m. Die Gasproben von etwa 10 cm x 10 cm Größe konnten mit beiden Methoden sicher gefunden werden.

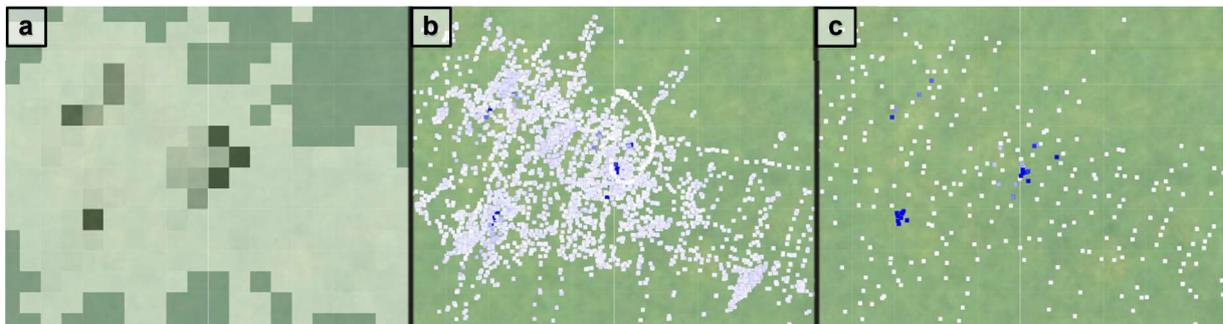


Abbildung 37: Scan-Methoden zum Finden von Methankonzentrationen. Die gezeigte Fläche ist etwa 10 m x 8 m groß und enthält 3 Gasproben mit einer Größe von etwa 10 cm x 10 cm. **(a)** 2D-Rasterkarte, **(b)** Punktwolke mit allen Messwerten, **(c)** gefilterte Punktwolke, mit Punktdichten in Abhängigkeit der Höhe der Methankonzentration

Quantifizierung im Freifeldversuch

Der Versuchsaufbau zur Freisetzung von Methan im Freifeld ist in Abbildung 38 zu sehen. Zum Aufbau gehören das Anemometer zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit am Boden, eine Methangasflasche, der Prüfstand zum Freisetzen des Gases mit einem Laptop zur Datenaufzeichnung und Steuerung des Mass-Flow-Controllers, um definierte Normvolumenströme freizusetzen. In dem gezeigten Beispiel wurde eine Freisetzung von 0; 1,1 und 2,2 l_n/min durch den MFC eingestellt. In Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 ist der inspizierte Bereich links und das Histogramm der Quantifizierung rechts dargestellt. Transparente Punkte haben eine Konzentration von weniger als 5 ppm m. Für jeden Punkt aus der Punktwolke erfolgt eine Quantifizierung nach Gleichung (6) aus Abschnitt 4.4. Durch die Hintergrundmethankonzentration in der Atmosphäre und dem Rauschen des Gassensors ergeben sich auch ohne Methanfreisetzung Messwerte, die zu Methanmassenflüssen größer Null führen. In den gezeigten Daten wurde die Hintergrundmethankonzentration herausgerechnet, außerdem wurde der gleitende Mittelwert der Windgeschwindigkeit für eine Fensterbreite von 15 s verwendet.

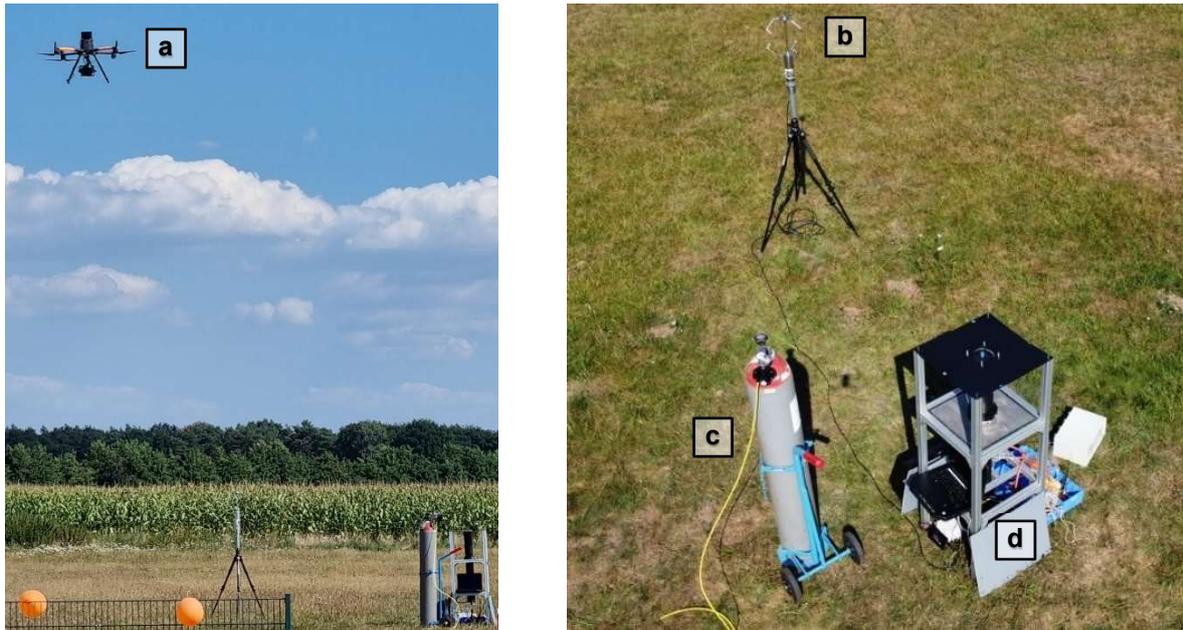


Abbildung 38: Versuchsaufbau im Freifeld mit: **(a)** messender Drohne, **(b)** Anemometer, **(c)** Methanflasche, **(d)** Prüfstand für Freistrah-Leckagesimulator mit Laptop zur Datenaufzeichnung und Steuerung des Mass-Flow-Controllers

Das Histogramm der Quantifizierung zeigt in Abbildung 39 für vier Messpunkte einen Methan-normvolumenstrom von 0,25 bis 0,5 l_n/min an, alle weiteren Messpunkte fallen in den Bereich von 0,0 bis 0,25 l_n/min .

In Abbildung 40 ist die gleiche Auswertung für einen eingestellten Normvolumenstrom von 1,1 l_n/min dargestellt. Sieben Messpunkte schätzen einen Normvolumenstrom von 1,0 – 1,25 l_n/min , 11 einen von 0,75 – 1,0 l_n/min .

In Abbildung 41 ist analog dazu die Auswertung für einen eingestellten Normvolumenstrom von 2,2 l_n/min . Jeweils fünf Messwerte schätzen einen Normvolumenstrom von 2,0 – 2,25 bzw. 2,5 bis 2,75 l_n/min , 5 einen von 2,25 bis 2,5 l_n/min , 9 einen von 1,75 bis 2,0 l_n/min .

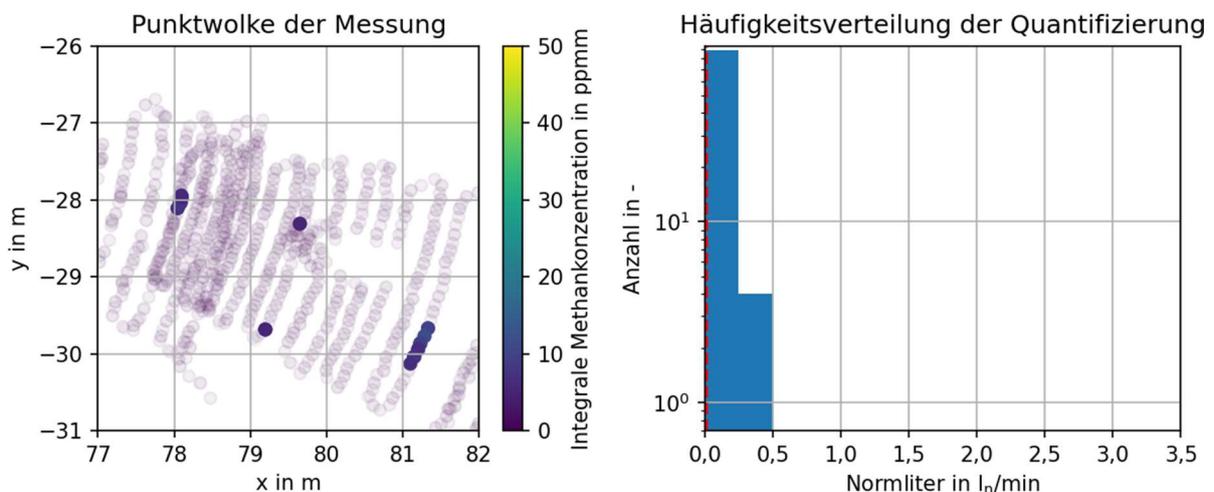


Abbildung 39: Gasquantifizierung bei Freifeldexperimenten ohne Freisetzung von Methan

Zur Beurteilung und zum Ablesen der geschätzten Normvolumenströme werden aus den quantifizierten Punkten die höchsten 11 Normvolumenströme ausgewählt und in einem Boxplot dargestellt (siehe Abbildung 42).

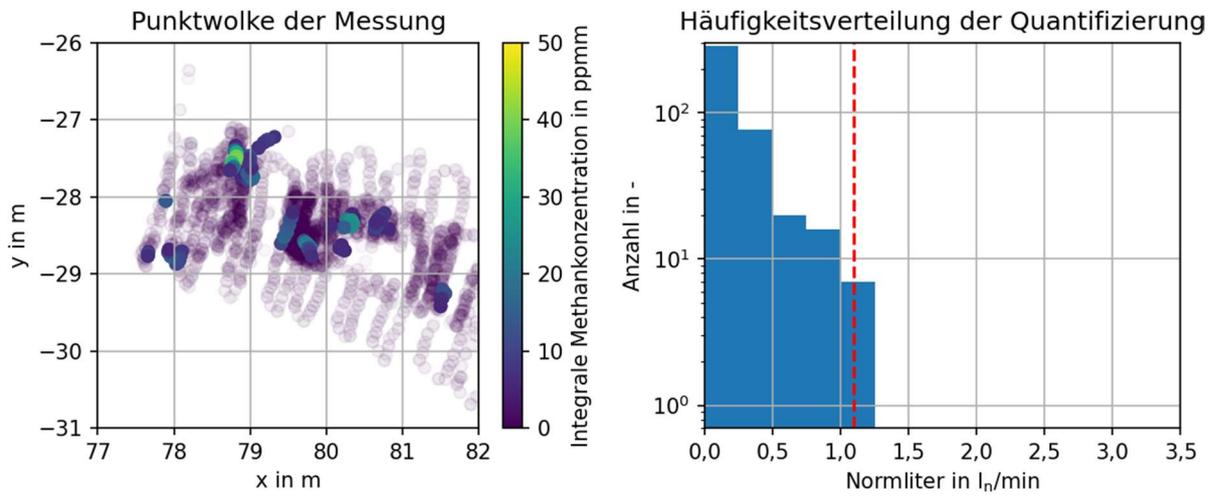


Abbildung 40: Quantifizierung bei Freifieldexperimenten und einer Freisetzung von $1,1 I_n/\text{min}$ Methan

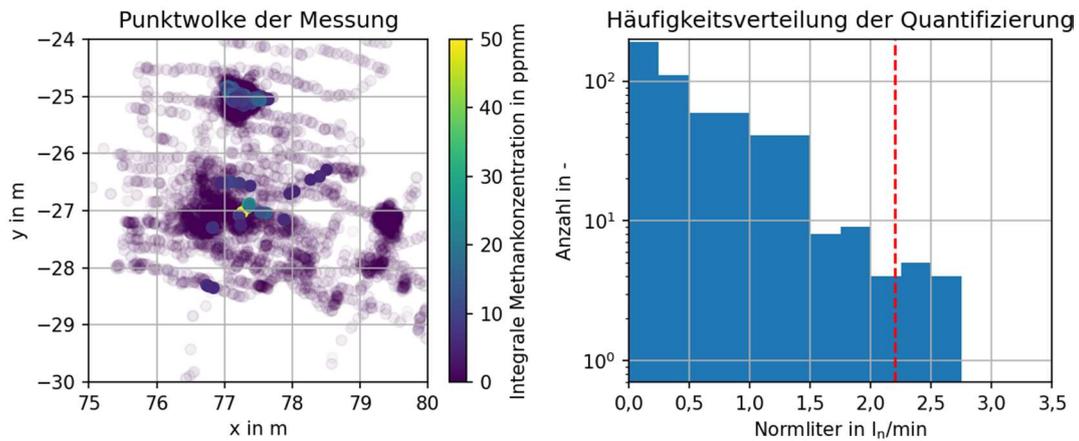


Abbildung 41: Quantifizierung bei Freifieldexperimenten und einer Freisetzung von $2,2 I_n/\text{min}$ Methan

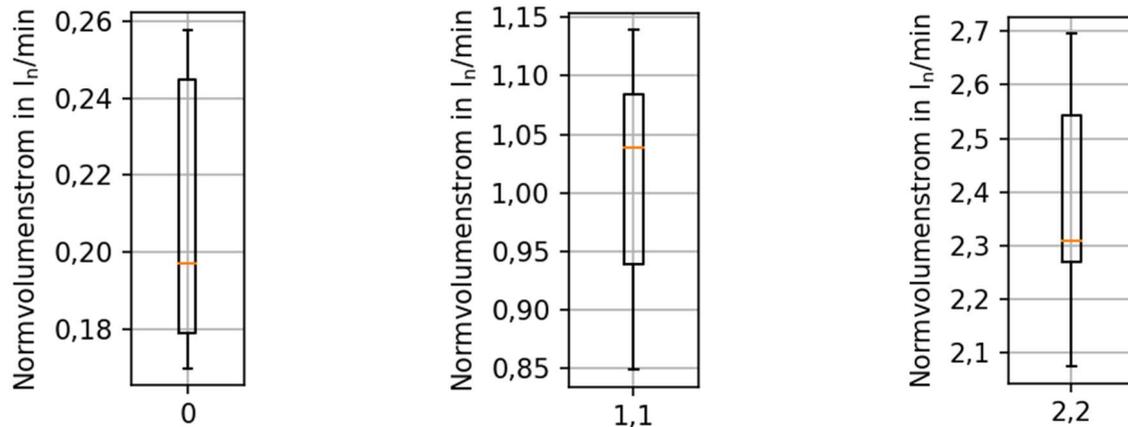


Abbildung 42: Quantifizierung für die 11 Punkte mit den höchsten quantifizierten Normvolumenströmen je eingestelltem Referenzvolumenstrom dargestellt jeweils als Boxplot. links: 0 I_n /min, Mitte: 1,1 I_n /min und rechts: 2,2 I_n /min

6 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit entstand folgende Veröffentlichung zur Vorstellung des Messsystems und seiner Fähigkeiten:

Kistner, L., Schmall, R. & Kroll, A.: An Airborne Measurement System to Detect, Locate and Quantify Methane Emissions. In: Sensor and Measurement Science International Conference (SMSI) 2023, Nürnberg, AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Kistner, L., Schmall, R. & Kroll, A.: An Airborne Measurement System to Detect, Locate and Quantify Methane Emissions. In: Journal of Sensors and Sensor Systems (JSSS) 2023 (in Arbeit)

Außerdem wurden Teilaufgaben aus Arbeitspaketen als Aufgabenstellungen für studentische Arbeiten formuliert und bearbeitet. Die im Projektzeitraum durchgeführten Arbeiten sind:

- Öztürk, Emre: Messmodul für smarte Methandrohne: Software-Integration von Kameras, Gimbal, TDLAS- und Distanzsensor in das ROS-Framework. Berufspraktische Studien, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2021
- Schulz, Roman: Charakterisierung messtechnischer Eigenschaften und Untersuchung zur Eignung für großräumige Scanaufgaben eines TDLAS-basierten Messgerätes. Bachelorarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2022
- Öztürk, Emre: Schätzung der Windgeschwindigkeit und Richtung basierend auf der Multikopter-Schräglage. Seminar Arbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2022
- Großheim, Maik: Parameterstudie zur Erzeugung von Orthofotos und 3-D Oberflächenmodellen mittels Luftaufnahmen von UAS. Seminararbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2022
- Öztürk, Emre: Vollständige und zeiteffiziente Inspektion eines Objektes durch einen scannenden TDLAS-Sensor an einem Drohnensystem. Bachelorarbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel, 2023 (in Arbeit)

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde ein fliegendes Messsystem zum Kartieren, Lokalisieren und Quantifizieren von Methanemissionen prototypisch aufgebaut und im Labor und in Freifeldversuchen evaluiert.

Das aufgebaute Messmodul wurde möglichst unabhängig von der Trägerdrohne gestaltet, damit es mit oder ohne Drohnensystem sowie auf Drohnen verschiedener Hersteller eingesetzt werden kann. Hierbei ist anzumerken, dass das genutzte Drohnenmodell die Anforderungen an Traglast, Flugstabilität, Positioniergenauigkeit und Kollisionsvermeidung erfüllt. Die entwickelte Software kann das Gesamtsystem für teilautomatische Inspektionsflüge steuern, die Messdaten fusionieren und im 3D-Raum visualisieren. Dabei können sowohl alle einzelnen Sensordaten und Kamerabilder aufgezeichnet und später weiterverarbeitet als auch die wichtigsten Messdaten in Form von 3D-Punktwolken mit Orts- und Gaskonzentrationsinformationen abgespeichert werden.

Bei den detaillierten Untersuchungen des zentralen Infrarot-optischen Methansensors hat sich gezeigt, dass das Messsystem bei optimalen Wetterbedingungen eine ausreichende Empfindlichkeit besitzt, um die für die Messung notwendigen Konzentrationsunterschiede auf Messdistanzen bis 20m aufzulösen. Darüber hinaus kann der Sensor auch scannend eingesetzt werden. Dabei muss jedoch sein Tiefpassverhalten beachtet und die Scangeschwindigkeit angepasst werden, um die Messungen nicht zu stark zu dämpfen. Es hat sich gezeigt, dass eine valide Windgeschwindigkeitsschätzung aus der Fluglage der Drohne möglich ist. Die zwei großen Vorteile hierbei sind der dadurch einfachere Aufbau des Messsystems und bei großen Inspektionsgebieten eine flächendeckend lokale Windmessung zum Zeitpunkt der Gasmessung, was mit einem stationären Anemometer nicht ohne weiteres möglich ist. Bei den Untersuchungen zur Positionsgenauigkeit der Drohne mittels Echtzeitkinematik (RTK) hat sich gezeigt, dass auf eine Referenzstation nicht verzichtet werden kann. Beim Einsatz des SAPOS-Dienstes kann der Aufbau einer eigenen Station entfallen, wenn am Inspektionsort eine Internetverbindung beispielsweise über Mobilfunk verfügbar ist. Es wurde gezeigt, dass die Erstellung von genau lokalisierten Gaskonzentrationskarten auch für kleine Gaskonzentrationen möglich ist. Unter anderem mithilfe der Windschätzung über die Drohne wurde eine anschließende Quantifizierung der Emission demonstriert.

Für den zukünftigen flächendeckenden Einsatz eines solchen fliegenden Messsystems sind insbesondere teilautomatische Bedienkonzepte, idealerweise für einen „Ein-Personen-Betrieb“ weiterzuentwickeln. Hier konnten zur Projektlaufzeit nur erste Randbedingungen für die Systemsteuerung umgesetzt und getestet werden. Ebenfalls ist ein Sicherheitskonzept und ein Einsatzkonzept auch für notwendiger Fluggenehmigungen auszuarbeiten und umzusetzen. In technischer Hinsicht würde die Erstellung von Oberflächenmodellen (Geländemodelle inkl. Gebäuden) eine wesentlich verbesserte Schätzung der lokalen Windgeschwindigkeiten erlauben. Solche Oberflächenmodelle über structure-from-motion Algorithmen nach einer Befliegung sind bspw. im Baubereich Stand der Technik. Oberflächenmodelle können höchstwahrscheinlich auch die Identifikation von Bereichen, in denen sich Gas sammelt, ermöglichen. Damit kann dann die Inspektionsplanung bzgl. Flugroute und Messpositionen optimiert erfolgen. Hierbei ist ebenfalls die Sonneneinstrahlung bzgl. Intensität und Richtung zu beachten. Potential wird ebenso in dem Messmodell zur Quantifizierung der Emissionen gesehen. Hier sind datengetriebene Regressionsmodelle bzw. Ansätze des maschinellen Lernens vielversprechend. Es sei abschließend erwähnt, dass das Messsystem mit alternativen Sensoren ebenfalls bspw. für die Messung von Kohlendioxid, SF₆, Ammoniak, Feinstaub oder Stickoxiden eingesetzt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] P. R. Shukla, „Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ 2022.
- [2] T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P. M. Midgley, „Climate Change 2013 - The Physical Science Basis,“ 2013.
- [3] Umweltbundesamt, [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energieträgern>. [Zugriff am 23. März 2023].
- [4] Deutscher Bundestag, [Online]. Available: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-936066>. [Zugriff am 23. März 2023].
- [5] Statista, [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/>. [Zugriff am 21.04.2023].
- [6] S. R. Department, *Bioenergie - Installierte Leistung weltweit bis 2022*, Statista, 2023.
- [7] Umweltbundesamt, „Unterschätztes Treibhausgas Methan - Quellen, Wirkungen, Minderungsoptionen,“ 2022.
- [8] R. W. Howarth, „A bridge to nowhere: methane emissions and the greenhouse gas footprint of natural gas,“ *Energy Science & Engineering*, Bd. 2, p. 47–60, May 2014.
- [9] K. Larsen, M. Delgado und P. Marsters, „Untapped Potential - Reducing Global Methane Emissions from Oil and Natural Gas Systems,“ 2015.
- [10] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW), Grundlagen und Praxis der Gasrohrnetz-Überprüfung, 3. Hrsg., M. Ulbrich und N. Jänchen, Hrsg., Vulkan-Verlag, 2010.
- [11] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW), *Überprüfung von Gasrohrnetzen bis zu einem Betriebsdruck bis 4 Bar*, 2018.
- [12] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen - Grundlagen*, 2005.
- [13] G. Bonow, „Gasleckortungsmethode für autonome mobile Inspektionsroboter mit optischer Gasfernmesstechnik in industrieller Umgebung,“ 2015.
- [14] R. T. Wainner, N. F. Aubut, M. C. Laderer und M. B. Frish, „Scanning, standoff TDLAS leak imaging and quantification,“ 2017.
- [15] S. Yang, R. Talbot, M. Frish, L. Golston, N. Aubut, M. Zondlo, C. Gretencord und J. McSpiritt, „Natural Gas Fugitive Leak Detection Using an Unmanned Aerial Vehicle: Measurement System Description and Mass Balance Approach,“ *Atmosphere*, Bd. 9, p. 383–405, October 2018.
- [16] Open Grid Europe GmbH, *CHARM - Lasergestützte Gasferndetektion*, 2016.

- [17] FLIR, *FLIR GF300/GF320 Infrared Camera for Methane and VOC Detection*, 2015.
- [18] S. Soldan, J. Welle, T. Barz, A. Kroll und D. Schulz, „Towards Autonomous Robotic Systems for Remote Gas Leak Detection and Localization in Industrial Environments,“ in *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Springer, 2013, p. 233 – 247.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Messung fugitiver Emissionen von Gasen und Dämpfen aus Lecks von Betriebseinrichtungen und Rohrleitungen*, 2008.
- [20] J. C. von Fischer, D. Cooley, S. Chamberlain, A. Gaylord, C. J. Griebenow, S. P. Hamburg, J. Salo, R. Schumacher, D. Theobald und J. Ham, „Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks,“ *Environmental Science & Technology*, Bd. 51, p. 4091–4099, March 2017.
- [21] G. Müller-Syring, C. Große, A. Wehling und M. Eyßer, „Methane Emission Estimation Method for the Gas Distribution Grid (MEEM),“ 2018.
- [22] Bacharach, Inc., *HI FLOW[®] Sampler For Natural Gas Leak Rate Measurement*, 2015.
- [23] Y. Zeng and J. Morris, "Calibration and Quantification Method for Gas Imaging Camera". Patent US 9.225,915 B2, 29 December 2015.
- [24] Providence Photonics, *Quantitative Optical Gas Imaging System*, 2017.
- [25] Providence Photonics, „Optical gas imaging: from qualitative to quantitative,“ *Concawe review*, Bd. 25, December 2016.
- [26] Telops, *Hyper-Cam Methane*, 2016.
- [27] M. Gålfalk, G. Olofsson, P. Crill und D. Bastviken, „Making methane visible,“ *Nature Climate Change*, Bd. 6, p. 426–430, November 2015.
- [28] M. Gålfalk, G. Olofsson und D. Bastviken, „Approaches for hyperspectral remote flux quantification and visualization of GHGs in the environment,“ *Remote Sensing of Environment*, Bd. 191, p. 81–94, 2017.
- [29] S. Dierks und A. Kroll, „Quantification of Methane Gas Leakages using Remote Sensing and Sensor Data Fusion,“ in *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Glassboro, 2017.
- [30] D. Klaus, C. Supply, S. Dierks, A. Kroll, S. Retz und O. Hensel, *Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen - Machbarkeitsuntersuchung*, 2016.
- [31] L. Golston, N. Aubut, M. Frish, S. Yang, R. Talbot, C. Gretencord, J. McSpiritt und M. Zondlo, „Natural Gas Fugitive Leak Detection Using an Unmanned Aerial Vehicle: Localization and Quantification of Emission Rate,“ *Atmosphere*, Bd. 9, p. 333–350, August 2018.
- [32] Microdrones, *mdSolutions Broschüre*, 2019.
- [33] PERGAM-Suisse AG, *Laser Methane mini - Compact and Portable Methane Gas Detector*, 2014.
- [34] Saskatchewan Research Council, *How UAVs can help industry detect methane gas*, 2020.
- [35] Blue Skies Drones, *DJI Matrice 210 Quadcopter and Laser Methane Copter (LMC) with UAV Mount - RENTAL*, 2020.

- [36] SPH Engineering, *Drone-based remote methane leak detector*, 2020.
- [37] ULC Robotics, *Unmanned Aerial Gas Leak Detection Services*, 2020.
- [38] ICI, *Methane Mapper Multi-Sensor UAV Payload*, 2019.
- [39] DJI, *U10 UAV based laser methane leakage detector*, 2019.
- [40] E. ApS, *Explicit Emission Data - Fugitive: Drone Flux Measurement*, 2023.
- [41] T. Barchyn, C. Hugenholtz, S. Myshak und J. Bauer, „A UAV-based system for detecting natural gas leaks,“ *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Bd. 6, p. 18–30, 2017.
- [42] M. Bartholmai und P. P. Neumann, „Fliegende Aufspürer - Gasmessung und Gasquellenlokalisierung mit einer Mikrodrohne,“ *chemie&more*, Bd. 4, p. 30–33, 2013.
- [43] P. Neumann, S. Asadi, A. Lilienthal, M. Bartholmai und J. Schiller, „Autonomous Gas-Sensitive Microdrone: Wind Vector Estimation and Gas Distribution Mapping,“ *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Bd. 19, p. 50–61, March 2012.
- [44] P. P. Neumann, „Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone,“ 2013.
- [45] P. P. Neumann, H. Kohlhoff, D. Hüllmann, A. J. Lilienthal und M. Kluge, „Bringing Mobile Robot Olfaction to the next dimension — UAV-based remote sensing of gas clouds and source localization,“ in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017.
- [46] P. P. Neumann, D. Hüllmann, D. Krentel, M. Kluge, H. Kohlhoff und A. Lilienthal, „Gas Tomography Up In The Air!,“ in *IEEE Sensors 2018*, 2018.
- [47] P. P. Neumann, H. Kohlhoff, D. Hüllmann, D. Krentel, M. Kluge, M. Dzierlinski, A. J. Lilienthal und M. Bartholmai, „Aerial-based gas tomography - from single beams to complex gas distributions,“ *European Journal of Remote Sensing*, p. 1–15, July 2019.
- [48] N. Winkler, P. P. Neumann, D. Hüllmann, H. Kohlhoff, M. Bartholmai, V. H. Bennetts und A. J. Lilienthal, *Remote gas sensing with multicopter platforms*, 2019.
- [49] Bundesnetzagentur, *MARKTBEOBACHTUNG Monitoring Energie; Monitoringbericht 2022*,
<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/start.html>, 2023.
- [50] D. V. d. G.-. u. Wasserfaches, *Merkblatt G 465-3 (M) Mai 2019; Leckstellen an Gasleitungen in Gasrohrnetzen - Lokalisation, Klassifikation, Umgang mit Leckstellen*, DVGW, 2019.
- [51] D. V. d. G.-. u. Wasserfachs, *Arbeitsblatt G465-1 (A) Mai 2019; Überprüfung von Gasrohrnetzen mit einem Betriebsdruck bis 16 bar*, DVGW, 2019.
- [52] D. V. d. G.-. u. Wasserfachs, *Arbeitsblatt G466-1 (A) Mai 2018; "Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Betrieb und Instandhaltung"*, DVGW, 2018.
- [53] D. V. d. G.-. u. Wasserfachs, *Merkblatt DVGW G 465-4 (M) Mai 2019; Gerätetechnik für die Überprüfung von Gasleitungen und Gasanlagen*, DVGW, 2019.
- [54] D. V. d. G.-. u. Wasserfachs, *DVGW G 501:2012-05; Luftgestützte Gasferndetektionsverfahren*, Beuth, 2012.

- [55] S. H. Stephan Rosendahl, *Interview Gasnetzbetreiber; Fa Westnetz; Machbarkeit Luftgestützter Inspektionssysteme*, 2022.
- [56] B. f. Straßenwesen, *Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING)*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2022.
- [57] Statista, *Biogasanlagen - Anzahl in Deutschland bis 2022*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/>: Statista, 2023.
- [58] K. f. Anlagensicherheit, *Technische Regel für Anlagensicherheit; Sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen (TRAS 120)*, KAS, 2019.
- [59] D. V. d. G.-. u. Wasserfachs, *Arbeitsblatt G 614-2 (A) Oktober 2014 „Freiverlegte Gasleitungen auf Werksgelände hinter der Übergabestelle; Betrieb und Instandhaltung*, Beuth, 2014.
- [60] D.-K. R. d. L. (KRdL), *Diffuse Emission - Optische Gasdetektion zur Überprüfung von Anlagen - Biogasanlagen*, Beuth, 2022.
- [61] S. R. e. al, *Quantifizierung Klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen - Felderprobung*, DBU, 2020.
- [62] D. K. e. al, *Quantifizierung klimarelevanter Gasleckagen bei Biogasanlagen - Machbarkeitsuntersuchung*, DBU, 2016.
- [63] S. Bundesamt, *Abfallentsorgung - Anzahl der Deponien und Input*, 2021.
- [64] VDI, *Deponiegaserfassung: Methan aus dem Müll*, 2022.
- [65] Umweltbundesamt, *Klimaverträgliche Abfallwirtschaft*, Online; <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/klimavertraegliche-abfallwirtschaft#abfallbehandlung-schutzt-heute-das-klima>; abgerufen 12.04.2023, 2015.
- [66] B. f. Umwelt, *Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall)*, 1993.
- [67] L. f. U. Baden-Württemberg, *Messungen auf Deponien mit dem Flammenionisationsdetektor*, LUBW, 2008.
- [68] V.-K. R. d. L. (KRdL), *VDI 3860 Blatt 3; Messen von Deponiegas - Messen von Methan an der Deponieoberfläche mittels Sauglockenverfahren*, Beuth, 2017.
- [69] V.-K. R. d. L. (KRdL), *VDI 4285 Blatt 1; Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen - Grundlagen*, Beuth, 2005.
- [70] J.-Y. Wang, B. Luo, M. Zeng und Q.-H. Meng, „A Wind Estimation Method with an Unmanned Rotorcraft for Environmental Monitoring Tasks,“ *Sensors*, 2018.
- [71] *Norm DIN 1343: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen*, DIN e.V., 1990.
- [72] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *TRAS 120 "Sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen"*, 2019.