

**Chemische und physikalische
Charakterisierung von anthropogenen
Emissionsquellen:
Ein integrativer Ansatz mittels UAV
basierter Online In-Situ-Probenahme
und komplementärer Analytik**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
im Promotionsfach Chemie

am Fachbereich Chemie, Pharmazie, Geographie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von
Sven Essel
geboren in Bad Soden am Taunus

Mainz, August 2024

Betreuer:in

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2025

Zusammenfassung

Die Luftreinhaltung in der Industrie ist von entscheidender Bedeutung für die Erhaltung der Umweltqualität und die Sicherstellung einer gesunden Arbeitsumgebung. Angesichts der bestehenden Industrialisierung und der damit verbundenen Emissionen ist es unerlässlich, wirksame Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffen zu ergreifen. Die regionale Dichte von Industriebetrieben geht mit einer lokalen Konzentration der Emission von Luftschadstoffen einher, was vor allem Einfluss auf die Luftqualität der direkten Umgebung hat.

In dieser Arbeit wurde ein UAV-basiertes Online In-Situ Probenahme-Modul (InfraSampler) für stationäre und mobile Messungen, sowie direkten Probenahme am Schornstein von Industrieemissionen entwickelt. Der InfraSampler wurde mit hochauflösenden Sensoren zur Messung der Konzentrationsverteilung von Emissionen ausgestattet (z.B. CO₂, O₂, CH₄). Zusätzlich wurde eine kommutable Probenahmeeinheit eingerichtet, welche die Probenahme von VOCs mit anschließender Analytik im Labor oder eine olfaktometrische Analyse ermöglicht. Es wurden drohnenbasierte Messstrategien entwickelt, welche besonders zur Charakterisierung urbaner Industrieemissionen geeignet sind. Querschnittsmessflüge durch die Abluftfahne ermöglichten die Bestimmung der Struktur und Homogenität der Abluftfahne und lieferten eine Grundlage zur Berechnung des Beitrags der industriellen Emissionen zur umgebenden Gesamtbelastung. Radiale Messflüge ermöglichten eine Kartierung der Gasfahnenverteilung über einen definierten Bereich. Damit gehören zu den möglichen Anwendungsbereichen die Untersuchung anthropogen beeinflusster Umwelt, die Probenahme an Reingasströmen und die Transmissionsmessung sowohl im vertikalen als auch horizontalen Raum. Mögliche Zusatzapplikationen schließen die Schadstoffkartierung, Verfolgung von mobilen Quellen und die stationären Messungen mit möglichen frequenziellen Positionswechsel ein.

Es konnten Aussagen über die Einflussmechanismen einzelner atmosphärischer Parameter auf den Reingasstrom getroffen werden, um daraus allgemeine Tendenzen für eine optimale Probenahme ableiten zu können. Ein Ansatz zur Korrektur des atmosphärischen Einflusses auf die Probenahme wurde mit Hilfe des Einsatzes einer horizontalen Lanze hergeleitet und deren Leistungsfähigkeit anhand einiger Fallstudien untersucht. Darunter fällt die olfaktometrische Charakterisierung des Abgasstromes einer Biogasaufbereitungsanlage mit Vergleichsmessungen anhand dynamischer Olfaktometrie, der Kartierung und Ermittlung von der Distribution einer simulierten Gasfahne (CO₂ und CH₄) in Bezug auf den Bodeneffekt, sowie dem Definieren von möglicher Sensorik, welche durch eine stationäre Messkampagne geprüft und anschließend in das InfraSampler-System mit aufgenommen wurde.

Zukünftige Untersuchungen der Ursachenzusammenhänge zwischen Immissions- und Emissionsbetrachtungen bieten ein interessantes Forschungsfeld, welches durch UAV-gestützte Transmissionsmessungen weiter erforscht werden sollte. Ein weiterer wichtiger Schritt, um eine große Anzahl an Flugmissionen durchführen zu können und statistische Auswertungen zu ermöglichen ist die Entwicklung eines Leitfadens zur UAV-basierten Probenahme, basierend auf bestehenden Normen und Richtlinien.

Abstract

Air pollution control in industry is crucial for maintaining environmental quality and ensuring a healthy working environment. In view of the existing industrialization and the associated emissions, it is essential to take effective measures to reduce pollutants. The regional density of industrial plants is accompanied by a spatial concentration of air pollutant emissions, which has a particular impact on the air quality of the surrounding regions.

In this work, a UAV-based online in-situ sampling module (InfraSampler) was developed for stationary and mobile measurements, as well as direct sampling of industrial emissions. The InfraSampler was equipped with high-resolution electrical sensors to measure the chemical composition and size distribution of trace gases in horizontal and vertical airspace (e.g. CO₂, O₂, CH₄). In addition, a commutable sampling unit was set up, which enables the sampling of VOCs with subsequent analysis in the laboratory or olfactometric sampling. Mobile measurement strategies were developed and applied, which are particularly suitable for characterizing urban industrial emissions. Cross-section measurement flights through the exhaust air plume allowed both the determination of the structure and homogeneity of the exhaust air plume and the calculation of the contribution of industrial emissions to the total surrounding pollution. Radial measurement flights make it possible to map the plume distribution over a defined area. Possible applications include the investigation of anthropogenically influenced environments, sampling of raw gas streams and transmission measurements in both vertical and horizontal space. Possible additional applications include pollutant mapping, tracking of mobile sources and stationary measurements with possible frequency position changes.

Statements could be made about the influence mechanisms of individual atmospheric parameters on the raw gas flow in order to derive general tendencies for optimal sampling. An approach for correcting the atmospheric influence on the sampling was derived with the aid of a horizontal lance and its efficiency was examined on the basis of several case studies. These include the olfactometric characterization of an exhaust gas stream from a biogas upgrading plant with comparative measurements using dynamic olfactometry, the mapping and determination of the distribution of a simulated gas plume (CO₂ and CH₄) in relation to the ground effect, as well as the definition of possible sensor technology, which was tested by means of a static measurement campaign and subsequently incorporated into the InfraSampler system.

Future work offers an interesting field of research with the investigation of the causal relationships between immission and emission considerations, which should be further researched using UAV-supported transmission measurements. Another important step in order to be able to carry out a large number of flight missions and enable statistical evaluations is the development of a guideline for UAV-based sampling based on existing standards and guidelines.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	- 1 -
Zusammenfassung	- 2 -
Abstract	- 3 -
Abkürzungsverzeichnis	- 6 -
1 Einleitung	- 7 -
1.1 <i>Stand der Technik</i>	- 9 -
1.2 <i>Zielstellung und Aufbau der Arbeit</i>	- 9 -
2 Allgemeine Grundlagen	- 13 -
2.1 <i>Ausbreitungsmodellierung</i>	- 13 -
2.2 <i>Aerodynamische Effekte</i>	- 15 -
3 Beschreibung der Instrumente und Hilfsmittel	- 21 -
3.1 <i>Aufbau und Ausstattung</i>	- 22 -
4 Entwicklung von Messstrategien zur Untersuchung von Reingasströmen	- 42 -
4.1 <i>Allgemeine Anwendungsmöglichkeiten vom InfraSampler</i>	- 42 -
4.2 <i>Charakterisierung der Emission anthropogener Quellen</i>	- 43 -
4.3 <i>Festlegung des Probenahmeverfahrens</i>	- 48 -
4.4 <i>Entwicklung von Methoden zur Analyse von mobilen Messdaten</i>	- 54 -
4.5 <i>Entfernung atmosphärischer Verdünnungseffekte</i>	- 54 -
4.6 <i>Planung und Realisierung der individuellen Einsätze</i>	- 57 -
5 Fallstudien	- 60 -
5.1 <i>Olfaktometrische Charakterisierung von Abluft</i>	- 60 -
5.2 <i>Stationäre Messkampagne im IPH</i>	- 67 -
5.3 <i>Quantifizierung simulierter Gasfahnen</i>	- 75 -
6 Ergebnisse	- 82 -
6.1 <i>Charakterisierung von Reingasströmen mit dem InfraSampler</i>	- 82 -
6.2 <i>Stationäre Messkampagne im IPH</i>	- 98 -
6.3 <i>Quantifizierung simulierter Gasfahnen</i>	- 115 -
7 Diskussion	- 125 -
7.1 <i>Bewertung der Messmethoden</i>	- 125 -
7.2 <i>Praxisrelevanz der entwickelten Messstrategien</i>	- 139 -
8 Ausblick	- 147 -
Literaturverzeichnis	- 148 -

Abbildungsverzeichnis	- 157 -
Tabellenverzeichnis	- 165 -
Formelverzeichnis	- 167 -
9 Anhang	- 168 -
9.1 Theoretische Abkühlraten	- 168 -
9.2 Technische Zeichnung des Probenahme-Gehäuse (InfraSampler).....	- 171 -
9.3 Schaltplan der InfraSampler-Systeme	- 177 -
9.4 Programmcode (C++) InfraSampler v1.0.....	- 179 -
9.5 Programmcode (C++) InfraSampler v2.0.....	- 187 -
9.6 Programmcode (Python) InfraSampler v2.0	- 192 -
9.7 Flugbuch und Checkliste für UAV	- 206 -
9.8 Probenahmeprotokoll	- 208 -
9.9 Messverfahren und Verfahrenskenngrößen	- 212 -
9.10 Meteorologie des Versuchzeitraumes der stationären Messkampagne	- 214 -

Abkürzungsverzeichnis

AG	Above Ground
Bft	Beaufortskala
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EBS	Ersatzbrennstoff
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
IMS	Immissionsschutz
IPH	Industriepark Höchst
JGU	Johannes Gutenberg-Universität Mainz
LBA	Luftfahrtbundesamt
MCU	Mikrocontroller
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
MOX	Metalloxid-Halbleiter
m.v.	measured value
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor
NHN	Normalhöhennull
NOTAM	Notice To Airmen
PM	Particular Matter (Feinstaub)
SORA	Specific Operations Risk Assessment
UAS	Unmanned Aerial System (Drohne, Bodenstation & Nutzlast)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drohne)
UPA	Umwelt- und Prozessanalytik
USA	Ultraschallanemometer
VLOS	Visual Line of Sight

1 Einleitung

Die Luftreinhaltung in der Industrie ist von entscheidender Bedeutung für die Erhaltung der Umweltqualität und die Sicherstellung einer gesunden Arbeitsumgebung. Angesichts der bestehenden Industrialisierung und der damit verbundenen Emissionen ist es unerlässlich, wirksame Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffen zu ergreifen. Ein Großteil von Maßnahmen werden nur basierend auf repräsentativen Messdaten getroffen (Hansmann und Röckinghausen 2023).

Diese Messdaten werden im Rahmen der Immissions- und Emissionsüberwachung von Luftschadstoffen in industriellen Umgebungen ermittelt, um ihre Auswirkungen auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit zu bewerten. Folglich besteht ein dringender Bedarf, geeignete Methoden zur Identifizierung, Quantifizierung und Überwachung bekannter und unbekannter Emissionsquellen und -senken in der Industrie zu entwickeln, sowie Wirkungsanalysen auf Verfahren zur Emissionsreduzierung anzuwenden. Dabei stoßen Überwachungssysteme oft auf Herausforderungen, wie beispielsweise komplexe Anlagenstrukturen, unterschiedliche Schadstoffquellen und variierende Emissionsmuster. Die Gewinnung repräsentativer Proben in solchen Umgebungen gestaltet sich häufig schwierig, da herkömmliche Probenahmetechniken an ihre Grenzen stoßen und nicht immer zuverlässige Ergebnisse liefern.

Die Quellen und der Verbleib anthropogener und biogener Verbindungen und ihrer Sekundärprodukte in der Atmosphäre sind für diejenigen von Interesse, die die Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Anthropogenen und Biogenen und die Chemie der Oxidationsmittel in der Troposphäre untersuchen. In den letzten Jahrzehnten haben Leichtflugzeuge und Fesselballons eine direkte Möglichkeit zur Untersuchung der unteren Troposphäre geboten (Knapp u. a. 1998; S. Kumar 2023; McKendry u. a. 1998; Zhao u. a. 2021). Zu den Vorteilen von Leichtflugzeugen mit Triebwerken gehören zwar ihre große Nutzlast und die größeren Flugdistanzen, aber ihre Unfähigkeit, sich vertikal zu bewegen und zu schweben, sowie ihre Triebwerksabgase stellen Grenzen für Luftprobenahmen dar. Fesselballons, die von einer elektrischen Spillwinde gesteuert werden, haben sich als nützlich erwiesen, um Sondierungsgeräte und Teflonbeutel für meteorologische Parameter und Luftschadstoffe ohne Verunreinigung durch Motorabgase zu transportieren; ihre größte Einschränkung ist jedoch die mangelnde Manövrierfähigkeit und die kurze Flugstrecke.

Um diese Probenahmeschwierigkeiten zu überwinden und eine präzise Überwachung der Luftqualität zu ermöglichen, hat sich die Anwendung von Drohnen als vielversprechende Lösung erwiesen, z. B. in der Geodäsie, bei landwirtschaftlichen Anwendungen, bei der meteorologischen Überwachung, sowie bei der Frühwarnung oder der anschließenden Überwachung vor und nach Katastrophen (Ahmadi u. a. 2022; Chojnacka 2024; Khan, Gupta, und Gupta 2022; D. K. Wong o. J.). Es gibt zwei Arten von unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) die am häufigsten untersucht und entwickelt werden. Starrflügler-UAVs sind beliebt und werden häufig für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, insbesondere für Aufgaben über große Entfernungen (Elston u. a. 2015; Schuyler, Bailey, und Guzman 2019). UAVs mit Drehflügeln verfügen über weitere einzigartige Fähigkeiten, wie schweben, Senkrechtstart, wendige Bewegung und Landung auf kleinen oder begrenzten Flächen, z. B. an Bord von Schiffen

oder auf Gebäudedächern (Hu, Liu, und Tian 2023; Persson und Wahlberg o. J.; Soman 2019). Die Effektivität von UAS hängt von den Missionszielen ab und wird mit verschiedenen Flugzeugtypen und Sensoren eingesetzt. Drohnen sind VTOL (Vertical Take-off and Landing) UAS, die keine Landebahn benötigen und oft in Situationen eingesetzt werden, in denen der Zugang zum Gelände eingeschränkt ist (Watts, Ambrosia, und Hinkley 2012). Ein weiterer Vorteil ist ihre hohe Mobilität. Drohnen können in der Nähe von Luftverschmutzungsquellen fliegen, emittierte Verbindungen mit Mikrodetektoren erkennen oder Luftproben zur Analyse entnehmen.

Die Überwachung von Immissionen und Emissionen erfordert hochpräzise Messmethoden und -instrumente, um eine genaue Erfassung der Luftschadstoffe zu gewährleisten. Optische und elektrochemische Mikrodetektoren sind nützliche Werkzeuge zur Detektion von gasförmigen Verbindungen und Feinstaub (PM) in UAV. Die Überwachung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Distickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃) und Methan (CH₄) ist von großer Bedeutung für die Umweltüberwachung (Andersen u. a. 2018; Daugėla, Suziedelyte Visockiene, und Kumpiene 2020; Jońca u. a. 2022; Mlambo u. a. 2017). PM_{2,5} (Durchmesser < 2,5 µm) und PM₁₀ (Durchmesser < 10 µm) sind die wichtigsten PM-Messungen (Hansmann und Röckinghausen 2023). Aufgrund ihres geringen Gewichts und ihrer Echtzeit-Überwachungsfähigkeiten eignen sich Mikrodetektoren zur Detektion von gasförmigen Verbindungen und Feinstaub in Drohnen (Hu u. a.). Es ist jedoch zu beachten, dass flüchtige organische Verbindungen (VOCs) normalerweise als TVOCs (Gesamt-VOCs) nachgewiesen werden, und Mikrodetektoren keine Unterscheidung zwischen einzelnen Verbindungen vornehmen können (C.-S. Yuan u. a.). Es gibt jedoch allgemeine Beschränkungen in Bezug auf Präzision, Genauigkeit und Empfindlichkeit für herkömmliche Sensoren und die oft begrenzte Anzahl von Arten, die durch Fernerkundung erfasst werden können. Für Beobachtungen auf lokaler Ebene kann die Entnahme von Luftproben mit anschließender Offline-Analyse mit aufwändigeren Analyseinstrumenten eine Alternative sein, um eine große Anzahl von Verbindungen mit ausreichend hoher Empfindlichkeit zu erfassen. Im Allgemeinen gibt es zwei Methoden zur Entnahme von Luftproben: Zum einen wird die Luft mit einer Pumpe durch ein mit Sorptionsmitteln gefülltes Rohr gesaugt (Lan u. a. 2021; Ruiz-Jimenez u. a. 2019), zum anderen wird die Luft mit einem evakuierten Kanister (z. B. einem mit elektropoliertem Edelstahl oder Quarzglas ausgekleideten Kanister) (Chang u. a. 2018) oder einem Probenbeutel (z. B. einem Teflonbeutel) mit einer Probenahmepumpe gesammelt.

Die Verwendung von Drohnen für die Umweltüberwachung, insbesondere als Alternative für industrielle Anwendungen, ist jedoch noch nicht weit verbreitet. In der Tat gibt es noch regulatorische Fragen, die gelöst werden müssen, bevor diese Technologie breiter eingesetzt werden kann (Villa u. a. 2016). Diese Arbeit vermittelt ein umfassendes Bild der Möglichkeiten von UAS im Bereich des Umwelt-Managements und zeigt auf, welche technologischen Lösungen bereits verfügbar sind, welche Methoden noch kritisch geprüft werden müssen und für welche Aufgabenstellungen nur schematische Lösungen existieren, die einer software-, hardware- und methodenseitigen Konzeption bedürfen. Diese Übersicht soll dazu beitragen, die UAV-Technologie weiterzuentwickeln und sie zu einem allgemeinen und vielseitig einsetzbaren Werkzeug im Bereich der chemischen Industrie zu machen.

1.1 Stand der Technik

Die rasante Verbreitung von UAVs ist das Ergebnis eines langen Evolutionsprozesses, der ursprünglich von militärischen Zwecken inspiriert wurde. In jüngster Zeit wurde die UAV-Technologie durch die wachsende Verfügbarkeit kleinerer Komponenten und schnellerer eingebetteter Verarbeitungsplattformen zu niedrigeren Kosten gefördert. Mini- und Mikro-UAVs können jetzt für eine Vielzahl von Überwachungsanwendungen eingesetzt werden, die eine Gefahr für Menschen darstellen oder sich an schwer zugänglichen Stellen befinden (Vacca und Onishi 2017).

Die Verwendung von UAV für Umwelt-, Energie- oder Strukturüberwachung bietet einen großen Vorteil, da gefährliche Größen oder Objekte erfasst werden können, ohne dass sich dort Menschen in unmittelbarer Nähe aufhalten müssen. Diese Drohnen werden auch als Öko-Drohnen bezeichnet (Berardi 2016). Beispiele für erfolgreiche Anwendungen von Öko-Drohnen sind die Überwachung von Vulkanen und Waldbränden, die Erkennung von Bodenerosion, die Fernerkundung von Erdbeben, die Überwachung von Weideland, die Identifizierung und Verfolgung von Insektenschwärmen und die Rekonstruktion von 3D-Steinbruchmodellen (Duangsuwan u. a. 2022; Karbach, Bobrowski, und Hoffmann 2022; de Moor u. a. 2019; Park u. a. 2020; Rahaman, Urme, und Parlevliet 2022; Tanda u. a. 2020; Tholl u. a. 2021).

Viele der vorgeschlagenen drohnengestützten Überwachungstechniken beruhen auf Bildverarbeitungssystemen. Die Leistung solcher Überwachungssysteme hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der räumlichen und spektralen Auflösung der Kameras, dem verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmus und verschiedenen anwendungsspezifischen Betriebsbedingungen (Rakha u. a. 2018). Der Einsatz von Drohnenteams kann dazu beitragen, die Erfassungswahrscheinlichkeit zu erhöhen und die Suchzeiten zu verkürzen, insbesondere in Situationen, in denen das Ziel schwer zu erkennen ist, das zu untersuchende Gebiet besonders groß ist oder die Grenzen der interessierenden Region definiert werden müssen (Hildmann u. a. 2019). In solchen Fällen bieten Sensordatenfusion und verteilte Steuerung mehrere Vorteile, wie dezentrale Autorität und Robustheit gegenüber dem Ausfall eines einzelnen Agenten (Rigas u. a. 2022). Konsensbasierte Datenfusion und Synchronisationsverfahren haben sich auch als robust gegenüber Datenpaketverlusten über drahtlose Kommunikationsverbindungen erwiesen (Alsamhi u. a. 2019; Chodorek, Chodorek, und Yastrebov 2022).

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Gasmessung mittels UAV ist noch recht übersichtlich. Die wenigen kommerziell verfügbaren Lösungen bieten Gassensoren bzw. -messtechnik, die als Nutzlast von einem UAV getragen werden und im Luftraum Messungen durchführen können, berücksichtigen aber nicht die Komplexität dieser Aufgabe hinsichtlich Flugplanung, Probenahmeunsicherheit und Ergebnisrepräsentation.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Diese Doktorarbeit ist Teil des Innovationskonzeptes der Abteilung Umweltschutz der InfraServ GmbH & Co. Höchst KG, sowie des Departements Chemie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU), welche die Entwicklung eines Online In situ-Probenahmemoduls für UAV, mit anschließenden olfaktometrischen und gasanalytischen Untersuchungen im Labor

verfolgt, sowie die Integration eines engmaschigen Sensornetzwerkes im Industriepark Höchst (IPH), basierend auf elektrochemischen Sensoren in „low-cost-Ausführung“, um ein umfassendes Luftmonitoring zu ermöglichen.

Das primäre Ziel dieser Arbeit besteht dabei in der Konzeption eines Probenahmemoduls, das als fliegende Arbeits-Plattform eingesetzt werden kann. Darüber hinaus soll eine Probenahmestrategie entwickelt und umgesetzt werden, welche die gesammelten Ergebnisse, des entworfenen Moduls samt Drohne eine repräsentative Methode zur Verfügung stellt, um externe Störungen von lokalen Einmischungsvorgängen aus der unteren Troposphäre (10 m bis 250 m) auf den Reingasstrom zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu kompensieren. Dazu ist eine Verknüpfung von Messparametern (Spurengase oder Geruchspartikel) aus Beobachtungen mit Transportmodellen, sowie Fallbeispielen genauso wichtig, wie die Kenntnis der Eigenschaften der Messregion (IPH) unter unterschiedlichen synoptischen Bedingungen.

Die Anforderungen an das zu konzipierende Probenahme-System sind vielfältig. In Abbildung 1 sind beispielhaft einige dieser Anforderungen dargestellt.

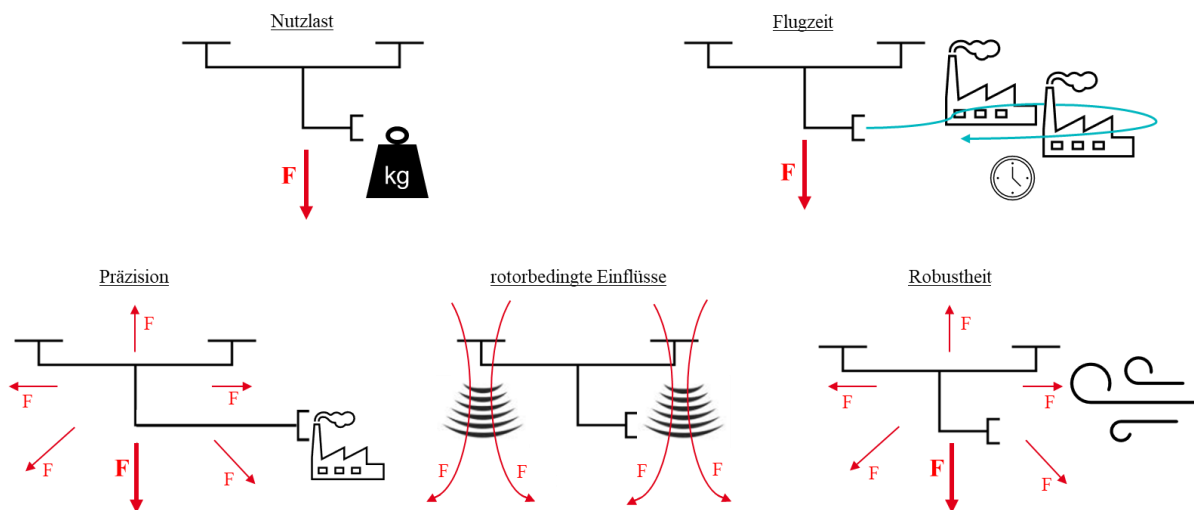


Abbildung 1: Beispielhafte Anforderungen an das UAS während der Probenahme an einem Schornstein, mit aufzubringenden oder erzeugten Kräften.

Es ist leicht zu erkennen, dass diese Hauptanforderungen einen teilweise gegensätzlichen Effekt auf die Systemkonzipierung des Probenahmemoduls haben. Während ein geringes Eigen-gewicht zu einer Verlängerung der maximalen Flugzeit und einer Verringerung der rotorbedingten Einflüsse führt, sinkt dabei die Robustheit des Systems gegenüber atmosphärischen Turbulenzen, wodurch sich die Präzision ebenfalls verringert.

Das sich daraus ergebende Ziel dieser Arbeit für den Entwurf der Probenahmestrategie besteht damit in erster Linie darin, Methoden zu entwickeln, anhand derer der Auslegungsprozess einer In situ-Probenahme unter gegebenen Randbedingungen und Anforderungen gestaltet werden kann. Darüber hinaus wird angestrebt, Aussagen über die Einflussmechanismen einzelner atmosphärischer Parameter auf den Reingasstrom zu treffen, um daraus allgemeine Tendenzen für eine optimale Probenahme ableiten zu können.

Der Hauptteil dieser Doktorarbeit zur Entwicklung eines UAV-basierten Probenahmekonzeptes und einer Messstrategie für Reingasströme von Industrieanlagen lässt sich in vier Kapitel wie folgt unterteilen:

- Theoretische Grundlagen und Ausbreitungseffekte

Neben der Grundlage der Ausbreitungsmodellierung, geschieht hier eine kurze Betrachtung der aerodynamischen Effekte, sowie die Herleitung Propeller induzierte Vermischungseffekte zur Einschätzung ihrer Bedeutung für den späteren Entwurfsprozess der Probenahmeverrichtung.

- Entwicklung des Instrumentes zur Probenahme im Reingasstrom

Ausgehend von den festgelegten Grundlagen werden Ansätze zur Charakterisierung und Bewertung eines Instrumentenaufbaus auf Grundlage der definierten Hauptanforderungen vorgestellt sowie deren Implementierung skizziert und validiert. Des Weiteren wird ein zur Auslegung der Probenahme-Methode entwickeltes Programm vorgestellt, welches es ermöglicht die Probenahme zu überwachen und die erzeugten Messdaten mit beliebigen Manipulatoren zu untersuchen.

- Entwurf und Implementierung des mobilen Probenahmekonzeptes

Um Defizite in der Vergleichbarkeit von Probenahmekonzepten und Messmethoden sowie Defizite der Flächenabdeckung von Messdaten zu reduzieren, werden Empfehlungen zur zielgerichteten Anpassung und Ergänzung gasbezogener Beobachtungen vorgestellt. Rücksicht wird auf die zu betrachtende Standorte, mit den jeweils vorherrschenden Gaszusammensetzungen und prozesstechnischen Bedingungen genommen, da diese Kriterien den Reingasstrom charakterisieren und demzufolge auch bei der Erstellung von Probenahmekonzepten zu berücksichtigen sind.

- Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Analyse von mobilen Messkonzepten

Die entwickelten Methoden werden zur Gewinnung qualitativer und quantitativer Erkenntnisse zum Einfluss verschiedener Parameter auf das mobile Messkonzept angewandt und daraus Folgerungen für eine optimale Probenahme abgeleitet. Dabei können einige grundlegende direkte und indirekte Einflussmechanismen auf die Probenahme und die Transmissionsmessung aufgezeigt werden. Ein Ansatz zur Korrektur des atmosphärischen Einflusses auf die Probenahme wird hergeleitet und dessen Leistungsfähigkeit anhand einiger Feldversuche untersucht.

Das sekundäre Ziel ist es, mit der Erprobung telemetrisch überwachter Mikrosysteme für definierte Luftschadstoffe eine Möglichkeit aufzuzeigen, die Lücke der zwischenzeitlich hoch-, aber räumlich suboptimal aufgelösten Immissionsstrukturdaten des Meßnetzes des IPH zu schließen. Möglich wurde dieses Vorhaben durch den technischen Fortschritt der letzten Jahre, sodass heute in kompakter Bauweise sehr leistungsfähige elektronische Geräte zur Messwerterfassung, -speicherung und -übertragung zur Verfügung stehen.

- Vergleichsmessung der elektrochemischen Sensoren mit den Referenzmethoden

Um die Sensorsysteme als Alternative oder ergänzend zu den Referenzmethoden einzuordnen, wurde die Vergleichbarkeit der Messkonzepte über ein Langzeitmonitoring (1 Jahr) überwacht. Besondere Aufmerksamkeit gilt den verwendeten Messaufbauten. Insbesondere dem unterschiedlichen Ansatz der Verwendung einer vorgeschalteten Luftansaugung mit temperierter Messkammer im Vergleich zu reiner Diffusionsmessung.

Anschließend wird die Arbeit mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation abgeschlossen. Für zukünftige Untersuchungen beinhalten die Schlusskapitel einige Überlegungen im allgemeinen Kontext. Zusätzliche Informationen zu verschiedenen Themengebieten in dieser Arbeit sind im Anhang enthalten.

2 Allgemeine Grundlagen

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in die Grundlagen der Ausbreitungsmodellierung und aerodynamischer Effekte gegeben. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Themen, die notwendig sind, um den Ansatzpunkt dieser Doktorarbeit und die neu gewonnenen Erkenntnisse in das wissenschaftliche Umfeld einordnen zu können.

2.1 Ausbreitungsmodellierung

Im kommenden Abschnitt wird die Modellierung der Ausbreitung eines Gases in der Luft durch passive Verteilung sowie die Freisetzung mit einem geringem Anfangsimpuls (z.B. über einen Schornstein durch freie Konvektion) erläutert.

2.1.1 Einflüsse auf die Ausbreitung von Spurenstoffen

Gefährliche Substanzen, die in die Atmosphäre freigesetzt werden, werden durch die Windbewegung transportiert und dabei durch Verdünnungseffekte abgeschwächt. Der Transport und die Verteilung von Spurenstoffen in der Luft werden hauptsächlich durch advective und diffusive Prozesse beeinflusst, die von den vorherrschenden Wetterbedingungen abhängen. Außerdem können Deposition und Sedimentation eine Konzentrationsänderung verursachen (Zenger 1998). Durch den Einsatz verschiedener analytischer Modelle ist es möglich, den Transport- und Verdünnungsprozess unter verschiedenen Szenarien und Bedingungen vorherzusagen, wodurch die zeitabhängige Konzentration in der Umgebung des Emissionspunktes bestimmt werden kann.

2.1.2 Advektion und Diffusion

Advektion beschreibt den Transport von Spurenstoffbeimengungen in der Atmosphäre, der durch die mittlere Geschwindigkeit und Richtung der Luftströmung bestimmt wird. Innerhalb eines bewegten Luftpaketes mit stabilen Luftvolumen, bleibt die Konzentration der Spurengase unverändert. Damit tritt durch die Advektion allein keine Veränderung der Spurengaskonzentration innerhalb dieses Luftpaketes ein. Die zeitliche Änderung der Konzentration $C = C(x, y, z)$ korreliert daher mit der räumlichen Änderung durch den Transport mit der Geschwindigkeit $\vec{u} = (s \ v \ w)$ (Zenger 1998).

Diese Beziehung lässt sich aus der Advektionsgleichung (1) ableiten:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (sC) + \frac{\partial}{\partial y} (vC) + \frac{\partial}{\partial z} (wC) \right] = - \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}C) \quad (1)$$

Eine Erweiterung der Spurenstoffverteilung erfolgt primär durch Fluktuationen in Geschwindigkeit und Richtung der Strömung (Turbulenzdiffusion). Ein für die Ausbreitungsmodellierung häufig vernachlässigbarer kleiner Anteil der Diffusion resultiert aus der Brownschen Molekularbewegung (molekulare Diffusion). Dabei ist die zeitliche Änderung der Spurenstoff-

konzentration durch die molekulare Diffusionsgleichung (2) nach Zenger bestimmt, welche vom konstanten molekularen Diffusionskoeffizienten D_m abhängt.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2)$$

Geschwindigkeitsfluktuationen der Strömung, bekannt als turbulente Diffusion, üben einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung von Spurenstoffen aus. Turbulenz wird dabei als ein Strömungszustand definiert, der weder zeitlich noch räumlich konstant ist und durch komplexe Verwirbelungen gekennzeichnet wird. Dieser turbulente Lufttransport verläuft zufällig und chaotisch, was zu einer schnellen und effizienten Durchmischung innerhalb eines Luftpakets führt. Der Diffusionskoeffizient K , der die turbulente Diffusion charakterisiert, weist drei Richtungskomponenten auf und kann abhängig vom Ort variieren. Daher ist es notwendig, diesen Koeffizienten in Gleichung (3), der turbulenten Diffusionsgleichung, innerhalb der Ableitung zu berücksichtigen.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3)$$

2.1.3 Gauß-Fahnenmodell

Das Gauß-Fahnenmodell ermöglicht die Simulation der Gasfahnenausbreitung, basierend auf der Diffusionsgleichung. Dabei wird der Diffusionskoeffizient wie in Gleichung (4) als ortsunabhängig betrachtet, was eine Vereinfachung der physikalischen Realität darstellt.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (4)$$

Dieser Ansatz kann auf turbulente Mischungsvorgänge angewendet werden, vorausgesetzt, dass die Diffusionszeiten ausreichend groß sind. Allerdings ist das Modell durch erhebliche Vereinfachungen gekennzeichnet, wodurch seine Anwendbarkeit eingeschränkt ist (Zenger 1998).

Im Rahmen der Untersuchung der Konzentrationsverteilung eines kontinuierlich freigesetzten Stoffstromes wie er z.B. über einen Schornstein durch freie Konvektion auftritt, lässt sich die zeitunabhängige Advektions-Diffusionsgleichung formulieren. Dabei wird ein Spurenstoff mit einer konstanten Freisetzungsrate Q_0 in einem räumlich homogenen Windfeld mit der Windgeschwindigkeit u betrachtet. Unter der Annahme stationärer Bedingungen, führt dies zur Gleichung (5) (Zenger 1998).

$$C(x, y, z) = \frac{Q'}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \quad (5)$$

In diesem Zusammenhang bezeichnet H die effektive Freisetzungshöhe, welche sich aus der Summe der tatsächlichen Schornsteinhöhe und der Schornsteinüberhöhung ergibt. Abgasfahnen, die aus Schornsteinen emittiert werden, unterliegen häufig einem Auftriebsmechanismus. Dieser wird durch die vertikale Geschwindigkeit der Abgase sowie durch deren im

Vergleich zur Umgebungsluft höheren Temperatur verursacht. In dieser Arbeit ist für die diskontinuierliche Probenahme besonders die Verteilung eines Spurenstoffes oder Spurenstoffgemisches direkt am Kaminausgang von Interesse.

2.2 Aerodynamische Effekte

Die Aerodynamik ist ein interdisziplinäres Gebiet, das sich nicht nur mit der Bewegung von Luft um Objekte, sondern auch mit der Vermischung von Luftströmungen in der Atmosphäre befasst. In der Troposphäre treten turbulente Strömungen auf, die eine entscheidende Rolle bei der Vermischung von Luftmassen spielen und somit für die Wettervorhersage und die Luftqualität von großer Bedeutung sind (Zenger 1998). Der Nachweis von Mischungseffekten ist daher von großer Relevanz, um die Ausbreitung von Schadstoffen besser zu verstehen. In diesem Zusammenhang stellt die drohneninduzierte Vermischung eine relativ neue Anwendung der Aerodynamik dar.

2.2.1 Umströmung von Gebäuden

Die Verteilung von Abgasen in der Nähe von Gebäuden wird durch die Strömungsverhältnisse in deren Umfeld beeinflusst, die schon bei einfachen geometrischen Formen eine erhebliche Komplexität zeigen (Janicke u. a. 2017). In Abbildung 2 sind die verschiedenen Strömungsregime am Beispiel eines Quaders dargestellt:

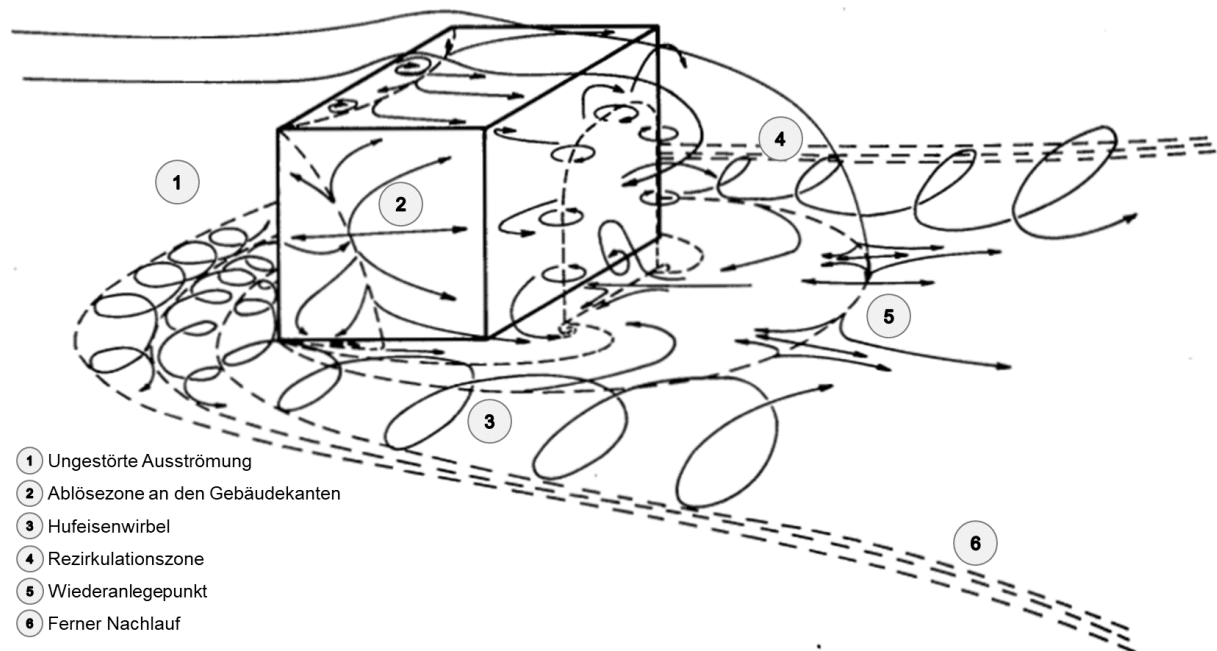


Abbildung 2: Wirbelstrukturen bei der Umströmung eines Quaders mit Wiederanlagerung der freien Scherschicht. (Woo, Peterka, und Cermak 1977)

An der dem Wind zugewandten Seite bildet sich ein Frontwirbelsystem, während bei seitlicher Umströmung nach dem Ablösen der Strömung an den seitlichen Kanten der sogenannte Hufeisenwirbel entsteht. Auf der dem Wind abgewandten Seite entwickelt sich die Rezirkulationszone, die auch als Kavitätszone bezeichnet wird (Janicke u. a. 2017).

Die wesentlichen Strömungsmerkmale für die Ausbreitung in der Nähe von Gebäuden sind in Abbildung 3 anhand eines einfachen quaderförmigen Gebäudes im Querschnitt veranschaulicht. Beim Umströmen und Überströmen des Bauwerks tritt Strömungsablösung an der Luv zugewandten Kanten auf. Während des Überströmens des Körpers bildet sich eine Rezirkulationszone aus, die auch als "naher Nachlauf" bekannt ist und eine charakteristische Rückströmung zum Gebäude hin aufweist. Stromabwärts folgt der "ferne Nachlauf", der durch Strömungslinien, die zum Boden hin abgelenkt werden, erhöhte Turbulenz und reduzierte Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet ist. Aufgrund der Strömungsablösung und der damit verbundenen Sekundärströmung beeinflussen die vertikalen Windprofile eine Abnahme der Windgeschwindigkeit u_0 bis weit in den fernen Nachlauf hinein. Beim Freisetzen von Abgasen in der Umgebung von Gebäuden ist es wichtig sicherzustellen, dass die Abgase außerhalb der Störbereiche des Gebäudes freigesetzt werden (Janicke u. a. 2017).

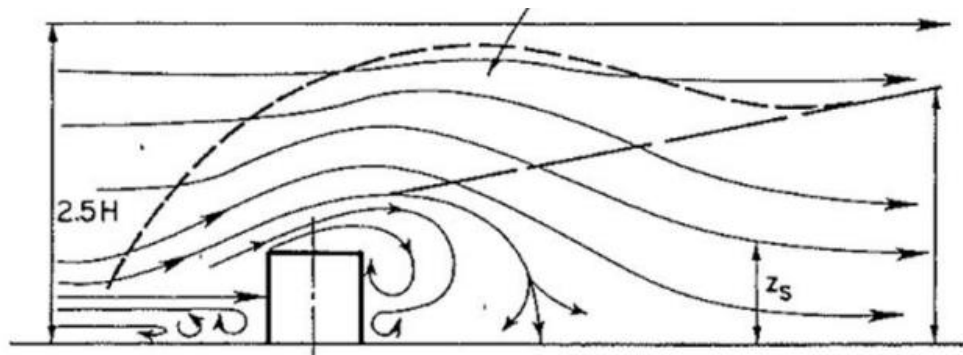


Abbildung 3: Strömungsfeld im Mittelschnitt um ein quaderförmiges Gebäude. (Meroney 1982)

In Abbildung 4 sind die Auswirkungen unterschiedlicher Freisetzungspositionen und -höhen der Abgase auf die Konzentrationsverhältnisse auf der Immissionsseite dargestellt.

Wenn der Freisetzungsort der Abgase deutlich außerhalb des Störbereichs des Gebäudes liegt, wie bei der linken Quelle (1. Fall), kann die Abgasfahne ungehindert abströmen. Bei der etwas niedrigeren Quelle rechts (1. Fall) gelangen die Abgase zwar nicht in die Rezirkulationszone des Bauwerks, jedoch wird die Fahne aufgrund des herrschenden Strömungsregimes nach unten in den fernen Nachlauf umgelenkt. Dabei treten höhere Konzentrationen weit oberhalb des Bodenniveaus auf. Selbst bei einer Freisetzung der Abgase nur leicht über der Rezirkulationszone (2. Fall) kann es aufgrund der entstehenden Scherschicht dennoch zu einer Vermischung der Abgase mit der Rezirkulationszone kommen. Im Beispiel, in dem die Abgase im Bereich der Rezirkulationszone freigesetzt werden (3. Fall), werden die Abgase zur Bodenebene umgeleitet und kehren in Richtung des Gebäudes zurück, wobei sie sehr hohe Konzentrationen nahe dem Boden aufweisen (Janicke u. a. 2017).

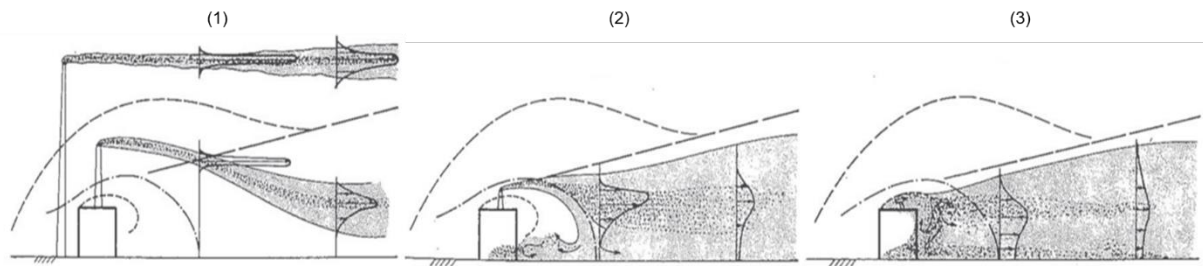


Abbildung 4: Ausbreitung der Abgase bei unterschiedlichen Quellhöhen. (Meroney 1982)

Seit den 1960er Jahren wurden die beschriebenen Strömungs- und Ausbreitungsphänomene intensiv untersucht und durch eine Vielzahl grundlegender Untersuchungen an physikalischen Modellen in Wind- und Wasserkanälen systematisch dokumentiert (Janicke u. a. 2017; Evans 1957; Meroney 1982; Weil 1988; Woo, Peterka, und Cermak 1977).

2.2.2 Strömung an einem Propeller

Eine umfassende aerodynamische Analyse von UAVs ist in dieser Arbeit nicht möglich, daher werden hier die grundlegenden Mechanismen der Drehflügler-Aerodynamik beschrieben, um das Verständnis der Propellerschuberzeugung zu erleichtern. Zusätzlich werden weitere relevante aerodynamische Effekte berücksichtigt. Dies ist wichtig, wenn Drohnen in Bezug auf die Probenahme während des Fluges in Betracht gezogen werden.

Der strömungsmechanische Prozess des Propellers bildet die Grundlage der UAV-Aerodynamik. Für ein allgemeines Verständnis des Wirkmechanismus werden einige vereinfachende Annahmen durch die Jet-Theorie und die Propeller-Theorie getroffen. Ein Propeller wird als flache Scheibe mit Radius R und Fläche A modelliert, die vollständig von Luft durchströmt wird. Luft wird als inkompressibel mit der Dichte ρ und die Strömung als reibungsfrei und laminar angenommen (Kuhlmann 2007). Abbildung 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Umströmung des Propellers.

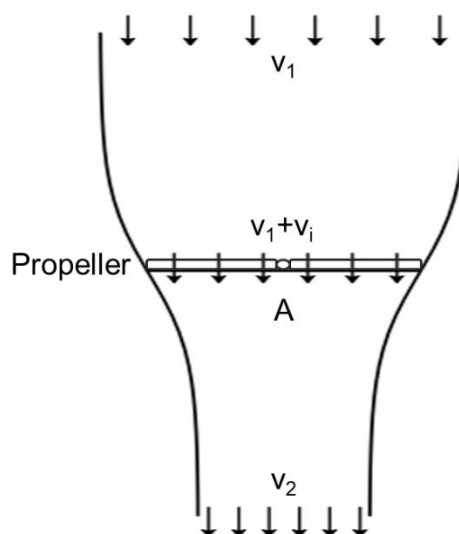


Abbildung 5: Schematische Darstellung propellererzeugter Strömung. Mittig ist ein Propeller dargestellt. Die Begrenzungslinien und Pfeile deuten Stromlinien der propellerinduzierten Strömung an.

Die Wirkung des Propellers besteht darin, den Luftstrom zusammenzuziehen und die Luftgeschwindigkeit entlang der Propellerachse kontinuierlich zu erhöhen. Die Luftgeschwindigkeit in der Ebene des Propellers sei gleich dem Mittelwert der Geschwindigkeit v_1 weit vor dem Rotor und der Geschwindigkeit v_2 weit hinter dem Rotor. Die vom Propeller verursachte Geschwindigkeit v_i entspricht der Differenz zwischen der Geschwindigkeit in der Ebene des Propellers und der Geschwindigkeit weit vor dem Propeller. Der vom Propeller erzeugte Schub u lässt sich nach (Kuhlmann 2007) berechnen als

$$u = \frac{p \cdot A}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (6)$$

bzw. mit der induzierten Geschwindigkeit $v_i = \frac{(v_1+v_2)}{2} - v_1$ als

$$u = p \cdot A \cdot 2v_i(v_1 - v_i) \quad (7)$$

Die Geschwindigkeit v_1 entspricht der Relativgeschwindigkeit zwischen Drohne und Umgebungsluft. Betrachtet man diese stationär, entspricht v_1 der Steigrate der Drohne.

Die Drohnenbewegung induziert asymmetrische Strömungen in den einzelnen Blättern des Rotors. Die Rotorblätter erfahren in dem Moment ihrer eigenen Bewegung, auf die die Drohne gerichtet ist, stärkere Strömungen, als wenn sie sich gegen die Bewegungsrichtung der Drohne bewegen, wodurch im ersteren Fall mehr Schub erzeugt wird. Das Ergebnis ist eine Kraftkomponente entgegen der Bewegungsrichtung der Drohne und eine Kraftkomponente senkrecht dazu. Diese Kräfte sind generell schwer quantitativ zu formulieren, da sie unter anderem von der mechanischen Nachgiebigkeit der Rotorblätter abhängen. Qualitativ können wir jedoch sehen, dass es proportional zum erzeugten Schub u und der Geschwindigkeit v der Drohne ist (Bangura 2017).

Wenn ein Rotorflugzeug in geringer Höhe schwebt, nehmen die vom Rotor erzeugten Wirbel und induzierten Geschwindigkeiten ab. Beide bieten bei gleicher Antriebskraft einen höheren Schub. Dieser Effekt ist als Bodeneffekt bekannt (Johnson 2013). Analytisch lässt sich die relative Schubänderung näherungsweise als Quotient aus dem bodennahen Schub u_{ground} und dem Null-Bodeneffektschub u_{free} für einen einzelnen Rotor in einer Höhe z über dem Boden ausdrücken:

$$\frac{u_{ground}}{u_{free}} \approx \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{4z}\right)^2} \quad (8)$$

Der Verlauf von u_{ground}/u_{free} nach Gleichung (8) ist in Abbildung 6 dargestellt. Ab einer Flughöhe von $z = 2R$ ist die Auswirkung aufgrund des kleinen Rotorsdurchmessers im Vergleich zur minimalen Flughöhe gering. Sanchez-Cuevas, Heredia, und Ollero 2017 führten einen Versuch mit einer Drohne durch, die mit vier Quadrotoren ausgestattet war. Dort wurden Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt, um die Strömungsverhältnisse zwischen Drohne und Boden zu berechnen und zu visualisieren. Das Ergebnis wies auf einen deutlich größeren Einfluss des Bodens hin, als es die Theorie für einen einzelnen Rotor erwarten lässt.

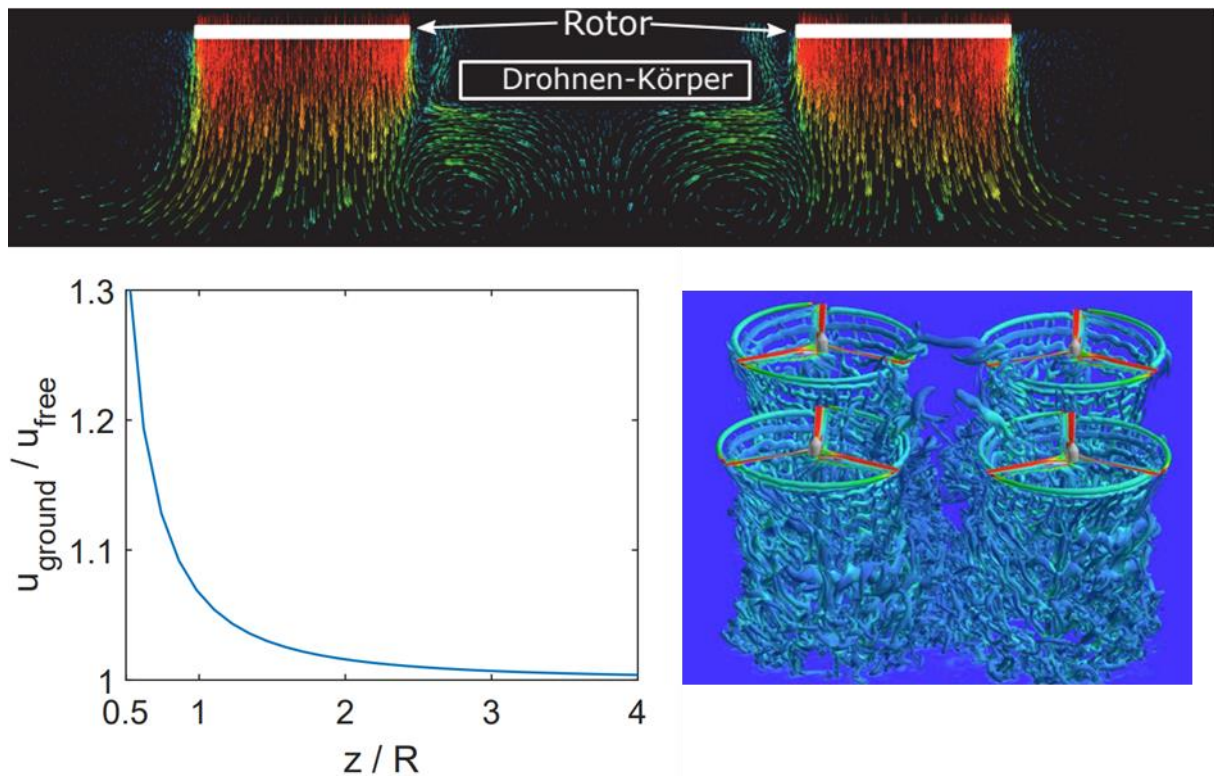


Abbildung 6: Strömungsvisualisierung einer Drohne mit Bodeneffekt (der untere Bildrand entspricht dem Boden) durch CFD-Simulation (oben) (Sanchez-Cuevas, Heredia, und Ollero 2017) (m. Anm. d. Verfassers). Darstellung der Schubkraftänderung eines Rotors u_{ground} in Abhängigkeit des normierten Abstands vom Boden z/R im Verhältnis zur Schubkraft eines Rotors u_{free} ohne Bodeneffekt (unten links). Visualisierung der bei einer Anordnung von vier Rotoren erzeugten Wirbel in einer CFD-Simulation (unten rechts) (Yoon, Lee, und Pulliam 2016).

Ein weiterer Effekt, der bei UAV mit mehreren Rotoren auftritt, sind Abwind und Turbulenzen, die dazu führen, dass die Rotoren die aerodynamische Effizienz des anderen beeinflussen und den erzeugten Schub verringern. Yoon u. a. führte 2016 Quadcopter-CFD-Simulationen durch, um diese Effekte zu quantifizieren (Abbildung 6).

Um die Auswirkungen der durch UAV verursachten vertikalen Strömung zu quantifizieren, wurden von Lampert u. a. numerische Simulationen durchgeführt (Abbildung 7). Die Simulationen waren instationär und verwendeten einen RANS-Ansatz (Reynolds-gemittelter Navier-Stokes-Ansatz) mit dem SST-Turbulenzmodell (Menter 1994). Die Simulationen wurden für den Schwebeflug mit einer Propellerdrehzahl von 3167 min^{-1} , für den vertikalen Steigflug mit einer Geschwindigkeit von $6,5 \text{ m/s}$ bei einer Drehgeschwindigkeit von 3913 min^{-1} und für den

vertikalen Sinkflug mit einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s bei einer Drehgeschwindigkeit von 2880 min^{-1} durchgeführt. Es wurde eine Umgebungstemperatur von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein Druck von 1023 hPa angenommen. Die Konturen der vertikalen Relativgeschwindigkeit zeigen einen Kernbereich mit positiver Relativgeschwindigkeit direkt unterhalb der Schaufelmitte und eine negative Relativgeschwindigkeit bis zu 19 m/s unterhalb der Schaufel in einem Abstand von mehr als $0,75 \text{ m}$ (Abbildung 7). Zusätzlich sind Zonen der Rezirkulation um die Propellerspitzen herum zu erkennen, insbesondere im Sinkflug.

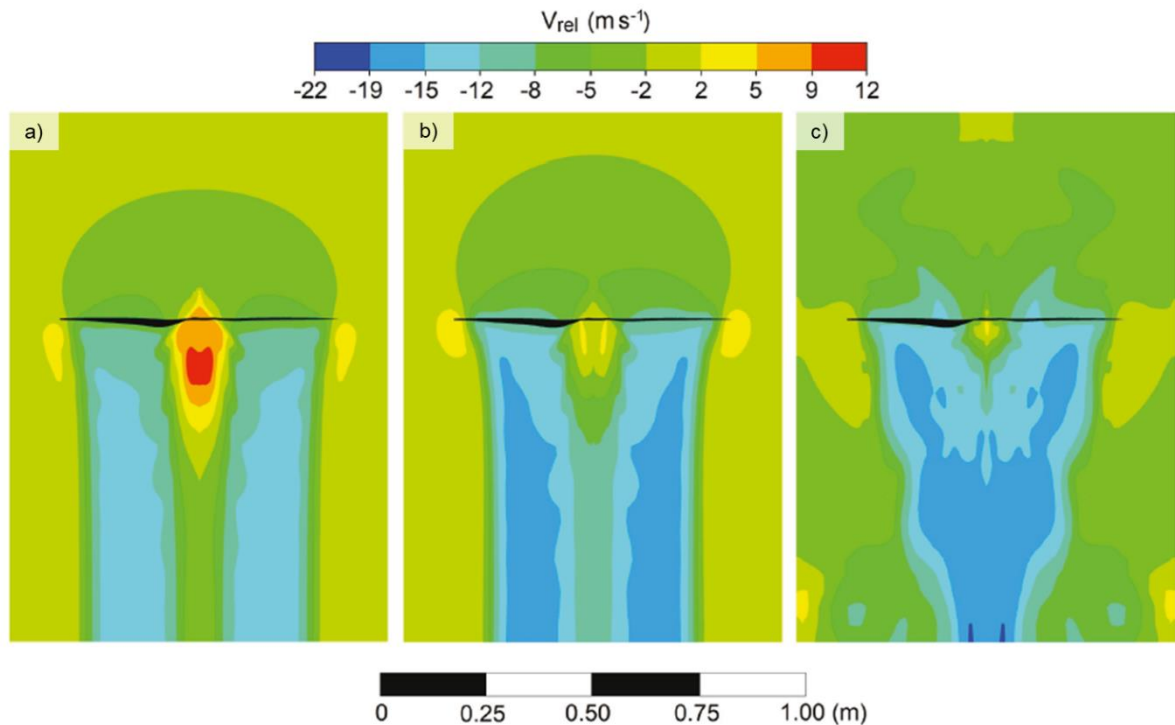


Abbildung 7: Beispiel für die Umströmung eines Rotorblattes. a) zeigt das UAV im Schwebeflug, b) zeigt das UAV beim Aufsteigen und c) zeigt das UAV beim Absinken (Lampert u. a. 2020).

Grundlage der aerodynamischen Modellierung der drohneninduzierten Einflüsse auf die Probenahme in dieser Arbeit sollen ausschließlich die in Kapitel 2.2.2 hergeleiteten Zusammenhänge sein. Aerodynamische Effekte, die abhängig von der Fluggeschwindigkeit sind, werden nicht betrachtet, da ausschließlich durch die Drohne erzeugte Strömungen im Schwebeflug für die Einsatzthematik von Bedeutung sind. Statische Effekte wie der Bodeneffekt und die Interferenz zwischen Rotoren werden ebenfalls nicht weiter beachtet, da sie nur in spezifischen Flugsituationen auftreten. Dies kann Bestandteil zukünftiger Arbeiten sein.

3 Beschreibung der Instrumente und Hilfsmittel

Im folgenden Kapitel wird, dass entwickelte Online In-situ Probenahme-Modul der Infraser GmbH & CO. Höchst KG vorgestellt. Die Entwicklung der verwendeten Messtechnik und ihrer Validierung ist anhand eines Zeitstrahles in Abbildung 8 dargestellt.

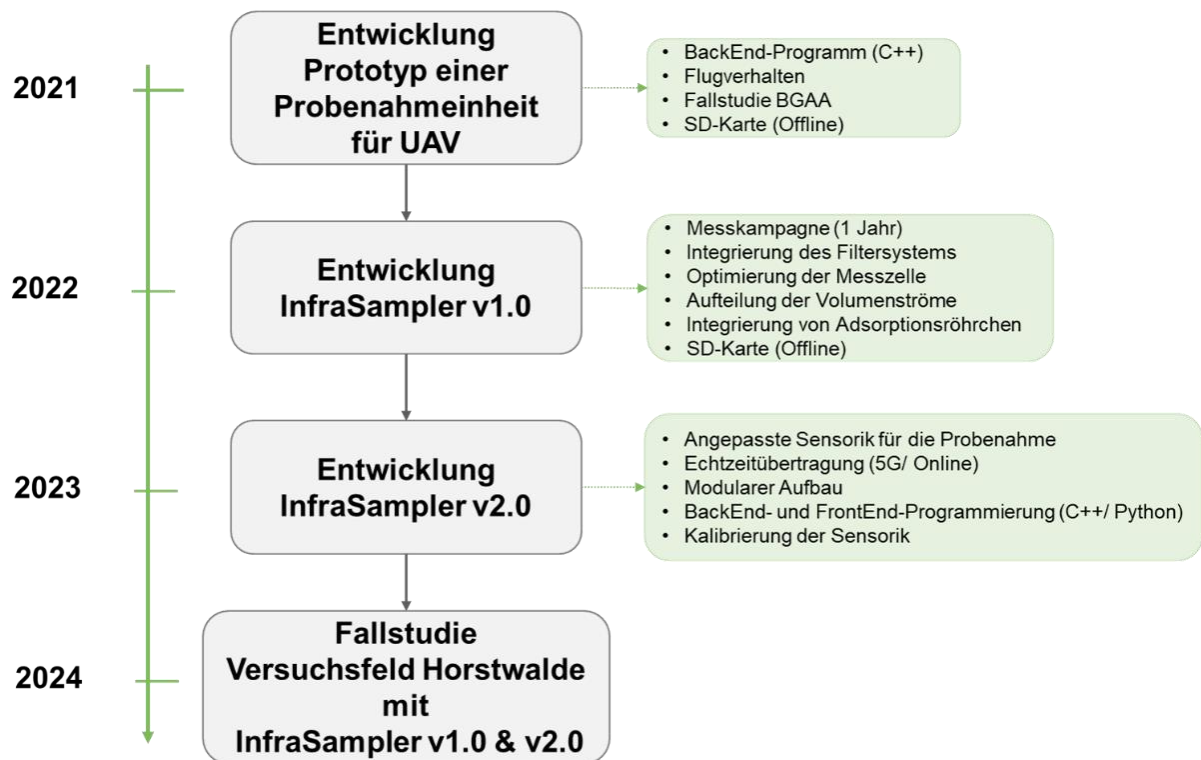


Abbildung 8: Zeitstrahl der Entwicklung aller Messapplikationen während der Forschungsarbeit.

Mobile Messeinrichtungen bieten im Gegensatz zu stationären Messeinrichtungen eine hohe zeitliche und räumliche Flexibilität der Messanwendung. Sie erlauben schnelle Standortwechsel für stationäre Messungen und Probenahmen und ermöglichen zusätzlich mobile Messungen während des Fluges. Ausgestattet mit modernen Messinstrumenten mit hoher Messfrequenz, können kleinskalige und fluktuierende Phänomene erfasst werden. Hinzu kommt der notwendige robuste Aufbau, um auch in Reingasströmen von Industrieanlagen Messungen zu ermöglichen. Die Infraser GmbH & Co. Höchst KG im Industriepark Höchst setzte 2021 zum ersten Mal das neu entwickelte mobile In-situ Probenahme-Modul „InfraSampler v1.0“ ein, welches seitdem bedingt durch die gestellten Anforderungen kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Der Prototyp des InfraSampler ist in Kapitel 5.1 beschrieben.

Alle technischen Zeichnungen, Schaltbilder und Programm-Codes des InfraSampler-Systems (v1.0 bis v2.0), sind im Anhang hinterlegt (Kapitel 9).

3.1 Aufbau und Ausstattung

Als Basis des InfraSampler diente eine Drohne. In den erfolgten Anwendungen wurde die DJI Matrice 200 V2 (Länge: 883 mm, Breite: 886 mm, Höhe 398 mm) mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 4,69 kg verwendet. Das Design des In-Situ Probenahme-Modul orientierte sich an den technischen Vorgaben des UAV. Diese Vorgaben umfasste die Größe, die Positionen der Infrarot- und Ultraschallsensoren des UAV, sowie die maximal mögliche Nutzlast von 1,45 kg. Das UAS kann von einem oder mehreren Fernpiloten gesteuert werden. Diese Möglichkeit ergibt sich aus den „Master“ und „Slave“ Einstellungen der Fernsteuerung. Um Vibrationen auf die Messsysteme während des Fluges zu reduzieren, sind die einzelnen Instrumente mit einer Stoßdämpfung montiert. Das UAV ist mit vier DJI 3515 Antriebsmotoren ausgestattet, welche durchschnittlich 166,5 W Leistung erbringen. Mit Hilfe des UAV können im IPH Messungen bis zu einer Höhe von ca. 183 m stattfinden. Technisch sind Messungen auch in Höhen von bis zu 3000 m NHN möglich, allerdings ist die Höhengrenze am Standort auf 50 m behördlich reguliert (Kontrollzone FRA, EDDF).

Der InfraSampler wurde derart konstruiert, dass er den hohen Ansprüchen reproduzierbarer und belastbarer Messwerte gerecht wird. Hierzu zählt zum Beispiel der Einbau chemisch inerter Bauteile, einem leistungsstarken Pumpsystem in Kombination mit einer thermischen Überwachung und Isolierung des Probenahme-Moduls gegenüber industriellen Emissionen. Das UAV ist mit Rundumkennleuchte, sowie Warnleuchten ausgestattet. Zusätzlich befinden sich an den allen Seiten des UAS Sensoren, um etwaige Hindernisse zu erkennen. Dem Fernpiloten ist es durchgängig möglich auf die eingebaute Kamera des UAV zuzugreifen. Des Weiteren verfügt der InfraSampler über eine 1,7 m lange Probenahmelanze, um einen Lufteinzug außerhalb der Rotoreinwirkung zu gewährleisten. Es werden drei voneinander getrennte leistungsstarke Akkusystem verwendet. Durch den elektrischen Betrieb des UAS, muss kein Abgassystem berücksichtigt werden, welches Einfluss auf die Messung nehmen könnte. Bei einer weiterführenden Entwicklung besteht die Möglichkeit das Probenahme-Modul direkt an die Stromversorgung des UAV anzuschließen. Der erste Prototyp (InfraSampler v1.0) und der weiterentwickelte InfraSampler v2.0 sind in Abbildung 9 a und b zu sehen.

Die Stromversorgung des InfraSampler ist so ausgelegt, dass die Instrumente unter verschiedenen Betriebsbedingungen kontinuierlich mit Strom versorgt werden, ohne anfällig für Fehlbedienungen durch den Nutzer zu sein. Zu diesem Zweck werden für die UAV und den Mikrocontroller (MCU) des InfraSampler ein intelligentes Strommanagement eingesetzt. Das gesamte System umfasst bis zu drei voneinander getrennten Stromquellen (Abbildung 10), sodass die UAV, der Mikrocontroller und die Instrumente in unabhängigen Stromkreisläufen arbeiten.



Abbildung 9: a) Der erste Aufbau des InfraSampler v1.0 b) InfraSampler v1.0 mit Integrierung des Filtersystems, angepasstem Gehäuse und Überarbeitung der Elektronik. c) InfraSampler v2.0 mit optimierter Sensorik für die Probenahme und Echtzeitmessdatenübertragung.

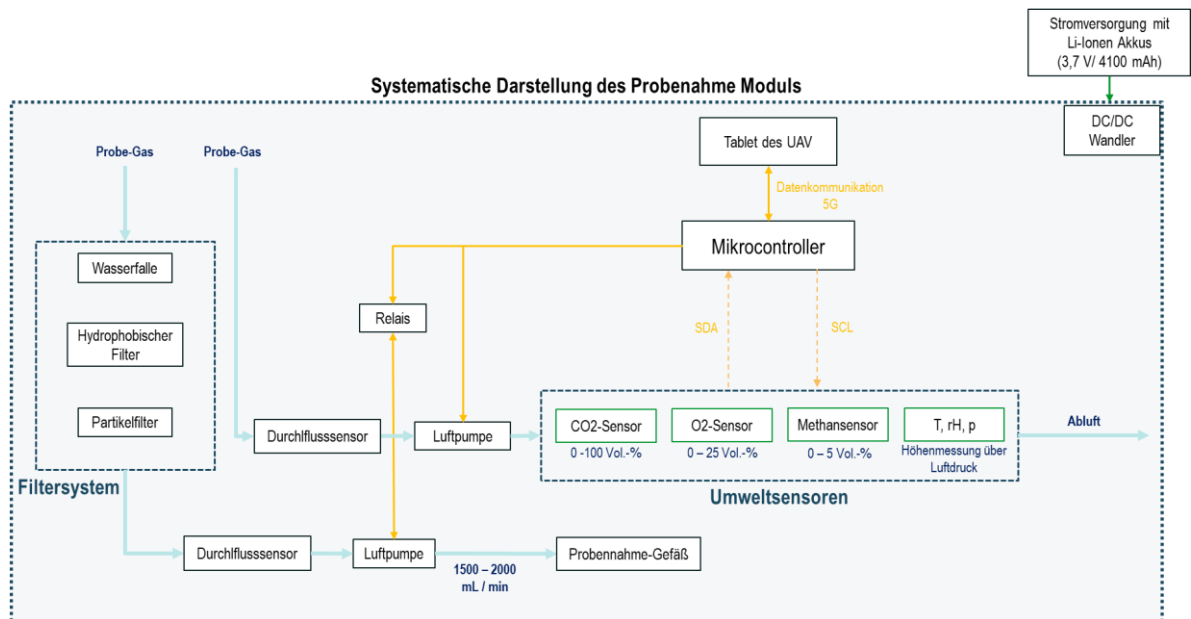


Abbildung 10: Systematische Darstellung des InfraSampler v2.0. Angegeben sind die seriellen Verbindungen, sowie die Stromversorgung der einzelnen Komponenten.

Die von den Instrumenten erzeugte Wärme, wird hauptsächlich vom MCU und dem 2/3-Wege-Ventil emittiert. Um eine Überhitzung des Systems zu vermeiden, wird die drohenerzeugte Luftströmung zur Abkühlung verwendet, indem diese durch Belüftungsschlitze in der Modulaußenhülle geleitet wird. Zusätzlich sind die wärmeemittierenden Bestandteile physisch von den Sensoren und Gaskanälen getrennt.

Das Gehäuse und alle Halterungen bestehen aus PA12. Da sich das Material durch das Multi-Jet-Fusion-Drucken (MJF) mit einer sehr geringen Porosität auszeichnet, erlangt es eine Wärmebeständigkeit bis zu 175 °C. Das Material weist eine hohe Resistenz gegenüber Chemikalien auf und gilt als Nichtleiter. Dadurch wird ein elektrischer Fluss des Messmoduls auf das UAV-System verhindert. Die technischen Zeichnungen des Gehäuses kann in der Anlage 9.2 eingesehen werden.

Ein umfangreiches Notfall- und Sicherheitszubehör unter anderem bestehend aus einem Feuerlöscher, persönlicher Schutzausrüstung (PSA) und Warnkegeln gehört ebenfalls zur Ausrüstung. Während dem Probenahmeeeinsatz hat der Fernpilot über die Fernbedienung des UAV und weitere Beteiligte online die Möglichkeit, aktuelle Messwerte mit Hilfe einer übersichtlichen Anzeigeoberfläche zu verfolgen. So ist ein direktes Anpassen der Messstrategie an die Umgebungsbedingungen gewährleistet, wie auch ein rasches Eingreifen bei technischen Problemen (siehe Kaptiel 4).

3.1.1 Lufteinlasssystem

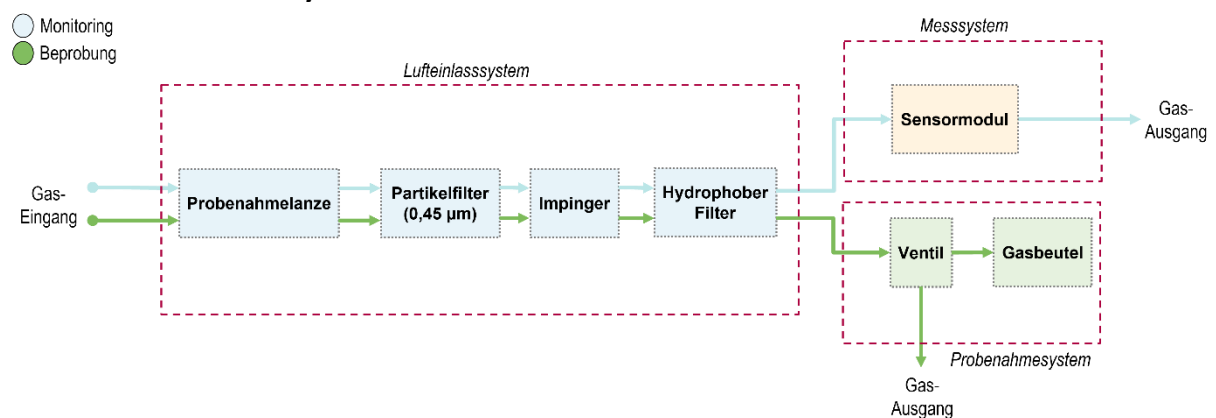


Abbildung 11: Schematische Übersicht des Gasweges durch das Modul.

Während der Entwicklungsphase des InfraSamplers v2.0 wurde besonders die Gestaltung des Lufteinlass- und -transportsystems berücksichtigt, um die bestmöglichen Ergebnisse der Spurengasmessung und Probenahme mit den bekannten Umgebungseinflüssen für die verschiedenen Betriebsarten des Probenahmemoduls zu gewährleisten. Ziel war es, zwei voneinander getrennte Transportsysteme zur Transmissionsmessung und Entnahme des Reingases aus dem Schornstein zu entwickeln, welches sowohl für stationäre als auch für mobile Messungen geeignet ist (siehe Abbildung 11).

Sobald das Reingas eingesaugt wird läuft es durch PTFE-Schläuche (1,8 m) in die Impinger. Anschließend werden die Reingasströme direkt über das 3/2-Wege-Magnetventil in den Probenahmebeutel, oder das Adsorbtröhrchen, oder über die Messzelle geleitet. Die gesamte Schlauchlänge umfasst 2,5 m. Die Gasströme werden mit einem thermischen Massendurchflussmesser (Modell FS1012-1100-NG, Renesas Electronics America Inc) auf 0,8 L/min überwacht und mit einer Diaphragma-Pumpe (D3K Series, TCS Micropumps) gesteuert (Abbildung 12). Die Mikropumpe gewährleistet eine hohe Effizienz bei geringer Größe (36 x 23 x 43 mm) und geringem Gewicht (45 g). Die solide Bauweise und hohe Temperaturtoleranz (0 – 60 °C) sichern zuverlässige Leistung, selbst in schwierigen Umgebungen wie industriellen Emissionen. Um einen maximalen Durchfluss von ca. 3 L/min zu erzielen, erfolgt die parallele Schaltung der Pumpenköpfe. Für maximalen Druck von ca. 0,65 bar ist eine serielle Schaltung der Pumpenköpfe erforderlich. Der erforderliche Volumenstrom von 0,8 L/min orientiert sich an den Volumenströmen der Referenzmethoden für die unterschiedlichen Parameter, welche zwischen 0,5 und 1,2 L/min liegen.

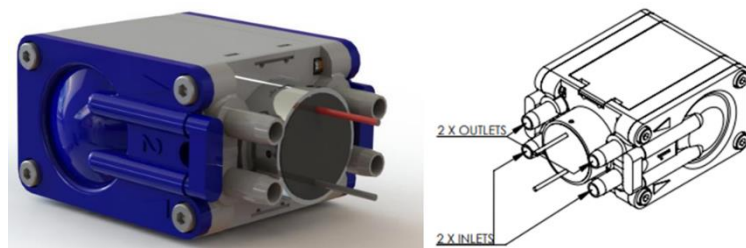


Abbildung 12: D3K Mikromembranpumpe von TCS Micropumps. (TCS Micropumps, 2023)

In Abbildung 13 ist der InfraSampler v1.0 mit der 1,7 m Probenahmelanze während einer stationären Probenahme an einem industriellen Kamin zu sehen.

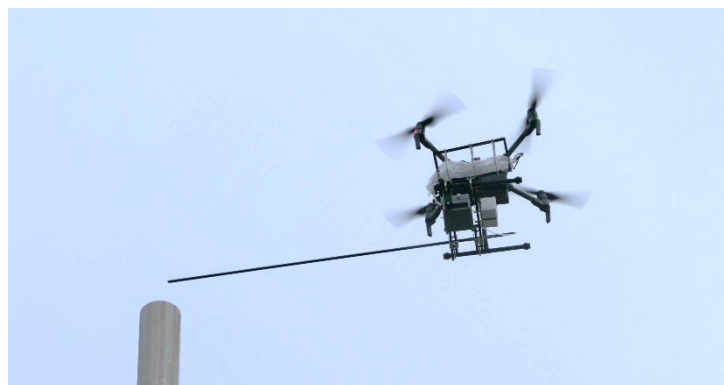


Abbildung 13: Probenahme am Kamin einer Biogasaufbereitungsanlage.

3.1.1.1 Probenahmenlanze

Der erste Schritt war die Ermittlung, ab wann die rotorinduzierten Turbulenzen nicht mehr von den natürlichen atmosphärischen Turbulenzen zu unterscheiden sind. Dabei wurde ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung des Volumens des Probenluftursprungs bei stationären UAV-Messungen verwendet. Diese Methode ist nicht genau, liefert jedoch Schätzwerte,

welche ausreichen, um zu beurteilen, ob das Ansaugen von Luftmassen in das System bei einer bestimmten Messanwendung von den Rotoren beeinflusst wird.

Um das UAS in konstanter Höhe zu halten, müssen die Rotoren eine bestimmte Luftmasse V auf eine Abwärtsgeschwindigkeit v beschleunigen, um eine Aufwärtskraft F_{up} zu erhalten, die die Gravitationskraft F_g kompensiert.

Aus der Impulserhaltung folgt:

$$F_g = F_{up}$$

$$m \cdot g = p \cdot A \cdot v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{m \cdot g}{p \cdot A}}$$
(9)

p = Dichte der Umgebungsluft

g = Erdbeschleunigung

A = Gesamtrotorfläche des UAV

m = Gesamtmasse des UAV

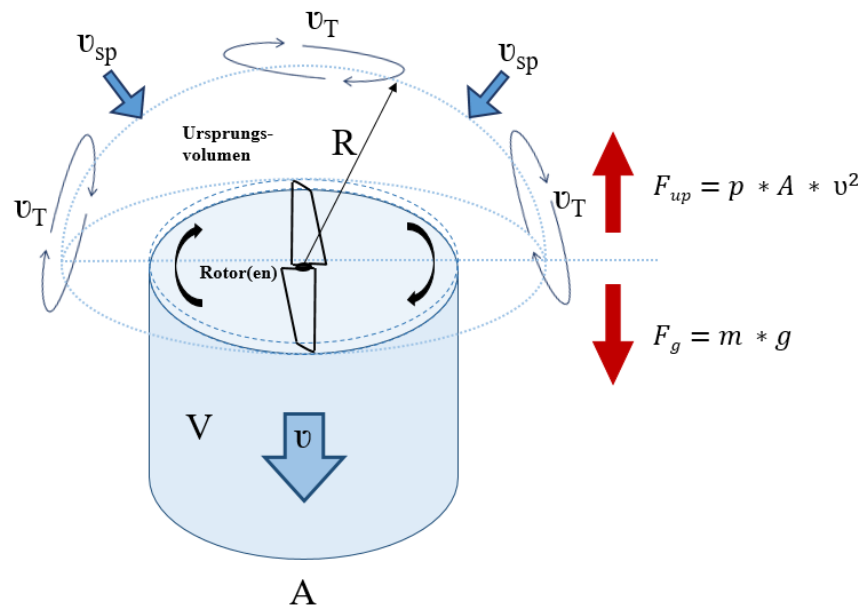


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Luftzirkulation durch einen Rotor.

Weiterhin wird angenommen, dass die notwendige Luftmasse von den Rotoren isotrop vom oberen Halbraum angezogen wird. Dafür wird wie in Abbildung 14 eine Halbkugel mit Radius R und der Oberfläche A_{sp} über dem UAV vor. Die Oberfläche A_{sp} wird wie folgt berechnet:

$$A_{sp} = 2 \cdot \pi \cdot R^2$$
(10)

Aufgrund der Massenerhaltung muss die Luftgeschwindigkeit v_{sp} auf der Kugeloberfläche berechnet werden:

$$v_{sp} = \frac{A}{A_{sp}} \cdot v \quad (11)$$

Zusätzlich wurde die Geschwindigkeit der atmosphärischen Luftturbulenzen als v_T definiert, die auf ein Zehntel der tatsächlichen Windgeschwindigkeit geschätzt werden kann (Rüdiger u. a. 2018; Stull 1988). Darauf aufbauend kann R_{krit} für den Fall $v_{sp} = v_T$ berechnet werden. Das entspricht der Entfernung, in der natürliche atmosphärische Luftbewegungen und Saugströmung durch den Rotor nicht mehr voneinander unterschieden werden können. Daraus folgt:

$$R_{krit} = \sqrt{\frac{5 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot A}{p}}}{\pi \cdot v_w}} \quad (12)$$

v_w = mittlere Windgeschwindigkeit

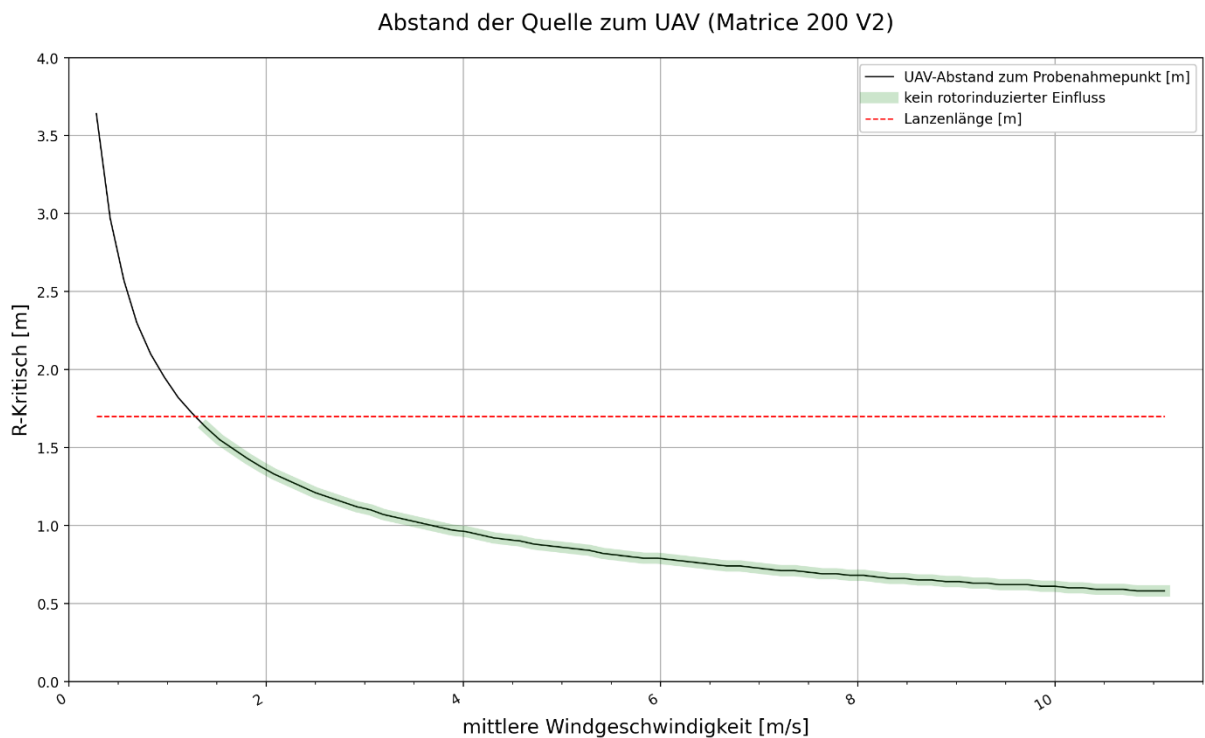


Abbildung 15: R_{krit} bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten, bezogen auf die Matrice 200 V2 dargestellt.

In Abbildung 15 ist R_{krit} für unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten, bei denen das UAS einsatzfähig ist, dargestellt. Mit der gewählten Probenahmelanze von 1,7 m Länge können ab Windstärken v_w von 1,52 m/s (= 5,5 km/h) die rotorinduzierten Einflüsse auf die

Probenahme vernachlässigt werden, da diese nicht mehr von den natürlichen atmosphärischen Turbulenzen unterscheidbar sind.

Als Probenahmelanze wurde ein Carbonrohr eingesetzt, durch welches die beiden Gaswege führen. Am Gas-Eingang kann ein nach unten gebogenem Aufsatz auf die Lanze gesetzt werden. Durch den abgewinkelten Lufteinzeug wird sichergestellt, dass der Reingasstrom aus dem Schornstein angesaugt wird und nicht horizontal (siehe Abbildung 16). Die PTFE-Schläuche enden anschließend in den Partikelfiltern und lenken den Reingasstrom in das Kondensations-System mit Impingern und hydrophoben Filtern.

Wichtig ist den Schwerpunkt des UAV nicht zu verlagern, da dadurch direkt der Nickwinkel beeinflusst wird. Mit einer Verlängerung des Lufteinzuges, um eine Probenahme tiefer im Kamin durchzuführen, muss die Probenahmelanze verkürzt werden. Eine weitere Möglichkeit, um eine Verkürzung zu vermeiden ist ein Gegengewicht anzubringen. Damit darf die Gesamt-nutzlast des UAV nicht überschritten werden.

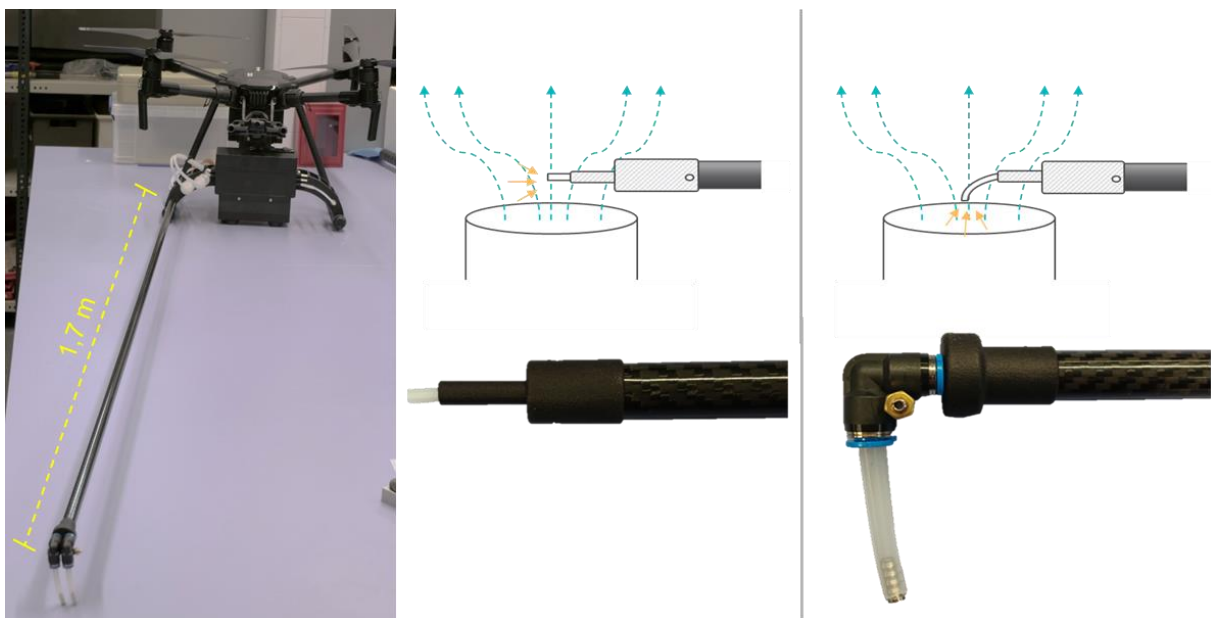


Abbildung 16: InfraSampler v1.0 mit arretierter 1,7 m langer Probenahmelanze und zwei PTFE-Schläuchen ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) (links). Mittig ist eine schematische Darstellung mit Foto des horizontalen Lufteinzuges zu sehen. Rechts ist der abgewinkelte Lufteinzug dargestellt.

3.1.1.2 Kondensatfalle

Ein entscheidender Schritt bei der Analyse von Reingas sind die effektive Probenahme und Konditionierung, um genaue und verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang spielt die Kondensatfalle eine zentrale Rolle, um die im Gas enthaltene Feuchtigkeit effizient zu kondensieren und zu entfernen. Die meisten Schornsteinemissionen enthalten anteilig eine große Menge an Wasserdampf, welcher zu einer Kondensation in der Probe führen kann. Die Kondensatfalle fungiert als unverzichtbares Instrument, um die Probenahme vor Verunreinigungen zu schützen und die Integrität der Analyse zu gewährleisten.

Die Kondensation von Wasser während der Probenahme aus einem Reingasstrom ist ein komplexes Phänomen, das erhebliche Auswirkungen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Analysen in der Gasphasenchemie hat. Bei der Probenahme von Gasen, insbesondere aus heißeren Quellen, kann die Kondensation von Wasserdampf zu erheblichen Verfälschungen der tatsächlichen gasförmigen Zusammensetzung führen. Eine gründliche Untersuchung der kondensationsinduzierten Effekte erfordert die Anwendung thermodynamischer Modelle wie dem Mollier-h-x-Diagramm, das eine umfassende Darstellung der feucht-luftspezifischen Zustandsgrößen bietet. Unter Berücksichtigung der spezifischen Druck- und Temperaturbedingungen des Reingasstroms ermöglicht das Mollier-h-x-Diagramm die detaillierte Analyse von Zustandsänderungen während des Kondensationsprozesses (Kapitel 4.3.2).

Während des Probenahmeprozesses von feuchtem Reingas tritt Wasserdampf häufig in Kombination mit anderen flüchtigen Verbindungen auf. Die Kondensatfalle ermöglicht die selektive Kondensation dieser Verbindungen, einschließlich Wasserdampf und leichter flüchtiger Komponenten, die in das Kondensat übergehen. Durch die Abtrennung von Feuchtigkeit und anderen flüchtigen Verbindungen kann das Reingas für eine präzise und zuverlässige Analyse vorbereitet werden, indem Komponenten, welche die Ergebnisse verfälschen könnten, entfernt werden. Das Kondensat, das in der Falle gesammelt wird, kann eine Vielzahl von Stoffen enthalten, die wichtige Informationen über die Zusammensetzung des Reingases liefern. Neben Wasser können darin auch verschiedene flüchtige organische Verbindungen und Partikel enthalten sein, die für die Charakterisierung der Gaszusammensetzung von Interesse sind. Die Untersuchung des Kondensats kann somit Einblicke in die chemische Zusammensetzung des Ausgangsgases ermöglichen und wichtige Daten liefern, um potenzielle Verunreinigungen oder andere bedeutsame Elemente zu identifizieren, die bei der Analyse berücksichtigt werden müssen.

Die Kondensatfalle wird zwischen der Probenahmelanze und der Messkammer installiert. Es handelt sich dabei um einen zylinderförmigen Behälter, der einen Teil der Restfeuchte im Abgas abscheidet und das Kondensat sammelt.

Bei den beiden Versionen des InfraSamplers wurden zwei unterschiedliche Aufbauten für die Kondensationseinheit verwendet. Beim InfraSampler v1.0 (Abbildung 17 a) ist eine horizontale Wasserfalle eingesetzt. Diese bietet die Möglichkeit einen Schutzfilter einzusetzen, welcher gezielt nicht gewollte Verbindungen abtrennt.

Für den InfraSampler v2.0 werden zwei Impinger verwendet (Abbildung 17 b). Sie werden horizontal an das Gerät angeschlossen, sodass sie mit unterschiedlichen Füllmaterialien befüllt werden können. Das Füllmaterial im Impinger spielt eine wichtige Rolle bei der Absorption von Substanzen. Je nach der Art der zu entfernende Verbindung wird das Füllmaterial sorgfältig ausgewählt, um eine hohe Absorptionskapazität und -effizienz zu gewährleisten. Häufig verwendete Füllmaterialien sind beispielsweise aktivierte Kohle, Silicagel und Zeolithe.

Aktivierte Kohle wird beispielsweise verwendet, um organische Verbindungen aus der Luft zu absorbieren, während Silicagel und Zeolithe hauptsächlich zur Entfernung von Feuchtigkeit und Wasserdampf eingesetzt werden. Es ist wichtig zu beachten, dass das Füllmaterial im Impinger ausreichend sein muss, um die gewünschte Substanz effektiv zu absorbieren. Die Kapazität des Füllmaterials kann durch die Größe des Impingers und die Geschwindigkeit des

Gasstroms reguliert werden. Eine zu hohe Gasgeschwindigkeit kann die Absorptionsrate des Füllmaterials verringern und somit die Effektivität des Impingers beeinträchtigen.

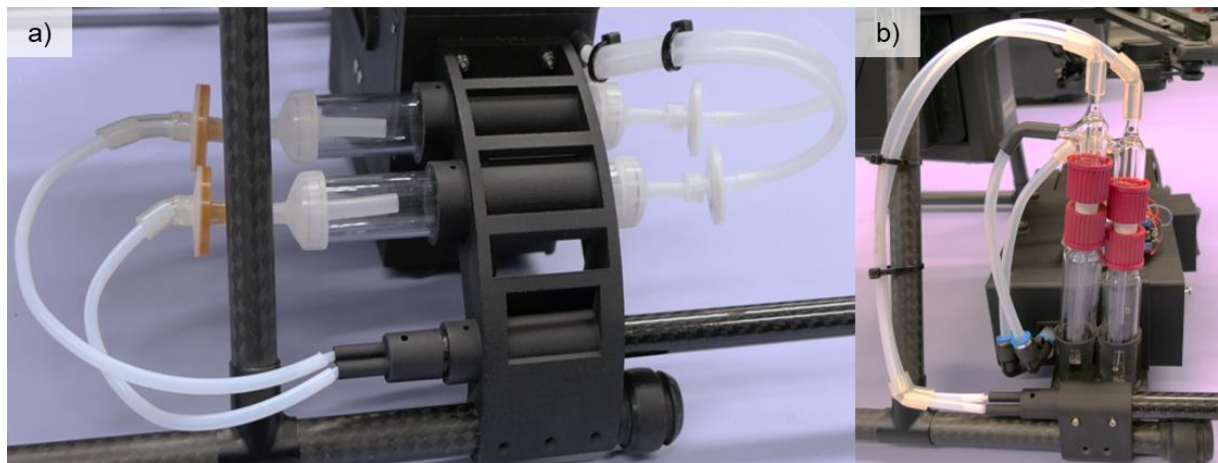


Abbildung 17: Dargestellt ist a) das Filter- und Kondensationssystem des InfraSampler v1.0. Von links nach rechts sind die Partikelfilter (0,45 µm), die Wasserfalle und die hydrophoben Filter (0,22 µm) zu sehen, b) sind die installierten Impinger des InfraSampler v2.0 dargestellt, an welche ebenfalls noch Filter angeschlossen werden können.

3.1.2 Sensorauswahl

Der InfraSampler ist mit modernen, zeitlich hochauflösenden Instrumenten zur Messung von atmosphärischen Spurengasen ausgestattet. In Tabelle 1 sind alle Geräte inklusive der relevanten Messparameter und dem grundlegenden Messprinzip aufgelistet, welche während dieser Doktorarbeit im InfraSampler zum Einsatz kamen. Abhängig vom individuellen Ziel einer Messung wurde die Gerätekonfiguration im Aufbau leicht variiert.

Tabelle 1: Messinstrumente des InfraSampler, die während der unterschiedlichen Messeinsätze im Rahmen dieser Doktorarbeit verwendet wurden. Diejenigen Sensorik, welche im InfraSampler v1.0 eingesetzt wurden, sind unter der Dreifachbegrenzung angegeben. Bei der Sensorik dar-über, handelt es sich um den InfraSampler v2.0. Zusätzlich sind für jedes Gerät die Messgröße, das Messprinzip und der Messbereich angegeben.

	Gerät	Messgröße	Messprinzip	Messbereich
InfraSampler v2.0	SprintIR-6S	CO2	NDIR ¹	0 – 100 Vol.-%
		O2	Optisch	0 – 25 Vol.-%
	LuminOx (LOX)	Temperatur		10 – 60 °C
		Luftdruck	MEMS ²	500 – 1200 mbar
				0 – 5 Vol.-%
SJH-Series	CH4	NDIR		

¹ Nichtdispersiver Infrarotsensor

² Micro-Electro-Mechanical-System

InfraSampler v1.0	SCD-30	CO ₂	NDIR	400 – 40000 ppm
		Temperatur		-40 – 70 °C
		Relative Luftfeuchtigkeit	MEMS	0 – 100 % RH
	ME2-O2	O ₂	Elektroche- misch	0 – 25 %
	SEN54	PM _{2,5} (0,3 – 2,5 µm)	Optischer Partikelzähler (OPC)	0 – 1000 µg/m ³
		PM ₁₀ (0,3 – 10,0 µm)		
		VOC	MOX	0 – 500 Index 1 – 1000 ppm (Ethanol)
	Multichannel Gas Sensor v2.0 ³ (Multi v2.0)	Temperatur		-10 – 50 °C
		Relative Luftfeuchtigkeit	MEMS	0 – 90 % RH
		CO	MOX	5 – 5000 ppm
NO ₂		0,1 – 10 ppm		
C ₂ H ₅ CH	1 – 500 ppm			
	VOC		1 – 500 ppm	

Der Anwendungsschwerpunkt des InfraSampler v2.0 liegt in der Probenahme von industriellen Emissionen, um eine anschließende olfaktometrische Analyse oder die Charakterisierung von VOCs zu ermöglichen. Durch die Auswertung eventuell auftretender atmosphärischer Verdünnung in den Proben, werden zeitgleich die Parameter Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) gemessen. Zusätzlich wird auch Methan (CH₄) erfasst.

Der InfraSampler v1.0 kann ebenfalls für die Probenahme von industriellen Emissionen verwendet werden, bietet aber auch mit der Variation an Parametern (CO₂, CO, O₂, NO₂, PM_{2,5}, PM₁₀, VOC und C₂H₅CH) die Möglichkeit Transmissionsmessungen durchzuführen. Für alle Anwendungen wurden standardisierte Messverfahren entwickelt, um repräsentative Ergebnisse zu erzeugen.

Die in Tabelle 1 genannten Messprinzipien sind in den folgenden Kapiteln erklärt.

³ Die Messleistung ist nur nach Erreichen der Betriebstemperatur der Sensorik zu gewährleisten.

3.1.2.1 Elektrochemische Sensoren

Elektrochemische Sensoren beruhen auf chemischen Reaktionen, die direkt mit elektrischem Strom gekoppelt sind, wodurch ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Stoff- und Ladungstransport entsteht. Diese Sensoren lassen sich in vier grundlegende Messprinzipien einteilen:

- Potenziometrisch
- Amperometrisch
- Konduktometrisch/ Impedimetrisch
- Biosensorik

Der im vorliegenden Experiment eingesetzte Sensor (ME2-O2) ist ein amperometrischer Sensor, der entweder eine 2- oder 3-Elektroden-Anordnung verwendet. Die Messung basiert auf dem Strom, der durch die elektrochemische Reaktion des Analyten (O_2) generiert wird. Eine konstante Polarisationsspannung wird an den Sensor angelegt, wobei diese Spannung im Bereich des Diffusionsgrenzstrom-Plateaus des spezifischen Systems liegt. Der gemessene Strom, der proportional zur Konzentration des Analyten ist, dient als Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit an der Elektrode und zeichnet sich durch eine kurze Ansprechzeit aus. Um die geringe Selektivität amperometrischer Sensoren zu kompensieren, werden zusätzliche Maßnahmen ergriffen, wie die Integration speziesdurchlässiger Filterschichten oder selektiv wirkender Katalysatoren auf der Elektrodenoberfläche (Hering und Schönfelder 2012).

In Abbildung 18 ist schematisch ein Sauerstoffsensor mit einer 2-Elektroden-Anordnung eines membranbedeckten amperometrischen Sensors dargestellt.

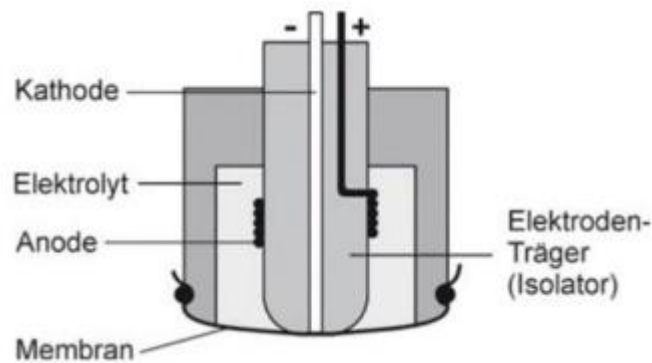


Abbildung 18: Amperometrischer Sauerstoffsensor mit einer Membran bestehend aus einer PTFE-Folie. (Hering und Schönfelder 2012)

3.1.2.2 Metalloxid-Halbleiter Sensoren

Metalloxid-Halbleiter-Gassensoren (MOX) basieren auf der Chemisorption organischer Moleküle an der Oberfläche oxidischer Halbleiter, wie z.B. SnO_2 , V_2O_5 , WO_3 oder $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_{3+z}$. Je nach Bedarf werden Katalysatoren wie Pt oder Pd eingesetzt (Wöllenstein 2011). Der Mechanismus der Leitfähigkeitsänderung wird durch die Verdrängung des chemisorbierten Sauerstoffs an der Oberfläche erklärt, der seine Elektronen in den Festkörper zurückgibt, somit also die Elektronenkonzentration in der Oberflächenschicht und damit den Leitwert erhöht (Hering und Schönfelder 2012).

MOX-Gassensoren reagieren auf fast alle reduzierenden und oxidierenden Gase und ermöglichen somit nicht nur die Detektion von Spurengasen wie CO , NO_x , NH_3 , H_2S , SO_2 und Kohlenwasserstoffen (C_xH_y), sondern auch die Analyse komplexer Aromen wie VOCs. Eine hohe Selektivität wird durch eine geeignete chemische Beschichtung erreicht. Je nach Material und Zielgas sind Betriebstemperaturen zwischen $300\text{ }^\circ\text{C}$ und $900\text{ }^\circ\text{C}$ notwendig, um die Eigenleitfähigkeit des Sensors zu gewährleisten. Die Sensitivität ist gasabhängig und reicht von wenigen ppb bis in den Prozentbereich. Dabei ist die Nachweisgrenze abhängig vom gassensitiven Material (Wöllenstein 2011). Eine programmierte periodische Aufheizung und Abkühlung, ausgeführt als Dreiecks- oder Sinusfunktion, kann zu einer erheblichen Steigerung der Selektivität führen (Hering und Schönfelder 2012).

Die klassische Konstruktion dieser Sensoren, schematisch in Abbildung 19 dargestellt, ermöglicht ihre Herstellung als planare Dickschichtsensoren mittels Siebdruck- oder Dispensertechnik (Hering und Schönfelder 2012).

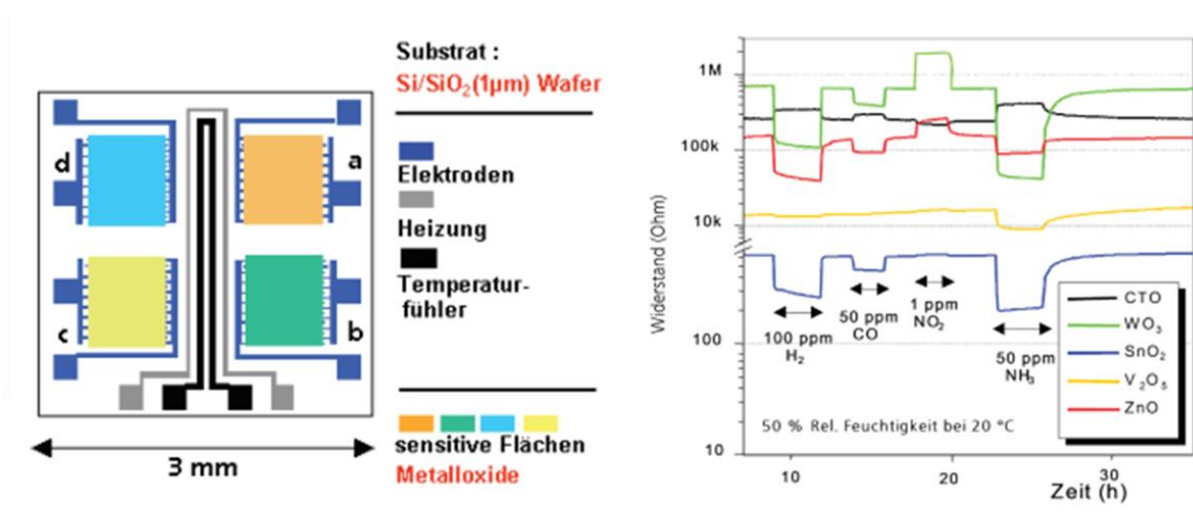


Abbildung 19: Schematischer Aufbau eines Metalloxid-Gasensorarrays (links) mit dem zugehörigen Widerstandsverlauf bei Beaufschlagung mit verschiedenen Prüfgasen (rechts). (Fraunhofer IPM, 2011)

3.1.2.3 Optoelektronische Sensoren

Optoelektronische Sensoren nutzen Licht zur Detektion physikalischer oder chemischer Veränderungen in der Umgebung. Diese Sensoren bestehen in der Regel aus einer Lichtquelle (z.B. LED oder Laser) und einem Detektor (z.B. Photodiode oder Fotowiderstand). Sie messen Änderungen in der Lichtintensität oder -wellenlänge, die durch Umweltveränderungen verursacht werden, wie das Vorhandensein bestimmter Substanzen (Decoster und Harari 2013). In dieser Studie wurden verschiedene Typen optoelektronischer Sensoren verwendet, darunter OPCs (SEN54) zur Feinstaubfassung, auf der NDIR-Technik beruhenden Sensoren (SCD30, SprintIR-6S und SJH-Series) zur CO₂- und CH₄-Messung und der O₂-Sensor (LuminOx), der auf Lumineszenzlöschung durch O₂ basiert. Trotz der gemeinsamen Nutzung von Licht unterscheiden sich diese Technologien grundlegend in der Art des verwendeten Lichtes und dem zugrunde liegenden Messprinzip.

So basieren OPCs Großteils auf Streuung von Licht an den in der Luft schwebenden Feinstaubpartikel. In der Nähe der Fotodiode passieren die im Luftstrom enthaltenen Partikel einen fokussierten Laserstrahl, wie in Abbildung 20 dargestellt, und streuen dabei das Laserlicht. Dieses Streulicht wird anschliessend von der Photodiode in ein elektrisches Signal gewandelt und auf dem internen Mikrocontroller in einen Ausgabewert für die Masse- und Anzahlkonzentration konvertiert. Darüber hinaus hat die interne Strömungsführung einen starken Einfluss auf die Langzeitstabilität des Sensors, da sich Partikel, bei einer schlechten Strömungsauslegung, an ihren optischen Komponenten (Laser, Fotodiode, Strahlfalle) absetzen können und damit die Messgenauigkeit im Laufe der Zeit verschlechtern (Chen u. a. 2024).

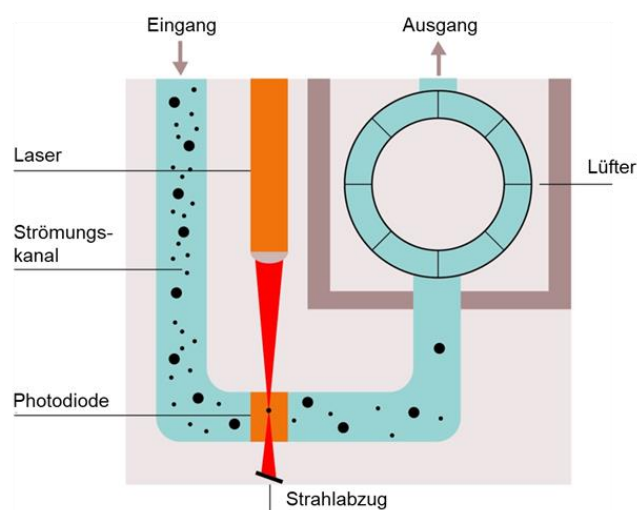


Abbildung 20: Arbeitsprinzip eines OPCs. (Sensirion, 2024)

Im Gegensatz zu den OPCs ermitteln NDIR-Gassensoren die Gaskonzentration durch Messung des Grades der Lichtabsorption durch den Gasanalyten. Die gemessene Strahlungsintensität in der Wellenlänge von 4,3 μm wird über das Lambert-Beer'sche Gesetz (14) mit der CO₂-Konzentration in Verbindung gestellt (Wolff 2021).

$$\frac{I_d}{I_0} = e^{K \cdot c_{CO_2} \cdot L} \quad (13)$$

Dabei ist I_d die Strahlungsintensität bei $4,3 \mu\text{m}$, I_0 ist die Intensität der Referenzstrahlung, K ist der Absorptionskoeffizient für CO_2 , c_{CO_2} ist die CO_2 -Konzentration und L ist die Strecke zwischen Strahlungsquelle und den Detektoren. Der Referenzsensor gleicht in diesem Aufbau die variierende Strahlungsintensität aus (Abbildung 21).

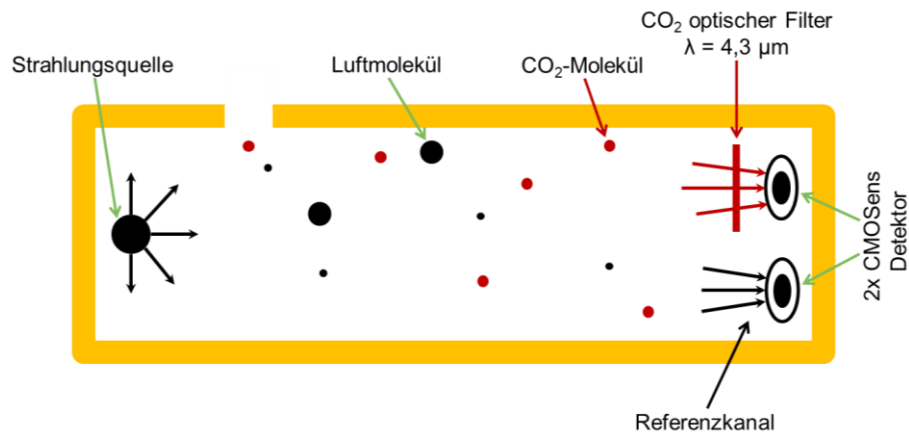


Abbildung 21: Messprinzip eines NDIR-Sensors (SCD30). (Sensirion; 2018)

Der Absorptionsprozess in NDIR-Sensoren ist eine Funktion von Druck und Gaskonzentration. Es wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des Drucks zu einer proportionalen Erhöhung der detektierten Gaskonzentration führt, während eine Drucksenkung zu einer Verringerung der detektierten Konzentration führt. Dieser Effekt beruht auf molekularen Wechselwirkungen und ist für alle NDIR-Sensoren relevant (Wolff 2021). Der SCD30 wird bei einem Standarddruck von 1013 mbar und einer CO_2 -Konzentration von 450 ppm kalibriert. Die gemessenen Werte variieren jedoch in Abhängigkeit von sowohl Druck als auch CO_2 -Konzentration. Um die durch Druck- und Konzentrationsschwankungen verursachten Messabweichungen zu korrigieren, ist es möglich, einen Kompensationswert einzustellen. Dieser Kompensationswert muss an die spezifischen Bedingungen, wie Flughöhe und den geplanten Messbereich ($> 1 \text{ Vol.-% CO}_2$), angepasst werden. Durch die präzise Einstellung des Kompensationswertes kann die Genauigkeit der NDIR-Sensoren unter variierenden Umgebungsbedingungen signifikant verbessert werden (J. Y. Wong und Anderson 2012).

Die LOX-Sensoren basieren auf der Lumineszenzlöschung durch Sauerstoff. Gepulstes Licht wird auf einen sauerstoffempfindlichen Fluoreszenzfarbstoff gerichtet und bringt diesen zum Fluoreszieren. Die Geschwindigkeit, mit der diese Fluoreszenz abklingt, ist umgekehrt proportional zur Menge des in der Umgebung vorhandenen Sauerstoffs. LOX-Sensoren haben im Gegensatz zu elektrochemischen Sensoren eine minimale Querempfindlichkeit mit anderen Gasen, da die Lumineszenzlöschung durch Sauerstoff hochselektiv ist (Shannon 2017; Rabus, Sada, und Rebner 2018).

3.1.3 Stromversorgung

Die DC-Einheiten für beide InfraSampler-Modelle bestehen aus drei 3,7 V Lithium-Ionen Akkus und können zusätzlich während des Betriebes mit 230 VAC versorgt werden, so dass sowohl bordeigene als auch externe elektrische Energie zur Verfügung steht.

Der Strom aus den Akkus speist zwei Stromkreise im InfraSampler. Alternativ können diese Stromkreise auch extern über ein Netzteil versorgt werden. Einer der Stromkreise wird für die Mikrocontroller und Messinstrumente im InfraSampler verwendet. Sie sind mit einem Spannungswandler ausgestattet, welcher die eingehende Spannung von Akku oder Netzteil auf 5V runterreguliert. Alternativ kann der InfraSampler auch direkt an den 5 V/ 1000 mA Ausgang des UAV angeschlossen werden, allerdings können aufgrund der niedrigen Stromstärke nur einzelne Messinstrumente verwendet werden. Der zweite Stromkreis dient in beiden Modulen der Pumpenversorgung und Steuerung. Beide Stromkreise können manuell unterbrochen werden.

3.1.4 Datenverwaltung

Bei der Datenverwaltung muss zwischen InfraSampler v1.0 & InfraSampler v2.0 unterschieden werden. Beim InfraSampler v1.0 handelt es sich um ein Offline-Modul. Daraus folgt, dass die Daten ausschließlich auf einer SD-Karte (16 GB) lokal gespeichert werden und nach dem Messeinsatz auf einem Laptop ausgelesen wird.

Der InfraSampler v2.0 ist ein Online-Modul und fähig die gesammelten Daten in Echtzeit zu übertragen. Die Datensicherung erfolgt sowohl lokal auf dem Mikrocontroller als auch über eine MQTT-Schnittstelle auf jeden Laptop, welcher mit der Modul-Software ausgestattet ist. Die Signalübertragung kann über 5G oder ein lokales Netzwerk (WLAN) erfolgen. Für die Anzahl der Datenerfassungscomputern gibt es keine Limitierung, da die Daten direkt aus dem AWS-Server des IPH runtergeladen werden können. Im Vergleich zu Messungen mit dem InfraSampler v1.0, hat die einheitliche Datenerfassung im InfraSampler v2.0 den Vorteil, dass sie einen direkten Überblick über alle gemessenen Daten liefert, was eine eventuell notwendige direkte Anpassung der Messstrategie ermöglicht. Die bisher größte getestete Entfernung zur Datenübertragung, sowohl mit 5G als auch im WLAN-Netz war ca. 180 km von Düsseldorf bis zum IPH und zurück. Alle Daten werden mit einem gemeinsamen Zeitstempel in einem gemeinsamen Format gespeichert. Dabei ist der Zeitstempel aller Messungen die Zeit des Mikrocontrollers, welcher messtäglich synchronisiert wird.

3.1.5 InfraSampler Software

Das nachfolgende Kapitel beleuchtet die "InfraSampler" Software im Detail und legt den Fokus auf die integrierte Entwicklung von Front-End und Back-End. Hierbei werden die ausgewählten Programmiersprachen sowie ihre spezifischen Anwendungen und Vorteile eingehend dargestellt.

3.1.5.1 Back-End

Das vorliegende Kapitel behandelt das Back-End-Programm, das als Kommunikationsskript zwischen der verwendeten Sensorik und den Mikrocontrollern fungiert. Die Implementierung erfolgt in der objektorientierten Programmiersprache C++, um eine optimale Laufzeit und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten.

Die Bedeutung des Back-End-Programms liegt in seiner Fähigkeit, die erfassten Daten von den verschiedenen Sensoren zu empfangen, zu sortieren und an die entsprechenden Mikrocontroller-Einheiten weiterzuleiten. Hierbei ist eine zuverlässige und effiziente Kommunikation von entscheidender Bedeutung, um eine präzise Steuerung und Regelung der angeschlossenen Systeme zu ermöglichen. Die Datenübertragung findet sowohl über die serielle Kommunikation (UART & I²C), als auch über analoge Signalübertragung statt.

Im Anhang sind die verwendeten Skripte mit Kommentaren für den InfraSampler v1.0 & v2.0 aufgeführt (siehe 9.4 & 9.5).

3.1.5.2 Front-End

Das vorliegende Kapitel widmet sich der Beschreibung des Front-End-Programms, das eine Schlüsselrolle bei der Verarbeitung der Sensordaten, der Echtzeitübertragung sowie der Gestaltung der Benutzeroberfläche (GUI) einnimmt. Dieses Element des Gesamtsystems stellt sicher, dass die erfassten Daten in Echtzeit erfasst, interpretiert und dem Benutzer über eine intuitive Benutzeroberfläche präsentiert werden.

Das gesamte Programm wurde in Python geschrieben. Die Entscheidung für Python resultierte aus seiner Fähigkeit, eine hohe Flexibilität in der Umsetzung zu bieten und gleichzeitig eine dynamische Entwicklerumgebung bereitzustellen. Diese Eigenschaften ermöglichen es, effizient auf Änderungen und Anforderungen zu reagieren, was in einem sich kontinuierlich entwickelnden technologischen Umfeld von entscheidender Bedeutung ist.

Ein weiterer Aspekt, betrifft die etablierte Datenkommunikation über das I²C-Protokoll und die Schnittstelle zwischen Messapplikation und Server. Dieses Protokoll wurde gezielt ausgewählt, um eine zuverlässige und effektive Datenübertragung zwischen den Mikrocontrollern und dem Front-End-Programm sicherzustellen. Die Integration des I²C-Protokolls ermöglicht eine nahtlose Interaktion zwischen den Komponenten des Systems und trägt somit maßgeblich zur Gesamtfunktionalität bei. Während die Serverkommunikation fundamental für die Überwachung der erzeugten Messdaten auf unterschiedlichen Systemen ist.

Im Anhang sind die verwendeten Skripte mit Kommentaren für den InfraSampler v2.0 aufgeführt (siehe 9.6).

3.1.6 Meteorologie und ergänzende Messparameter

Die Wetterstation im Industriepark Höchst, der Infraseriv GmbH & CO. Höchst KG, zeichnet die gängigen meteorologischen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Temperatur und Niederschlag auf. Die Werte können über das firmeninterne UBIS-System abgerufen werden (siehe Abbildung 22).

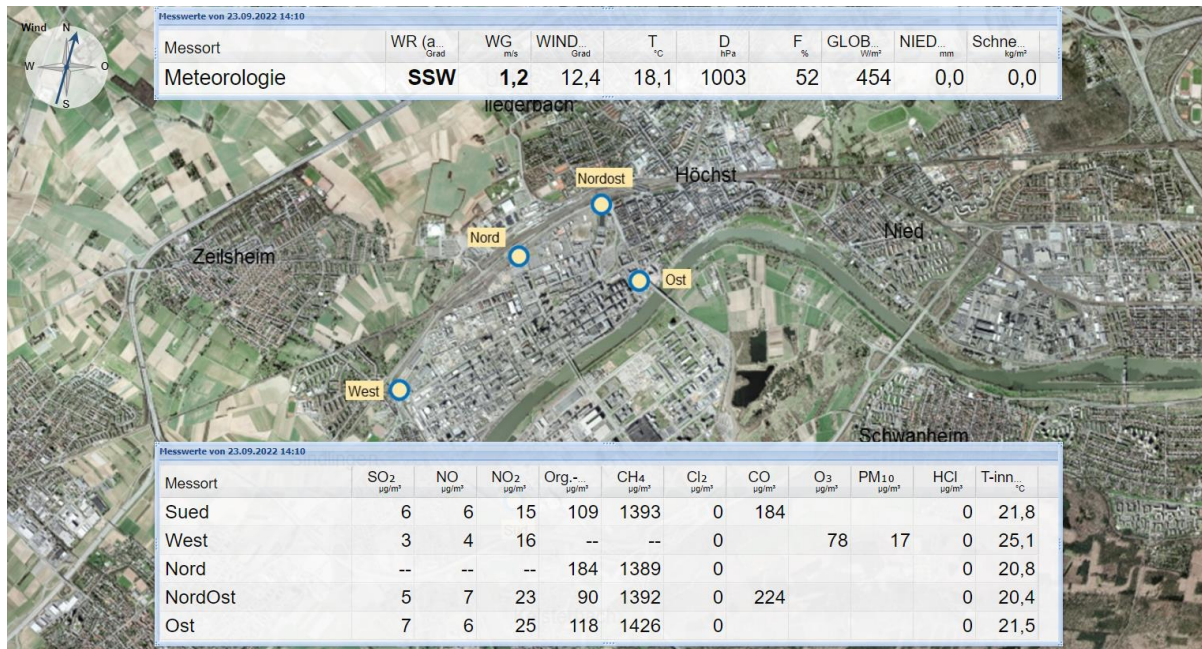


Abbildung 22: UBIS Alarm & Trend-Monitor. Das firmeninterne Ubis-System gibt die Parameter der Luftmessstationen in 5 min Mittelwerten aus, sowie die Meteorologie im Inudstriepark Höchst.

Die Wetterdaten wurden für die Auswertung der Probenahme mitberücksichtigt. Mit Hilfe eines GNSS-Gerätes wird kontinuierlich die Position, Höhe und Geschwindigkeit des Infra-Sampler aufgezeichnet, welche notwendige Informationen für die Analyse der mobilen Messdaten sind. Die Kamera der Drohne mit Blick auf die Probenahmelanze hält visuell die Umgebungsbedingungen fest, um Rückschlüsse auf die Geschehnisse zu erlauben. Diese Videos werden außerdem zur Entfernung von lokalen Störeinflüssen (z.B. Verdünnungseffekte und Kontamination durch lokale Emissionen) aus den Datensätzen verwendet.

3.1.7 Laboranalytik

3.1.7.1 Dynamische Olfaktometrie

Dieser Abschnitt orientiert sich an der DIN-Norm "DIN EN 13725 - Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung von Geruchskonzentrationen durch dynamische Geruchsmessungen und Geruchsemissionsraten stationärer Quellen". Diese Norm beschreibt, wie die Konzentration von Geruchsstoffen mittels dynamischer Olfaktometrie bestimmt wird, bei der menschliche Prüfer zur Beurteilung von Geruchsemissionen eingesetzt werden. Kalibrierung und Analyse werden mit einem Olfaktometer mit einer menschlichen Nase als Detektor durchgeführt.

Vor der Kalibrierung und Geruchsanalyse werden die Prüfer auf die Regeln hingewiesen, die bei der Durchführung anzuwenden sind, um fehlerfreie Messergebnisse zu erzielen. Diese Regeln sind im Verhaltenskodex für Prüfer „DIN EN 13725“ festgelegt:

- Während der Messung dürfen keine Unterhaltungen geführt werden
- Verzicht auf Parfüms, Deodorants und geruchsintensive Kosmetika
- Beachtung von Hygiene, um negative Geruchseinwirkungen zu vermeiden
- 30 Minuten vor der Kalibrierung/Messung: Verzicht auf Speisen, Getränke und Tabak
- Prüfer mit Allergie, Nasennebenhöhlenentzündung oder Erkältung werden ausgeschlossen

Dem Prüfgerät wird abwechselnd in zufälliger Reihenfolge geruchlose Reinluft und Schwefelwasserstoff oder n-Butanol zur Kalibrierung im Geruchsmessgerät zugeführt. Für jeden Standardgeruch werden 10 bis 20 Schwellenschätzungen vorgenommen, von denen die Prüfer angeben, ob der Geruch wahrnehmbar ist. Die Kalibrierung erfolgt an drei nicht aufeinanderfolgenden Tagen. Durchschnittliche Schwellenwertschätzungen für n-Butanol liegen zwischen 20 nmol/mol und 80 nmol/mol. Für Schwefelwasserstoff gibt es keinen offiziellen Richtwert, aber die Geruchsschwelle liegt meist bei 1 µg/m³. Im nächsten Abschnitt ist eine Geruchsanalyse ähnlich dem Kalibrierungsprozess beschrieben. Bei der Auswahl der Tester werden bestimmte Kriterien berücksichtigt, um mit einem möglichst homogenen Team vergleichbare Messergebnisse zu erhalten. Dabei spielen Faktoren wie Reproduzierbarkeit der Geruchsschwellenerkennung, Interferenzneigung, Konzentration und Empfindlichkeit eine wichtige Rolle. Motivation, Ausbildungsstand, Engagement, Testerauslastung und Disziplin bestimmen die Qualität der Messungen.

Die olfaktometrische Analyse erfolgt in einem dafür speziell ausgelegten Riechraum. Hierbei kann ein stationäres dauerhaft eingerichtetes Labor, ein mobiles Labor in Form eines Containers oder Fahrzeugs oder ein vor Ort eingerichteter Raum genutzt werden. Die Voraussetzungen für einen Riechraum sind:

- eine gute Raumbelüftung
- Zuluft mit Aktivkohlefilterung
- Vermeidung von störenden Geräusch- und Lichtquellen
- hygienische Bedingungen
- konstante Raumtemperatur (max. 25 °C)
- CO₂-Volumenanteil von maximal 0,15 %



Abbildung 23: Geruchsanalyse an einem Olfaktometer (Olfasense, 2023)

Die Messungen werden mit einem Team aus mindestens vier Personen (Abbildung 23) und einem Messleiter durchgeführt. Der Messleiter bedient das Olfaktometer und weist die Prüfer ein. Während der Messung wird die Konzentration der verdünnten Geruchsprobe schrittweise erhöht, bis die Prüfer einen Geruch wahrnehmen. Dabei muss beachtet werden, dass der Volumenstrom nicht unter 20 L/min liegt und die Luftgeschwindigkeit nicht über 0,5 m/s ansteigt, um ein Unbehagen bei den Prüfern zu vermeiden. Die Präsentation der Probe erfolgt maximal 15 Sekunden mit einer Pause von 30 Sekunden zwischen den Geruchsproben, um eine Adaption an den Geruch zu vermeiden. Wenn die Hälfte der Prüfer einen Geruch gleichzeitig wahrnimmt, wird die Geruchsschwelle überschritten. Die Geruchsstoffkonzentration an der Geruchsschwelle beträgt 1 GE/m³ (Geruchseinheit pro Kubikmeter) und ist als europäische Geruchseinheit festgelegt. Die Prüfer werden auf zwei Arten befragt:

- Forced-Choice-Abfrage
- Ja-/Nein-Abfrage

Bei der Forced-Choice-Abfrage werden den Prüfern über mehrere Rohre Proben zugeführt, wobei nur aus einem Rohr eine Geruchsprobe strömt. Jeder Prüfer muss Angaben zu jedem Rohr machen, unabhängig davon, ob die Wahrnehmung einer Geruchsprobe geraten, vermutet oder sicher ist. Bei der Ja/Nein-Abfrage entscheiden die Prüfer, ob während der olfaktorischen Messung ein Geruch wahrnehmbar ist. Die Ja/Nein-Abfrage wird häufiger angewendet, da sie kürzere Analysezeiten und einen geringeren Verbrauch an Probe- und Verdünnungsluft aufweist als die Forced-Choice-Abfrage.

Die Bewertung von Gerüchen erfolgt anhand von drei Kriterien:

- der Geruchsintensität
- der Hedonik
- dem Geruchscharakter

Die Geruchsintensität wird mithilfe einer Kategorienskala bewertet, die von "nicht wahrnehmbar" bis "extrem stark" reicht (Tabelle 2). Der Prüfer muss bereits bei der geringsten Wahrnehmung sicher sein, dass ein Geruchsstoff wahrnehmbar ist (VDI 3882 Blatt 1).

Tabelle 2: Kategorienskala zur Bewertung der Geruchsintensität. (Maiwald, 2016)

Geruch	Intensitätsstufe
extrem stark	6
sehr stark	5
stark	4
deutlich	3
schwach	2
sehr schwach	1
nicht wahrnehmbar	0

Die hedonische Geruchseinwirkung bezieht sich auf den emotionalen und psychologischen Aspekt des Geruchs. Hierbei wird die Hedonik eines Geruchs auf einer Skala von -4 ("äußerst unangenehm") bis +4 ("äußerst angenehm") bewertet (Abbildung 24) (VDI 3882 Blatt 2).

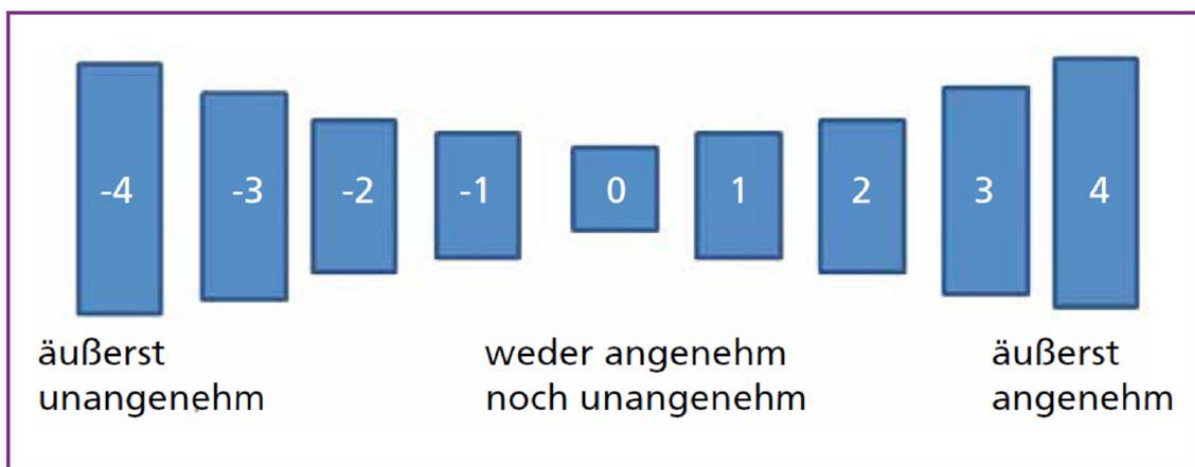


Abbildung 24: Skala zur Kategorisierung der hedonischen Geruchseinwirkung. (Maiwald, 2016)

Der Geruchscharakter wird von den Prüfern frei beschrieben und bewertet. Ähnliche Begriffe werden zusammengefasst und ausgewertet.

Wie bei der olfaktometrischen Probenahme können bei der Messung Messfehler und -unsicherheiten auftreten. Um Messunsicherheiten zu vermeiden, wurde der "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) erstellt. Unter Einhaltung der Normen kann die Messunsicherheit auf ein Viertel oder den vierfachen Messwert reduziert werden.

4 Entwicklung von Messstrategien zur Untersuchung von Reingasströmen

Im Prinzip können mit dem InfraSampler-Modul stationäre Messungen an jedem beliebigen Ort durchgeführt werden, solange dieser für das UAS erreichbar ist. Mobile Messungen sind mit variablen Geschwindigkeiten von bis zu 3 m/s möglich⁴. An den Messpunkten wird diese Geschwindigkeit jedoch auf 0,5 m/s verringert. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl an denkbaren Messpraktiken zur Untersuchung und Probenahme von Reingasströmen. In diesem Kapitel werden solche Messstrategien vorgestellt, die sich zur Erforschung und Überwachung von industriellen Emissionen anbieten. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf Messstrategien, die besonders geeignet sind, um die Abluftfahne eines industriellen Prozesses z. B. einer Feuerungsanlage repräsentativ zu charakterisieren, sodass sowohl eine Darstellung der Abluftfahne möglich ist, welche mit Simulationen verglichen werden kann, sowie eine repräsentative Probenahme zur sicheren Analyse der Bestandteile. Diese Messstrategien wurden während mehrerer Feldmessungen eingesetzt und auf ihre Praxistauglichkeit geprüft (Kapitel 5). Eine ausführliche Diskussion der Anwendbarkeit, ihres Potentials aber auch der Grenzen findet sich in Kapitel 7.

4.1 Allgemeine Anwendungsmöglichkeiten vom InfraSampler

Die Einsatzmöglichkeit von online In-Situ Probenahmen zur Untersuchung von industriellen Emissionen setzen sich aus der Durchführung standortabhängiger Messungen der Transmissionen oder direkter Beprobung von Quellen wie Industrieanlagen zusammen. Ein Beispiel hierfür findet sich in Burgués u. a. (2022). Hier wurde mit einer auf UAV basierten Plattform, mit einer elektrischen Nase eine Studie zur Untersuchung von olfaktometrischen Parametern in Kläranlagen durchgeführt.

Messungen am gleichen Standort zu verschiedenen Zeiten mit unterschiedlichen Wettersituationen erlauben zudem die Evaluierung des Einflusses der Meteorologie auf die Zusammensetzung einer industriellen Abluftfahne. Durch die kurze Auf- und Abbauzeit von maximal zehn Minuten, sowie der maximalen Beprobungszeit von 5 bis 8 min kann im Laufe eines Tages der Messort mehrfach gewechselt werden. Technische Beschränkungen treten nur durch die Anzahl der verwendeten Akkus auf. Dabei ist von ca. einem Akkuwechsel pro Probenahme auszugehen. Quasi stationäre Messungen (z.B. im Schwebeflug) gehören in der UAV-Anwendung zu der bevorzugten Methode, um Messungen und Probenahmen durchzuführen. Bestimmte Einflussgrößen wie drohneninduzierte Strömungen und ortsabhängige Parameter, können in diesen Fällen vereinfacht dargestellt werden (Kapitel 3.1.1).

⁴ Industriepark Höchst interne Geschwindigkeitsbegrenzung für UAV basierte mobile Messungen.

Werden hingegen systematische, mobile Messungen der Transmission innerhalb einer geographischen Region wie dem IPH durchgeführt, kann eine Art Kartierung der Luftqualität innerhalb des erfassten Gebiets erfolgen (siehe Abbildung 25).

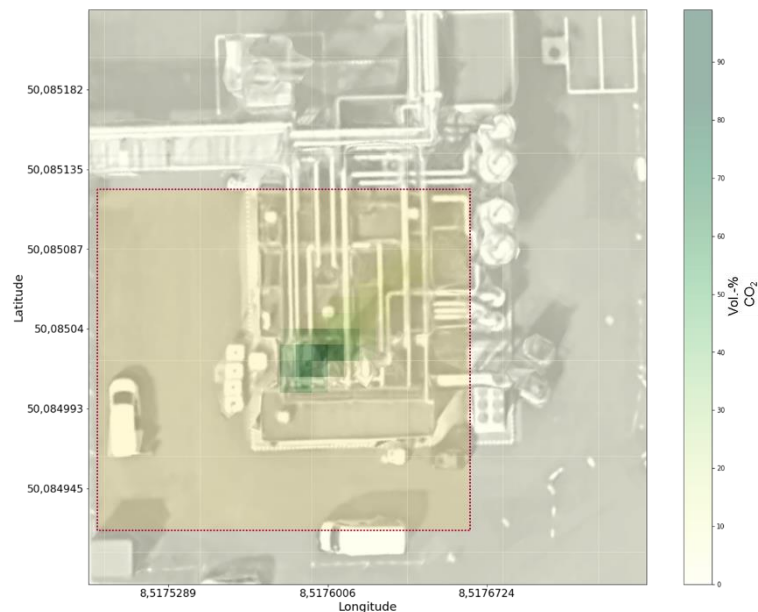


Abbildung 25: CO₂-Kartierung von der Rauchfahne einer Biogasaufbereitungsanlage im IPH in unterschiedlichen Höhen. Der rot markierte Bereich gibt das Fluggebiet des UAS vor.

Zwar ist mit dieser Strategie nur eine Momentaufnahme der atmosphärischen Situation um die Anlage möglich, aber es lassen sich dennoch Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung von Luftschadstoffen ziehen. Ein Beispiel hierfür findet sich ebenfalls in Cozma u. a. bei dem autonome UAV verwendet wurden, um Luftschadstoff-Heatmaps in verschiedenen Altituden zu erzeugen. Entsprechende Fallstudien mit manuellen UAV werden ebenfalls in Kapitel 5 vorgestellt.

4.2 Charakterisierung der Emission anthropogener Quellen

Im Normalfall entwickelt sich oft an intensiven Emissionsquellen anthropogener Luftschadstoffe, eine ausgeprägte Abluftfahne windabwärts der Emissionspunkte. Grundlage ist die Existenz einer Luftströmung, welche die emittierte Substanz advehiert. Je turbulenter die atmosphärischen bodennahen Strömungsverhältnisse sind, umso schneller werden die Emissionen verteilt und verdünnt. Starke Strömungen mit konstanter Windrichtung können die Abluft zügig bis in große Entfernungen transportieren. Die meteorologischen Gegebenheiten sind also von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung und Ausprägung der Abluftfahnen. Die Topographie der Region ist ebenfalls ausschlaggebend. Eine Kessellage kann beispielsweise den Abtransport der Luftschadstoffe behindern (Weiden-Reinmüller 2013).

Die in dieser Arbeit untersuchten Emissionspunkte im IPH liegen in flachem Terrain, so dass bei jeder Windrichtung eine Abluftfahne zu beobachten sein sollte. Da grundsätzlich die Intensität und exakte Lage der Abluftfahne einer Emissionsquelle jedoch nur anhand von Modellsimulationen und punktuellen Windmessungen abgeschätzt werden kann, sind besondere

Messstrategien zur Identifizierung und Charakterisierung notwendig. In den folgenden Unterabschnitten werden drei grundsätzlich verschiedene Methoden zur Untersuchung der Abluftfahne eines Kamines mit dem InfraSampler vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und angewendet worden sind. Je nach vorherrschenden betrieblichen Bedingungen wie Rauchgastemperatur und Schornsteindurchmesser, sowie Umweltbedingungen wie Abluftfahnenintensität oder Stabilität der Windrichtung ist eine der Methoden besonders vorteilhaft.

4.2.1 Querschnittsmessungen

Ein Querschnitt durch die Abluftfahne eines industriellen Schornsteins wird ausgeführt als eine Messung, bei der man in annähernd konstantem Abstand zur Quellregion um diese herumfliegt. Das UAS deckt demnach einen bestimmten Anteil einer Kreislinie um den Emissionspunkt ab. Hierbei muss beachtet werden, dass der abgedeckte Winkelbereich so groß gewählt wird, dass die Abluftfahne komplett durchflogen wird. Zusätzlich ist es notwendig, dass zum Reingasstrom auch atmosphärische Hintergrundluftmassen beprobt werden. Ansonsten ist es nicht möglich, die Luftmasse, die durch industrielle Emissionen geprägt ist, zuverlässig zu identifizieren. Außerdem kann der Einfluss des Industrieparks auf die regionale Luftqualität nur dann quantitativ bestimmt werden, wenn die aktuelle Hintergrundbelastung bekannt ist.

Werden mehrere Querschnitte hintereinander in unterschiedlichen Abständen zum Emissionspunkt durchgeführt, kann zusätzlich untersucht werden, wie sich die Struktur der Abluftfahne mit zunehmender Entfernung zum Emissionspunkt ändert und die industrielle Emission mit der Zeit transformiert werden. Eine Abnahme der Konzentrationen von Spurengasen oder Verringerung bzw. Veränderung des Geruches mit zunehmender Entfernung vom Emissionspunkt ist auf Grund von atmosphärischer Vermischung mit der Hintergrundluftmasse zu erwarten. Es können ebenfalls chemische oder physikalische Umwandlungsprozesse während der Advektion stattfinden, die zu Konzentrationsveränderung einer Substanz führen kann (Weiden-Reinmüller 2013). Wird bei einer Querschnittsmessung die komplette Abluftfahne durchflogen, kann außerdem deren Form betrachtet werden. An ihren Rändern finden turbulente Durchmischungsprozesse mit den angrenzenden Hintergrundluftmassen statt, die für einen kontinuierlichen Übergang von Abluftfahne zu unbeeinflusster Luft sorgen. Wie schnell eine Abluftfahne in der Troposphäre unter variablen Wetterbedingungen verdünnt wird, lässt sich mit dieser Methode untersuchen. Wenn der gesamte Industriepark als Flächenquelle angenommen wird, sind die unterschiedlichen Emittenten nicht gleichmäßig verteilt, sodass die Analyse der Abluftfahne auf Homogenität durch Querschnittsmessung ebenfalls interessant ist.

Auf einem kleinskaligen Niveau ist ein solcher Ansatz besonders bei Emissionsquellen mit hohen Austrittstemperaturen sinnvoll, da das UAS nicht direkt an der Quelle messen kann. Beispiele hierfür sind Verbrennungsanlagen, wie z.B. die Ersatzbrennstoffanlage (EBS-Anlage) mit bis zu 160 °C Rauchgastemperatur bei Austritt.

In Abbildung 26 sind jeweils drei Querschnittsmessungen durch eine Abluftfahne schematisch dargestellt. Die Abluftfahne ist erkennbar als grau eingefärbter Bereich, der Kamin der Anlage befindet sich in der unten links markierten Region. Aus dem Maßstab der Karte ist ersichtlich,

dass eine einzelne Querschnittsfahrt hier nur ein paar Meter lang sein muss, um sowohl Hintergrund- als auch beeinflusste Luftmassen abdecken zu können.

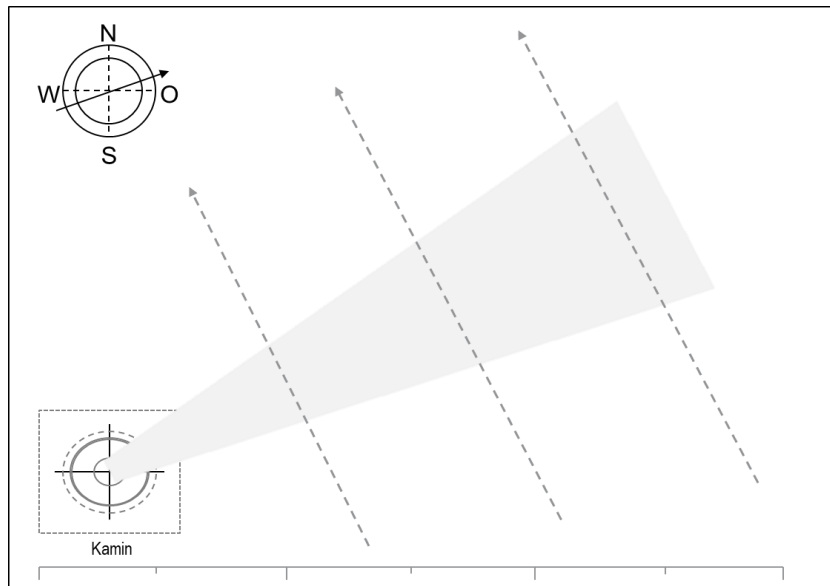


Abbildung 26: Schematische Darstellung dreier Querschnittsmessungen (gestrichelter Pfeil) durch die Abluftfahne der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.

Meteorologische Voraussetzung

Für eine erfolgreiche Querschnittsmessung sind stabile Windbedingungen notwendig, da die Durchführung einer kompletten Querschnittsmessung bis zu 30 Minuten dauern kann. Dreht sich der Wind signifikant (mehr als etwa zehn Grad) oder entstehen lokale Turbulenzen innerhalb der Messung, kann die Struktur der Abluftfahne nicht zuverlässig untersucht werden, da diese in der Breite verzerrt erscheint. Zusätzlich wird eine Unterscheidung zur Hintergrundluftmasse erschwert. Des Weiteren sollte kein zeitlich oder räumlich begrenzter Niederschlag fallen, da durch diesen Spurengase aus der Troposphäre entfernt werden können, welche die Eigenschaften der Abluftfahne lokal verändern.

4.2.2 Radiale Messflüge

Die Grundidee eines radialen Messfluges ist eine Messung innerhalb desselben Luftpakets, das von dem Emittenten wegtransportiert wird und entspricht somit annähernd einer Lagrange'schen Messung. Dabei bewegt sich das Luftpaket, nicht nur in Windrichtung von dem Schornstein weg, sondern sinkt oder steigt je nach Wetterverhältnissen. Da die in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungen im kleinskaligen Bereich stattfinden, ist in den meisten Fällen von einer Abgasfahne in einer Querströmung auszugehen.

Dieser Messflug beginnt am Emissionspunkt und führt durch die Abluftfahne bis zu einer definierten Entfernung vom Ursprungsort (Abbildung 27). Die Messfluggeschwindigkeit wird von der Advektionswindgeschwindigkeit der Abluftfahne vorgegeben. Diese wird entweder durch den Probenehmer abgeschätzt oder vorher über eine Simulation berechnet. Wichtig ist es,

den Betriebszustand der Anlage zu beachten, da der initiale Freisetzungsimpuls einen großen Einfluss auf die Fahnenausbildung haben kann, wie in der VDI Richtlinie 3783 Blatt 1 beschrieben.

Diese Messmethode eignet sich zur Untersuchung von Verdünnungs- und Transformationsprozessen innerhalb der Abluftfahne und zeigt, bis zu welcher Entfernung der Einfluss des Emittenten auf die Umgebungsluft deutlich erkennbar ist. Zusätzlich können hier auch Umwandlungen von Luftschadstoffen untersucht werden, wie z.B. chemische Zerstörung oder Partikelwachstum.

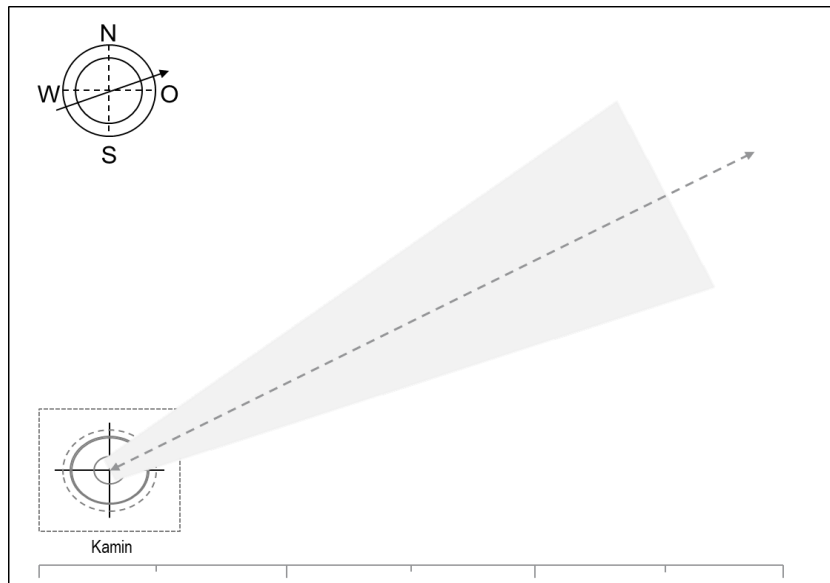


Abbildung 27: Schematische Darstellung einer Radialmessung (gestrichelter Doppelpfeil) durch die Abluftfahne der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.

Meteorologische Voraussetzung

Um einen radialen Messflug über mehrere Meter innerhalb der Abluftfahne durchführen zu können, muss die Windrichtung konstant sein. Zusätzlich dürfen keine lokalen Turbulenzen auftreten. Abhängig des Schornsteindurchmessers hat der Kernbereich der Abluftfahne in Emissionsnähe eine ähnliche Breite. Dies kann bedeuten, dass man sich bei instabilen Windverhältnissen möglicherweise mit dem InfraSampler nicht mehr innerhalb des Kernbereichs der industriell beeinflussten Luftmasse befindet und daher falsche Rückschlüsse über deren Eigenschaften zieht. Zusätzlich bedeutet es auch, dass man die Transportrichtung der Abluftfahne bereits vor der Messung genau kennen muss. In Abbildung 6 ist ebenfalls die schematische Abbildung einer Radialfahrt angedeutet. In den Fallstudien (Kapitel 5) wurden Radialfahrten bei geeigneten Wetterbedingungen durchgeführt.

4.2.3 Flexible stationäre Messungen

Eine dritte Messstrategie besteht darin, stationäre Messungen direkt am Emissionspunkt oder alternativ innerhalb der Abluftfahne oder in reinen Hintergrundluftmassen durchzuführen (Abbildung 28).

Wählt man einen Messort windabwärts des Emissionspunktes, kann man die tageszeitliche Variation und auch den Einfluss der Umweltbedingungen auf die advehierten Spurengase untersuchen. Durch die Probenahme von Hintergrundluftmassen außerhalb des Einflussbereichs des Emissionspunktes (z. B. windaufwärts) lässt sich abschätzen, wie hoch die Luftbelastung ist, welche durch aus großer Entfernung herantransportierte Substanzen beeinflusst ist. Hier spielt zusätzlich zu meteorologischen Gegebenheiten die Luftmassenherkunft, z.B. weitere Schornsteine oder Fackeln windaufwärts des Emissionspunktes, eine relevante Rolle. Liegt der besondere Fall einer kontinuierlichen Winddrehung über den Tag vor (Kapitel 6.1.2.3), kann ein Messort auch so platziert werden, dass ein Querschnitt durch die Abluftfahne gemessen wird. Die Analysemöglichkeiten sind dann denen einer Querschnittsmessung ähnlich. Um etwas über auftretende Verdünnungs- und Umwandlungsprozesse herausfinden zu können, ist es möglich, mehrere stationäre Messungen windabwärts des Emissionspunktes in unterschiedlichen Entfernungen durchzuführen. Hierbei ist allerdings der quasi-Lagrange'sche Charakter der Messung nicht gegeben, da immer neue Luftpakete an den Messort herantransportiert werden. Man muss also beachten, dass Änderungen der Quellstärke oder der Hintergrundbelastung ebenfalls einen Einfluss auf diese Messergebnisse haben. Wichtig ist, dass die Messung direkt am Emissionspunkt immer auf der Luv-Seite des Emissionspunktes stattfindet, da auf der Lee-Seite stärkere Turbulenzen entstehen, die nicht nur die Probenahme beeinflussen können, sondern auch die Flugstabilität des UAV (Kapitel 5.24.3.3). In den Fallstudien (Kapitel 5.1) wurden stationäre Messungen am Kamin bei geeigneten Wetterbedingungen durchgeführt.

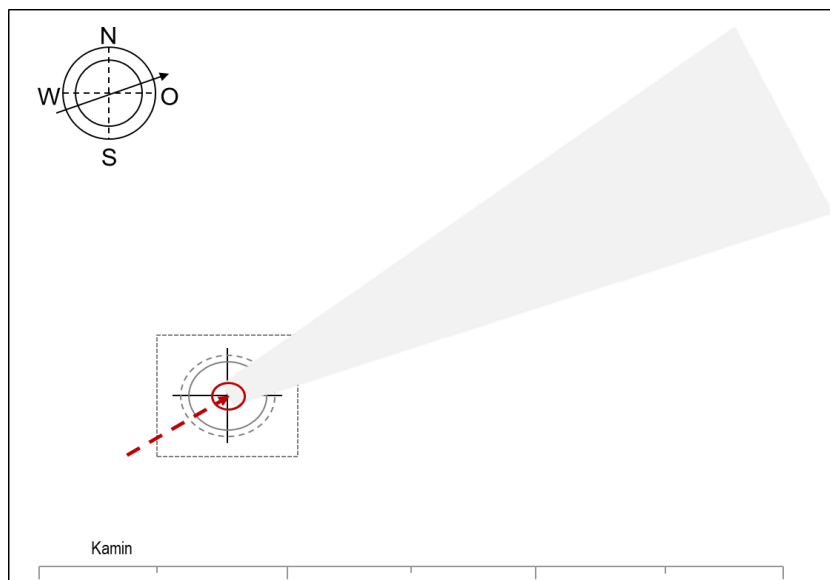


Abbildung 28: Schematische Darstellung einer stationären Probenahme im Schwebeflug (gestrichelter Doppelpfeil) an dem Schornstein der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.

Meteorologische Voraussetzung

Um einen radialen Messflug über mehrere Meter innerhalb der Abluftfahne durchführen zu können, muss die Windrichtung konstant sein. Zusätzlich dürfen keine lokalen Turbulenzen auftreten. Abhängig des Schornsteindurchmessers hat der Kernbereich der Abluftfahne in Emissionsnähe eine ähnliche Breite. Dies kann bedeuten, dass man sich mit dem UAS bei instabilen Windverhältnissen möglicherweise nicht mehr innerhalb beziehungsweise im Kernbereich der industriell beeinflussten Luftmasse befindet und daher falsche Rückschlüsse über deren Eigenschaften zieht. Zusätzlich bedeutet es auch, dass man die Transportrichtung der Abluftfahne bereits vor der Messung genau kennen muss. In den Fallstudien (Kapitel 5) wurden Radialfahrten bei geeigneten Wetterbedingungen durchgeführt.

4.3 Festlegung des Probenahmeverfahrens

Die Festlegung des Probenahmeverfahrens ist ein entscheidender Schritt bei der Durchführung von Emissionsmessungen an industriellen Kaminen. Eine korrekte und repräsentative Probenahme ist für eine zuverlässige Bestimmung der Emissionswerte unerlässlich. In diesem Kapitel werden daher Einflussfaktoren für Probenahmeverfahren vorgestellt und bewertet, die unter Berücksichtigung der genannten Faktoren eine repräsentative Probenahme ermöglichen. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise der Art der zu analysierenden Verbindungen, der Beschaffenheit des Abgases und den örtlichen Gegebenheiten.

4.3.1 Temperaturabhängigkeit

In Kapitel 4.3.1 geht es um die Abkühlrate des Rauchgases, das aus einem industriellen Schornstein ausgestoßen wird. Die Abkühlrate ist ein wichtiger Faktor, der die Ausbreitung von Schadstoffen in der Umgebung beeinflusst, sowie vorgibt wie nah sich das UAS dem Reingasstrom nähern kann. Die Abkühlrate des Abgases, das aus einem Schornstein ausgestoßen wird, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z.B. der Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der chemischen Zusammensetzung des Abgases.

Im Allgemeinen wird das Abgas jedoch schnell abkühlen, da es sich von der höheren Innentemperatur des Schornsteins auf die niedrigere Umgebungstemperatur anpasst. Der Abkühlungsprozess kann innerhalb von wenigen Sekunden stattfinden, je nachdem, wie groß der Temperaturunterschied zwischen dem Abgas und der Umgebung ist. Es ist wichtig zu beachten, dass die Abgase, die aus einem Schornstein ausgestoßen werden, häufig sehr heiß sind und die Umgebungstemperatur erheblich beeinflussen können.

Basierend auf dem Erkaltungsgesetz werden die Abkühlraten $T(t)$ für unterschiedliche Umgebungstemperatur T_U und Reingasstromtemperaturen T_1 , sowie variierenden Windgeschwindigkeiten v wie folgt berechnet.

$$T(t) = T_U + (T_1 - T_U) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (14)$$

Bei k handelt es sich um den spezifischen Wärmeübergangskoeffizient. Dieser ist nur ein Näherungswert und abhängig von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wärmeübergangskoeffizient für Gase. Die Luftgeschwindigkeit v wird lokal gemessen.

Luftgeschwindigkeit außerhalb des Schornsteins	k [W/(m ² *K)]
$v \leq 5$ m/s	$1,8 + 4,1 \cdot v$
$v \geq 5$ m/s	$7,3 \cdot v^{0,73}$

Aus Abbildung 29, bei der die Abkühlungsrate in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dargestellt wird, welche sich aus den Einzelberechnungen für die Abkühlrate im Anhang S. - 168 - ff. zusammensetzt, lässt sich ableiten, dass die Abkühlungsrate mit zunehmender Windgeschwindigkeit exponentiell zunimmt. Das bedeutet, dass höhere Windgeschwindigkeiten zu einem schnelleren Abkühlen der Reingastemperatur auf Umgebungstemperatur führen. Allerdings zeigt das Diagramm auch, dass niedrigere Reingastemperaturen länger benötigen, um die Umgebungstemperatur zu erreichen. Dies liegt daran, dass die Abkühlungsrate bei niedrigeren Temperaturen geringer ist als bei höheren Temperaturen, wenn eine geringe Strömung vorliegt.

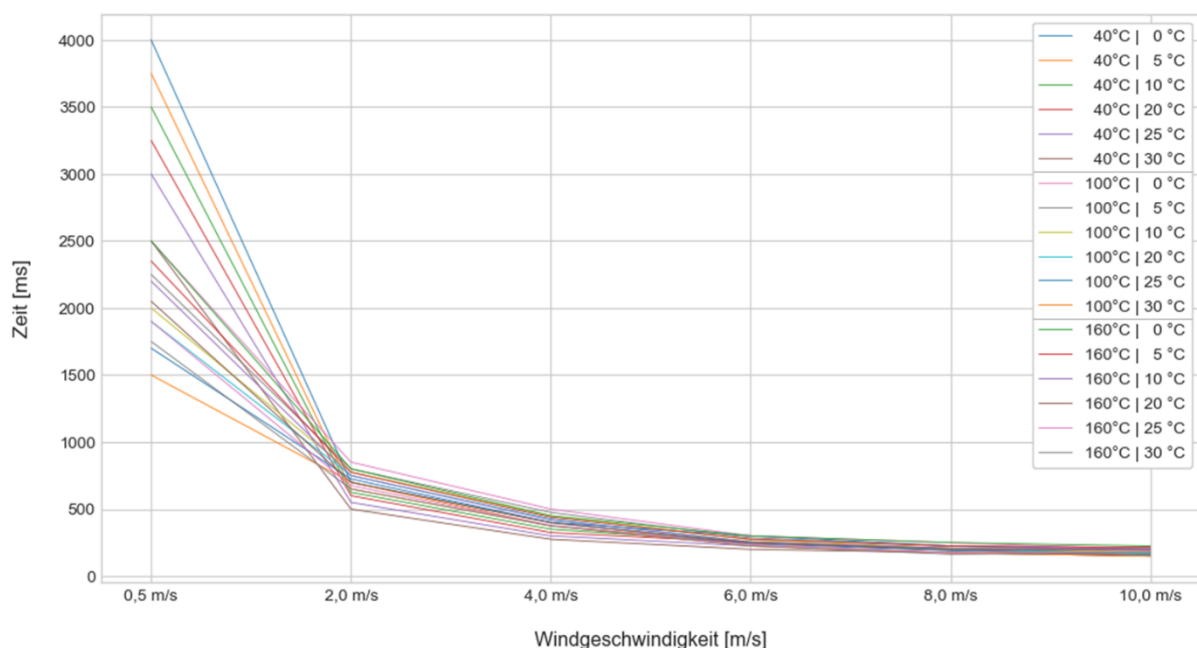


Abbildung 29: Abkühlrate von Reingasströmen mit $T_1 = 40$ °C, 100 °C und 160 °C auf die gegebene Umgebungstemperatur $T_U = 0 - 30$ °C, in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit am Emissionspunkt.

Obwohl Gleichung (14) keine Berücksichtigung der Auswirkungen der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Wärmeübertragungskoeffizienten beinhaltet, ist wie durch Baehr und Kabelac bekannt, dass die Luftfeuchtigkeit einen signifikanten Einfluss auf diesen Koeffizienten hat und zu dessen Verringerung führt.

4.3.2 Luftfeuchteabhängigkeit

Die Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit bei der Probenahme mit Drohnen am Reingasstrom stellt ein erhebliches Problem dar, insbesondere hinsichtlich der Abkühlrate des Reingases und der Entstehung von Kondensationen. Besonders bei olfaktometrischen Proben kann dies zu einer Verfälschung der Probe und des späteren Analyseergebnisses führen. Zusätzlich besteht das Risiko von Kondensationen auf der Drohne, welche bei Temperaturen ab 0 °C zu Vereisungen an den Rotoren führen können, und somit ein Absturz der Drohne droht. Eine sorgfältige Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit bei der Probenahme ist daher von großer Bedeutung, um geeignete Vorkehrungen zur Vermeidung von Kondensationen und Vereisungen zu treffen.

Die klassische Methode, den absoluten Wassergehalt der Luft zu verringern, wird durch die Abkühlung der zu entfeuchtende Luft unter ihre Taupunkttemperatur erreicht. Dies kann durch den Kontakt der Luft mit einem Kühler geschehen. Dafür wurde vor die Messkammer des InfraSampler-Moduls eine Kondensationseinheit, in Form eines Rohres mit einem Volumen von ca. 83 cm³ eingebaut (Kapitel 3.1.1.2). Die niedrigen Oberflächentemperaturen des Kühlers können in direkter Abhängigkeit mit der Umgebungstemperatur (z.B. 0 °C/ 5 °C/ 10 °C/ 20 °C) erreicht werden. Im Mollier-h,x-Diagramm in Abbildung 30 ist die Abkühlung der Luft vom Zustandspunkt „1“ des Reingases ($\varphi > 90 \%$, $T = 40 \text{ °C}$) zum Zustandspunkt „2“ ($\varphi = 100 \%$, $T = 12 \text{ °C}$) eingetragen. Am Zustandspunkt „2“ hat die Luft mit 12 °C eine so geringe Temperatur erreicht, dass ein absoluter Wassergehaltsverlust von ca. 80 % eintritt.

Nachfolgend werden in Stichpunkten die Vor- und Nachteile der Entfeuchtung durch die Taupunktunterschreitung zusammengefasst:

Vorteile der Verfahren durch Taupunktunterschreitung:

- Einfacher Aufbau

Nachteile der Verfahren durch Taupunktunterschreitung:

- Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur
- Absoluter Wassergehaltsverlust muss für jeden Einzelfall neu bestimmt werden

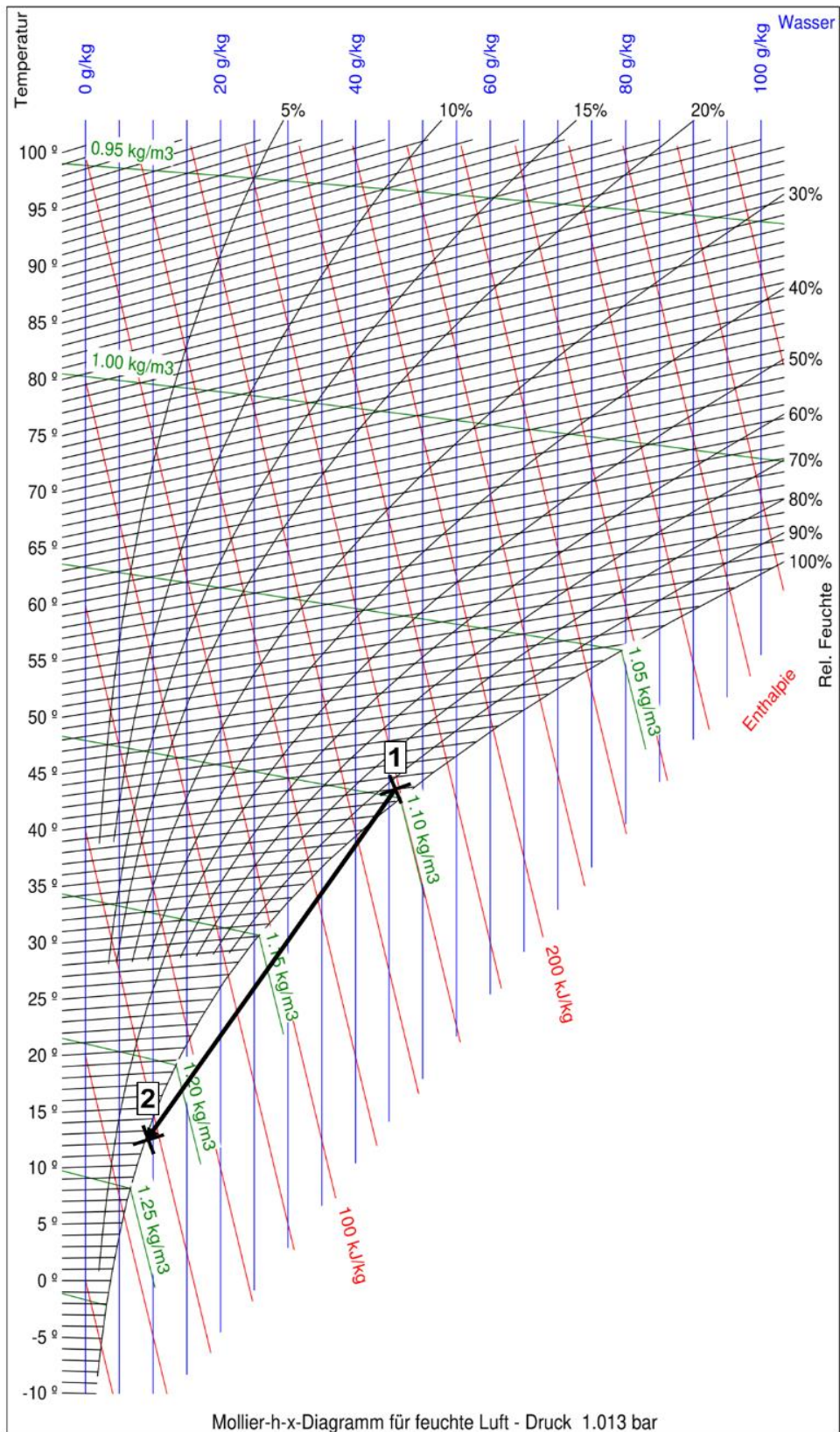


Abbildung 30: Mollier-h,x-Diagramm eingezeichnet ist die Abkühlung der Luft während der Probenahme durch die Lanze vom Zustandspunkt „1“ nach „2“.

4.3.3 Turbulenzabhängigkeit

Von wesentlicher Bedeutung ist der Einfluss des UAV-Standortes in Relation zum Schornstein, da dieser Aspekt maßgeblich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse beeinflusst. In diesem Kapitel wird eingehend erörtert, warum die Positionierung der Drohne auf der Luv-Seite des Schornsteins gegenüber der Lee-Seite – die von verstärkten Turbulenzen geprägt ist – von essenzieller Bedeutung ist. Auf die Strömungsverteilung an einem Gebäude wurde in Kapitel 2.2.1 eingegangen.

Prinzipiell gibt es viele Modelle, Simulations- und Entwurfsmethoden zur Berechnung der Auswirkung der atmosphärischen Phänomene auf das UAV. Zum Beispiel kann der klassische (stabile) Wind als Vektorsumme aus Wind und Fluggeschwindigkeit berücksichtigt werden. Dies ist eine gute Technik für die Untersuchung oder zur Kontrolle der Auswirkungen der Windscherung auf die Flugzeugdynamik (Mulgund und Stengel 1996). Ein weiteres wichtiges Phänomen, die Windturbulenz, ist standardisiert. Die am häufigsten verwendeten Böenmodelle sind das Dryden- und Karman-Modell. Die Auswirkung einer einfachen Böe auf die Luftfahrzeug-Belastung muss anhand der empfohlenen Formeln und Methoden bestimmt werden, die in den Lufttüchtigkeitsanforderungen hinterlegt sind. Diese Methoden sind für die bemannte Luftfahrt entwickelt worden und für kleine UAVs nicht anwendbar. Es gibt viele Arbeiten zur Entwicklung der UAV-Zertifizierung und Betriebsnormen, aber noch immer sind die Witterungseinflüsse nicht gut definiert. Vor allem Probleme wie die Vereisung kleiner UAVs (Kapitel 4.3.2) oder das Fliegen und Landen von UAVs in urbanen Gebieten, wurden noch nicht in dem erforderlichen Umfang untersucht.

Die Anfälligkeit von UAVs für Turbulenzen nimmt aufgrund dynamischer und umweltbedingter Faktoren mit geringeren Größen zu. Dynamisch betrachtet bedeutet eine geringere Größe und Geschwindigkeit, dass kleinere Kräfte einen erheblichen Einfluss auf die Flugbahn haben können. Unter Umweltaspekten ist es anfälliger, da es in der stark verwirbelten und turbulenten Atmosphäre in Bodennähe fliegen muss. Das Manövrieren in einer turbulenten, mit potenziellen Hindernissen gespickten Atmosphäre ist daher eine schwierige Aufgabe (Klipp und Measure 2011).

Industrielle Kamine sind von komplexen Luftströmungen durchzogen (Ferziger, Perić, und Street 2020). Insbesondere die Lee-Seite eines Schornsteins ist anfällig für virulente, wirbelbedingte Turbulenzen, die den Fluss der Luft erheblich beeinträchtigen können (Abbildung 31). Die Entstehung dieser Turbulenzen ist auf Hindernisse wie Gebäude, Rohre und strukturelle Elemente zurückzuführen, die den Windstrom ablenken und vermischen. Die Konsequenzen dieser Turbulenzen reichen von einer instabilen Flugbahn der Drohne bis hin zu drastischen Veränderungen in der Zusammensetzung der erfassten Gase während der Probenahme.

Während der durchgeführten Messflüge (Kapitel 5.1), konnte ein eindeutiger Einfluss der Windströmung auf das UAV während des Schwebenfluges in Abhängig der Positionierung im Luv oder Lee beobachtet werden. Das äußerte sich visuell durch das Absinken des UAV, während es sich im Lee des Schornsteins ($v_{Wind} \approx 0,6$ m/s) befand und dem CO₂-Konzentrationsverlust beim Verlassen des Reingasstromes. Auf der Luv-Seite des Schornsteines wurden bei gleichen Windverhältnissen keine turbulenten Einflüsse, die zum Absinken des UAV führen

erkannt. Bei der Luv-Seite, muss je nach Positionierung des UAV zum Schornstein, der Bodeneffekt (Kapitel 2.2.2) berücksichtigt werden, da er in der horizontalen Entfernung abhängig zum Gebäude ebenfalls auftreten kann. Das führt zusammen mit dem Bogenwinkel (F) (Abbildung 32) zu einem Anziehen des UAV in Richtung Schornstein, dem durch den Probennehmer einfach entgegengewirkt werden kann.

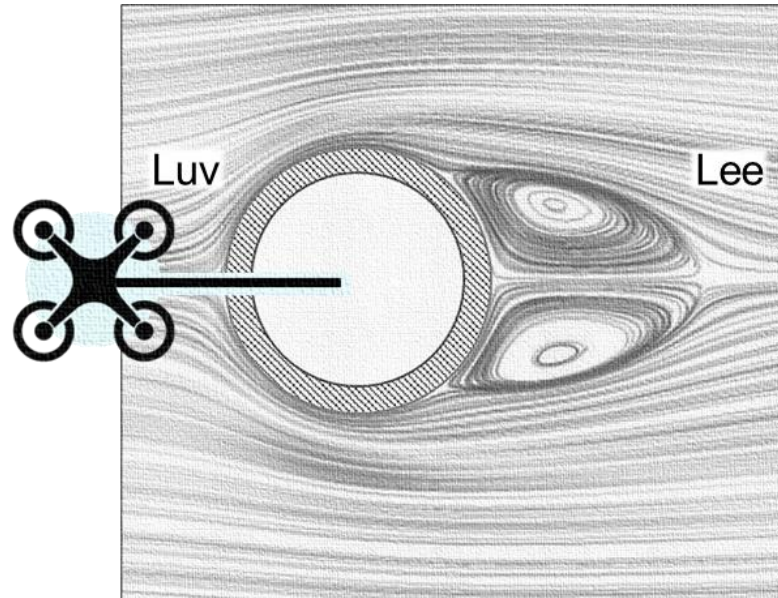


Abbildung 31: Übersicht der Simulation von der Umströmung eines Zylinders basierend auf Bühler und Kachel mit Anflugsrichtung von der Luv-Seite.

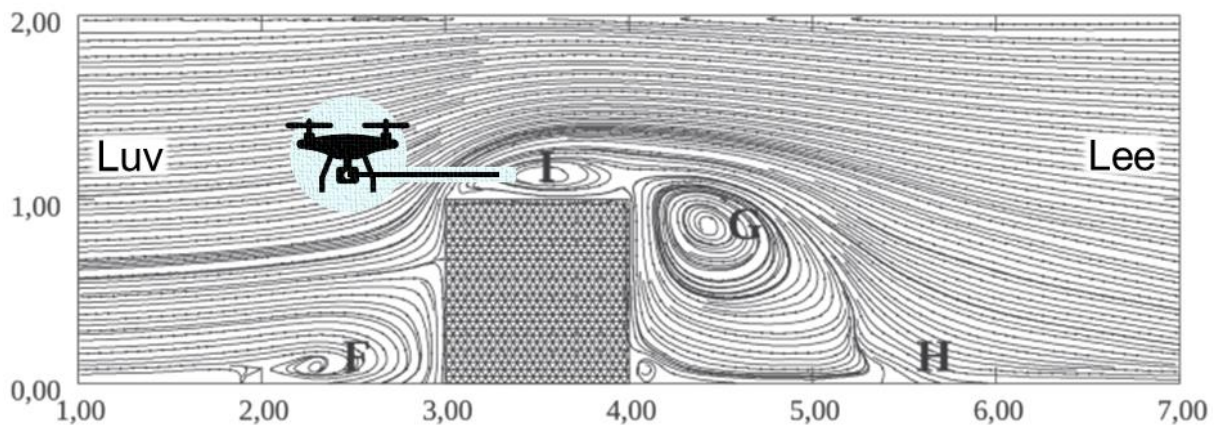


Abbildung 32: Seitenansicht der Umströmung eines Würfels nach Ferziger u.a. mit Anflugsrichtung von der Luv-Seite. Zu Erkennen sind die Trennzone in der stromaufwärts gelegenen Ecke (F), der Kopf des Bogenwinkels (G), die Wiederanlegelinie (H) und die Rezirkulationszone (I).

Daraus folgt, dass der Luv-Standort eine akkurate und stabile Positionierung der Drohne in unmittelbarer Nähe des Schornsteinauslasses ermöglicht. Dies resultiert in einer insgesamt stabileren Flugbahn der Drohne, was sowohl die Manövrierfähigkeit als auch die Flugkontrolle während der Probenahme betrifft. Diese Präzision ist von entscheidender Bedeutung, um eine möglichst exakte Beprobung der Emissionen zu gewährleisten.

Die geringere Störung durch Turbulenzen vereinfacht zudem die Manipulation der Probenahmegeräte an der Drohne, was wiederum die Wahrscheinlichkeit von Messfehlern minimiert.

4.4 Entwicklung von Methoden zur Analyse von mobilen Messdaten

Da der InfraSampler erst im Laufe dieser Doktorarbeit fertig entwickelt worden ist und somit im Rahmen dieser Arbeit zum ersten Mal für Messflüge eingesetzt wurde, mussten zunächst einmal Methoden zur Analyse von mobilen Messdaten entwickelt werden.

Grundsätzlich muss zwischen Daten durch mobile Messungen und Daten aus stationären Untersuchungen unterschieden werden. Während der Fortbewegung ändern sich Umweltbedingungen schneller und häufiger und es wird Einfluss auf die direkte Umgebung vorgenommen. Die Temperatur ändert sich dann zum Beispiel nicht mehr nur mit dem Sonnenstand, sondern auch mit den Gegebenheiten des Ortes, an dem sich das Messmodul befindet. Ein weiteres Beispiel ist die unterschiedliche Dichte an lokalen Luftverschmutzungsquellen innerhalb eines Industriegeländes. Das bedeutet, dass eine weitere Dimension der Messdaten erzeugt wird, die bei der späteren Analyse relevant ist. Die Variation eines Messparameters hängt nicht mehr nur von zeitlichen Veränderungen, sondern auch von der räumlichen Inhomogenität der Atmosphäre ab. In Tabelle 4 sind mögliche Einflüsse auf die Messdaten einer Flugmission aufgezählt. Eine Einteilung findet anhand der Einflussfaktoren statt.

Tabelle 4: Mögliche Einflüsse auf gesammelte mobile Messdaten.

Emissionsmerkmale	Quellenmerkmale	Standortmerkmale	Meteorologische Merkmale
Schadstoffe	Quellentypen	Standort	Temperatur
Schadstoffmerkmale	Quellendimensionen	Gelände	Windgeschwindigkeit
Verteilung der Quelle(n)	Volumen-emissionsraten	Oberflächenrauigkeit	Windrichtung
Emissionsraten	Temperatur	Grenzflächen von Land und Wasser	Atmosphärische Stabilität/Turbulenz
	Feuchtigkeitsgehalt	vorhandene Schadstoffwerte	Sonnenstrahlung
	Vorhandensein von Infrastruktur		Bewölkung
			Feuchtigkeit

4.5 Entfernung atmosphärischer Verdünnungseffekte

Bei jeder Probenahme können atmosphärische Verdünnungseffekte zu einer Verfälschung der Probe führen, die nur bedingt durch technische und organisatorische Maßnahmen reduziert werden. In Tabelle 5 sind die Maßnahmen aufgeführt, die bei Probenahmen mit dem InfraSampler v1.0 & 2.0 angewendet wurden. Die technischen Maßnahmen beziehen sich auf die Verwendung der Probenahmelanze und des Schlauchaufsatzes, wie in Kapitel 3.1.1 erläutert.

Organisatorische Maßnahmen umfassen die Überprüfung der Windgeschwindigkeiten, die den Betriebsgrenzen des UAV entsprechen müssen, die Betriebsabsprache für repräsentative Probenahmen bei gleichen Betriebszuständen sowie die Festlegung der Probenahmerichtung zum Kamin gemäß Kapitel 4.3.3. Im Gegensatz zu Messfahrten, welche eine größere Strecke zurücklegen als die hier angewendeten lokalen Flugmissionen, wurde auf eine Kategorisierung der Datenpunkte anhand von Flugvideos verzichtet. Im Fall von Transmissionsmessungen über unterschiedlichen Gebieten (z.B. Straßen, Schienen, landwirtschaftlich genutzte Flächen oder Deponien) ist eine Einbeziehung der Videos wiederum sinnvoll, da hier von unterschiedlichen Kontaminationen ausgegangen werden muss. Unbeantwortete Fragen ergeben sich nur hinsichtlich der Einbeziehung von Indikatoren für die Bewertung von Konzentrationsspitzen und Verdünnungseffekten.

Tabelle 5: Maßnahmen zur Vermeidung von atmosphärischen Verdünnungen.

Technische Maßnahmen	Organisatorische Maßnahmen
Probenahmelanze	Planung nach Windgeschwindigkeit
Schlauchaufsatz	Absprache mit Betrieb
Einbezug der Indikatoren CO ₂ und O ₂	Probenahme von Lee
Analyse der Flugvideos	

4.5.1 Methode zur Entfernung atmosphärischer Verdünnungseffekte

Die atmosphärische Verdünnungseffekte wurden während der Probenahme über den Indikator-Parameter CO₂ überwacht. Der gewählte Indikator hängt stark vom Probenahmepunkt ab, beispielweise kann bei Verbrennungsprozessen normalerweise CO₂ als Indikator gewählt werden. In anderen Fallbeispielen, z.B. Erdgasaufreinigung oder Probenahme in Kläranlagen können als Indikatoren auch CH₄ oder VOC sinnvoll sein. Mit den atmosphärischen Verdünnungseffekte wird die Heterogenität der Probe beschrieben. Die IUPAC definiert die Heterogenität als „Der Grad bis zu dem eine Eigenschaft oder ein Bestandteil gleichmäßig über eine Materialmenge verteilt ist.“ (Horwitz 1990). Damit gehört die Heterogenität zu den wichtigsten Faktoren, die zu der mit der drohnenbasierten Probenahme verbundenen Unsicherheit beiträgt. Die Analyse von Einzelproben, die aus unterschiedlichen Positionen innerhalb des Emissionspunktes entnommen wurden, zeigt, dass die Konzentrationen des Analyten in dem untersuchten heterogenen Reingas variieren. Diese Heterogenität spiegelt sich typischerweise in einer Proben-zu-Proben-Variation der Analytkonzentration wider und trägt signifikant zur beobachteten Streuung der analytischen Ergebnisse bei. Da die genaue räumliche Verteilung der Analytkonzentration in der Regel unbekannt ist, kann keine adäquate Korrektur dieser Variation vorgenommen werden. Aus diesem Grund wird der Indikatorparameter, welcher die Stoffverteilung über die gesamte Probenahme aufzeichnet, verwendet. Damit können die inhärenten atmosphärischen Verdünnungen in den individuellen Messergebnissen sowie in der Berechnung von Mittelwerten aus einer Reihe solcher Ergebnisse korrigiert werden. Zusätzlich stellt die IUPAC zu der obigen Definition fest, dass „der Grad der Heterogenität (das Gegenteil von Homogenität) der entscheidene Faktor des Probenahmefehlers ist“ (Horwitz 1990). Diese Ergänzung ist eine klare Aussage über die Bedeutung der Heterogenität bei der Probenahme. Es existieren weitere Fehler- und Unsicherheitsquellen im Kontext der allgemeinen Durchführung von Probenahmen, wie etwa Kreuzkontaminationen und

unzureichende Stabilisierung der Proben, welche beide zu einem unbekanntem Bias oder zusätzlicher Variabilität führen können. Dennoch bleibt die Heterogenität der Probe und ihre Auswirkungen z.B. die zufällige Variabilität und der Stichproben-Bias, das vorrangige Problem selbst bei ordnungsgemäß durchgeführten Probenahmen. In der Regel stellt die Heterogenität somit die bedeutendste Quelle der Unsicherheit dar. Aufgrund der hochvariablen Messwerte bei jeder Probenahme ist es nicht möglich, eine eindeutige Stammfunktion zu bilden. Sie fallen damit unter die „nicht elementar integrierbaren“ Funktionen, sodass nur numerische Integrationsmethoden verwendet werden. Die Integrationsintervalle variieren je nach Messauflösung. Die Messauflösung der InfraSampler-Module betragen 3 s für die Version 1.0 und 1 s für die Version 2.0. Die gesammelten Datenpunkte einer Probenahme wurden nach der Trapezregel (13) numerisch integriert, sowie eine theoretisch vollständige Probenahme mit den vorgegebenen Prozessparametern (Abbildung 33). Die Trapezregel bietet eine einfache und dennoch effektive Möglichkeit zur numerischen Integration. Sie basiert auf der Idee, eine Funktion durch trapezförmige Abschnitte zu approximieren, die durch die Werte der Funktion an den Stützstellen definiert sind.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \left[f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih) + f(b) \right] \quad (15)$$

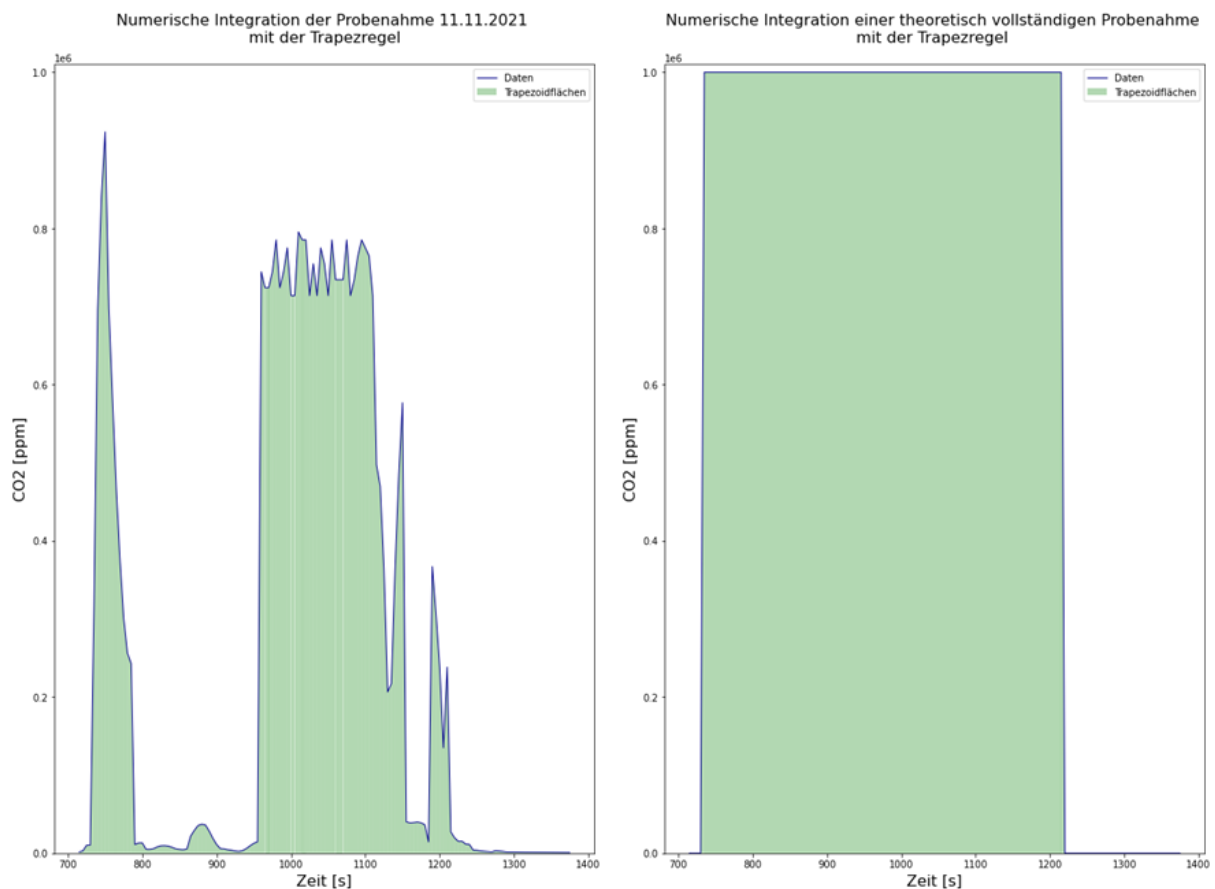


Abbildung 33: Reales Integral einer Probenahme mit 171.023.918 ppm (links) und theoretisches Integral einer vollständigen Probenahme mit 485.000.000 ppm (rechts).

4.6 Planung und Realisierung der individuellen Einsätze

Die Planung der individuellen Einsätze behandelt die vorbereitenden Maßnahmen zur Durchführung einer Probenahme mittels UAV. Dabei kann die Vorbereitung in die Flugvorbereitung und Probenahmepvorbereitung aufgeteilt werden.

Zur Durchführung der Probenahme sind Regelungen und Richtlinien für das UAV zu beachten, hierbei wird im folgenden Kapitel Bezug auf die European Union Aviation Safety Agency (EASA) genommen. Der Fernpilot ist verpflichtet ein Flugbuch und eine Checkliste für UAV (Anlage 9.7) zu führen. In diesen Listen werden Flugvorbereitungen, Wetterdaten und örtliche Gegebenheiten dokumentiert. Die wichtigsten Punkte, welche es zu beachten gilt, sind folgend aufgelistet:

- Start- und Landeerlaubnis einholen
- Prüfen der Luftraumstrukturen mit einer ICAO-Karte (International Civil Aviation Organisation)
- Notice To Airmen (NOTAM)
- Meteorological Aerodrome Report (METAR)

Laut der Luftverkehrsordnung (LuftVO) ist zu beachten, dass ein seitlicher Abstand von 100 m zu Bahn- und Industrieanlagen, sowie Bundeswasserstraßen einzuhalten sind. Für den Standort IPH bestand zum Zeitpunkt der Messflüge eine Betriebsgenehmigung, sodass Anforderungen aus der offenen Kategorie übergangen werden konnten. Um Komplikationen zu vermeiden, wird der UAV-Einsatz bei der Gefahrenabwehrmeldezentrale (GAMZ), dem Ermittlungsdienst, den benachbarten Gebäudeverantwortlichen und der Messwarte des jeweiligen Betriebes angemeldet und bei Einsätzen an den Industrieparkgrenzen zusätzlich das zuständige Ordnungsamt informiert.

Am Vorabend jedes Messtages verschaffte man sich einen Überblick über die zu erwartende Wetterlage, um die Ausbreitungsrichtung der Abluffahne zu ermitteln. Dazu wurde das UBIS-System und Wettervorhersagen verwendet. Die Entscheidung, welche Strategie die erfolgversprechendste für die bevorstehende Messung ist, wurde je nach Fragestellung getroffen. Welche Kriterien hierbei relevant sind, ist in den vorangegangenen Abschnitten (Kapitel 4, S.- 42 -ff.) diskutiert worden. Anschließend wurde Kartenmaterial in Form von Faltkarten und digitalen Karten herangezogen, um die genaue Flugroute festzulegen. Es wurde dabei besonders darauf geachtet, dass möglichst wenige Einflüsse in unmittelbarer Nähe zum Messort zu erwarten sind und sich keine Ex-Bereiche in der Flugroute befinden. Stationäre Messstandorte wurden so ausgewählt, dass windaufwärts keine relevanten Emissionsquellen in der Nähe lagen und sich der Probenahmepunkt in einer Mindesthöhe von 2,5 m befindet. Des Weiteren wurde bei stationären Messungen auf eine freie Anströmung der Luftmassen zum Messort geachtet, was Positionen in Gebäudeschluchten ausschloss.

Eine vollständige Auflistung der Vorbereitung einer Flugmission mit geplanter Probenahme ist in Abbildung 34 dargestellt.

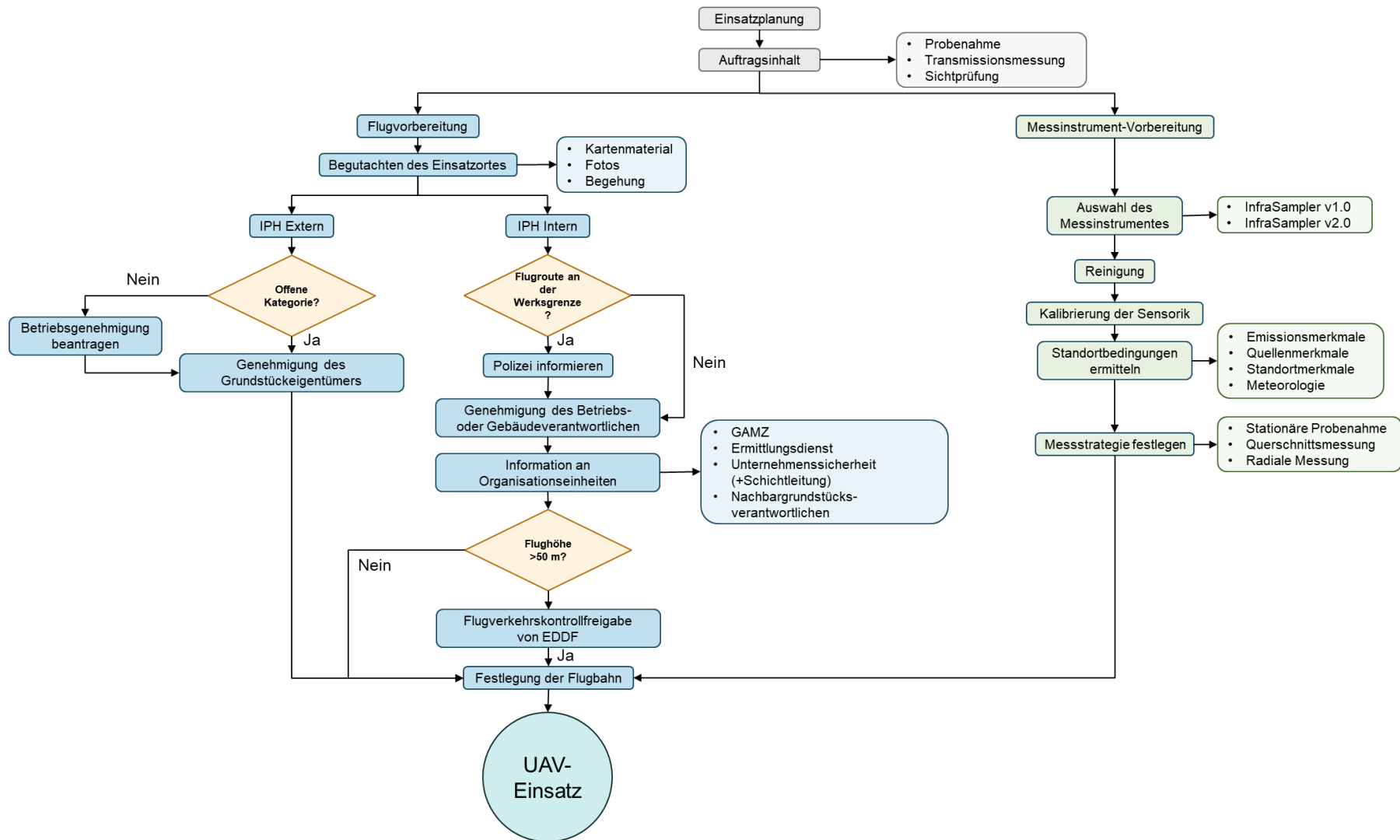


Abbildung 34: Einzelschritte bis zum Start einer Flugmission. Die Vorbereitung ist in die Vorbereitung des Fluges und der Messinstrumente aufgeteilt. Dabei besteht die Flugvorbereitung ausschließlich aus dem Einholen der Fluggenehmigungen.

In Abbildung 35 sind die Einzelschritte aufgeführt, welche nach einer Fluggenehmigung absolviert werden müssen, um anschließend die Flugmission mit Probenahme durchführen zu dürfen. Die einzelnen Punkte orientieren sich dabei an Vorgaben der EASA, sowie Erfahrungswerten, um einen reibungsfreien Ablauf zu gewährleisten. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass alle Missionen nur von einem geschultem Fernpiloten mit einem A2 Flugschein durchgeführt werden dürfen und die technische Wartung des UAS ebenfalls nur durch geschultes Personal erfolgt.

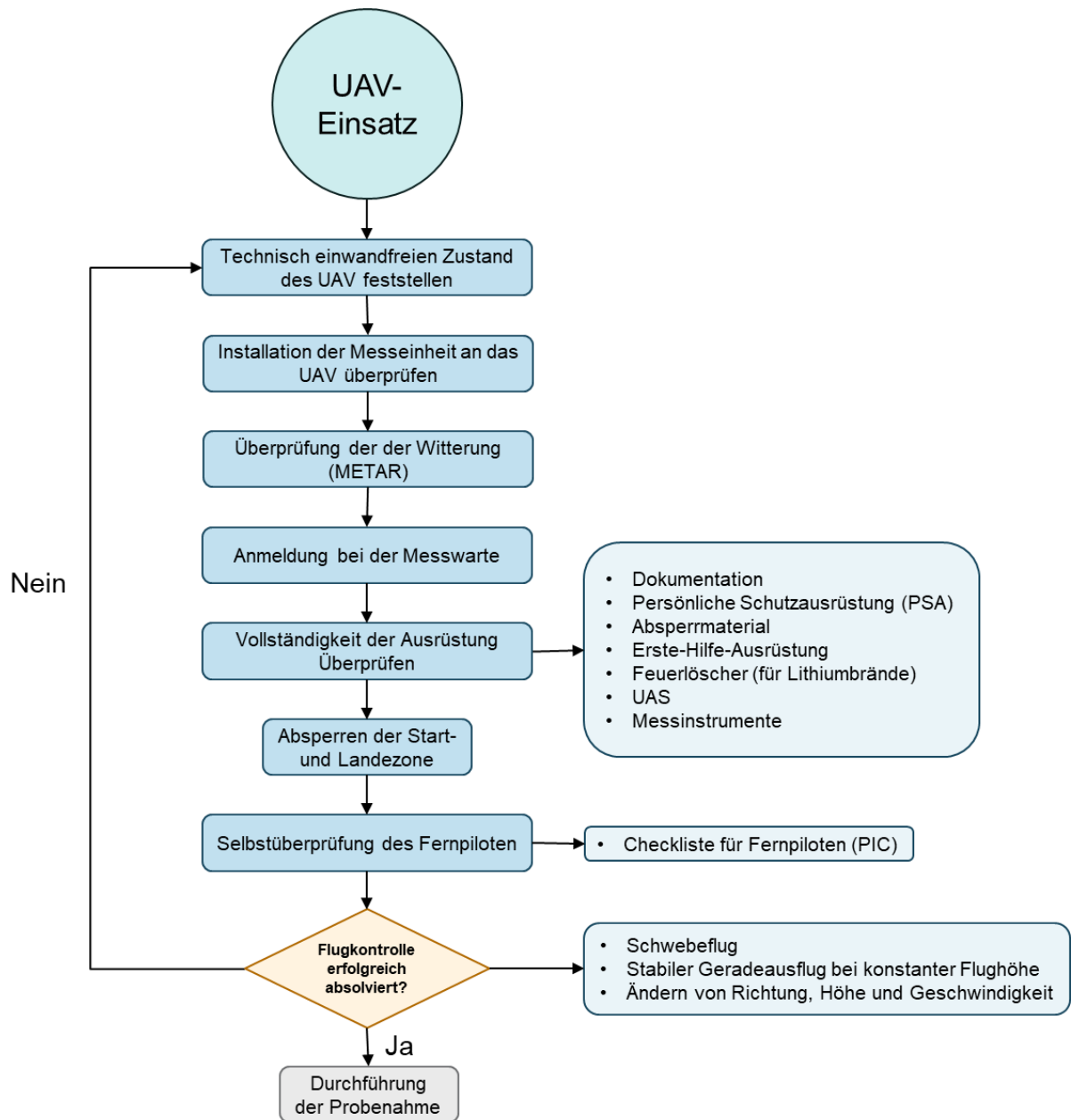


Abbildung 35: Einzelschritte bis zum Start der Probenahme.

5 Fallstudien

Im folgenden Kapitel werden die Fallstudien vorgestellt, in welchen drohnenbasierte Messkonzepte durchgeführt und bewertet wurden. Vergleichsmessungen mit Referenzmethoden gewährleisten die Reproduzierbarkeit und Qualität der erfassten Messdaten. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.3.

5.1 Olfaktometrische Charakterisierung von Abluft

Die vorliegende Fallstudie basiert auf Untersuchungen von Geruchsemissionen in Abhängigkeit von Betriebszuständen einer Anlage mit einem geruchsbeladenen CO₂ reichen Abgas. Die Anlage wurde als Teststandort für Probenahmen mit Hilfe von UAV und dem InfraSampler-System aufgrund der Lage und der günstigen Abgaszusammensetzung (CO₂ und H₂O) ausgewählt.

5.1.1 Hintergrund der Fallstudie

In vorrausgehenden Arbeiten wurde der Zusammenhang zwischen den Anlagenzuständen und der Geruchsentwicklung in angrenzenden Gebieten diskutiert. Dazu wurden verschiedene Untersuchungen und Analysen durchgeführt, wie die Sichtung und Überprüfung der Geruchsbeschwerden der Anwohner, die Auswertung der Begehungsdaten, sowie Abgasuntersuchungen am Kamin der Anlage. Die Ergebnisse der Untersuchungen und Analysen zeigten einen Zusammenhang zwischen den Anlagenzuständen und der Geruchsbelastung, jedoch konnte dieser statistisch nicht belegt werden. Es wurde empfohlen, weitergehende Untersuchungen unter Berücksichtigung der Daten des Sensornetzwerks der elektronischen Nasen durchzuführen, um die Geruchslage in 24-Stunden-Überwachung zu ermöglichen.

5.1.2 Beprobungsort

Die technische Umsetzung der Biogasherstellung wird im Industriepark Höchst von der CFA durchgeführt (Abbildung 36). Die 2007 gebaute CFA der Infraser GmbH & Co. Höchst KG besteht aus zwei baugleichen Fermentern, welche beide als einphasig Reaktoren betrieben werden. Die Temperaturen in den Fermentern, die mit dem Nassverfahren betrieben werden, sind mesophil. Das Substrat, bestehend aus Überschussschlamm der Abwasserreinigungsanlage und diversen Co-Substraten, wird den Fermentern kontinuierlich zugegeben. Die Anlage ermöglicht eine Biogasproduktion von ca. 80.000 Nm³/d.



Abbildung 36: Co-Fermentationsanlage der Infraserb GmbH & Co. Höchst KG. (Infraserb GmbH & Co. Höchst KG, 2022)

Das Rohgas aus dem Fermentationsprozess der CFA enthält neben dem Zielprodukt Methan auch noch andere, unerwünschte Bestandteile. Der mengenmäßig größte Bestandteil der unerwünschten Begleitprodukte ist CO_2 . Dieses verringert den Brennwert des Rohgases, da es bei einer thermischen Verwertung nicht umgesetzt werden kann. Andere der Begleitstoffe können korrosiv auf Rohrleitungen wirken oder zu toxischen Reaktionen beim Menschen führen. Um ein möglichst reines Endprodukt zu erhalten sind daher Aufreinigungsverfahren notwendig.

Der nachgeschaltete Aufreinigungsprozess arbeitet nach dem Prinzip eines chemischen Wäschers. Nachdem das Rohgas der CFA den Kiesfilter passiert hat, erfolgt eine Druckerhöhung durch zwei parallele Verdichter. Diese leiten das Rohgas in den nachgeschalteten Prozess ein. In Abbildung 37 sind die einzelnen Aufreinigungsschritte schematisch dargestellt. Nach der Aufreinigung wird das Biogas an die Biogaseinspeiseanlage (BGEA) weitergeleitet.

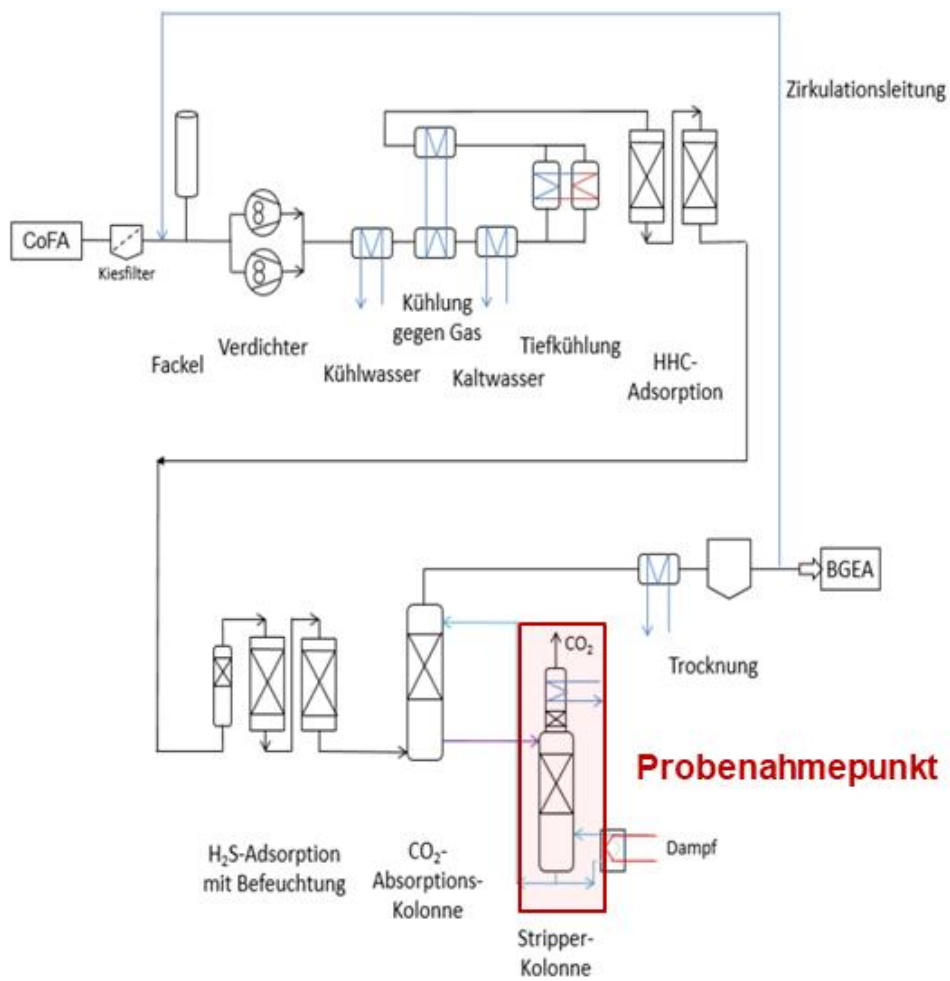


Abbildung 37: Beispielhafter Aufreinigungsprozess von Biogas mit schematischer Darstellung eines Verfahrensfliessbildes. (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, 2010)

Die Probenahmen an der Anlage fanden immer während Normalbetrieb statt. In Tabelle 6 sind die typischen Betriebsdaten einer Biogasaufreinigungsanlage dargestellt. Die großen Bereiche sind dabei auf die unterschiedlichen Anlagengrößen zurückzuführen.

Tabelle 6: Typische Auslegungsdaten von Kaminen nach Stripperkolonnen.

Reingas	Einheit	Auslegung
Volumenstrom	m ³ /h	80 – 10.0000
Kohlenstoffdioxid-Konzentration (CO ₂)	Vol.-%	> 60
Wassergehalt (H ₂ O)	Vol.-%	> 60
Temperatur	°C	20 – 40
Höhe der Ausblasöffnung	m	10 – 30

5.1.3 Messaufbau

In dieser Fallstudie haben wir den InfraSampler v1.0 für die Probenahme verwendet. Beachten Sie, dass sich dieser Probenehmer in vielerlei Hinsicht von dem ab Kapitel 3 ff. beschriebenen InfraSampler v2.0 unterscheidet. Diese Unterschiede basieren auf den Erkenntnissen und Erfahrungen, die in dieser Fallstudie gewonnen wurden. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Weiterentwicklung und Anpassung des InfraSamplers, um die Effizienz und Genauigkeit der zukünftigen Probenahme zu verbessern.

Zur Auswertung dieser Fallstudie wird im Folgenden der verwendete Messaufbau des InfraSampler v1.0 mit den aufgelisteten und beschriebenen Komponenten dargestellt (Abbildung 38).

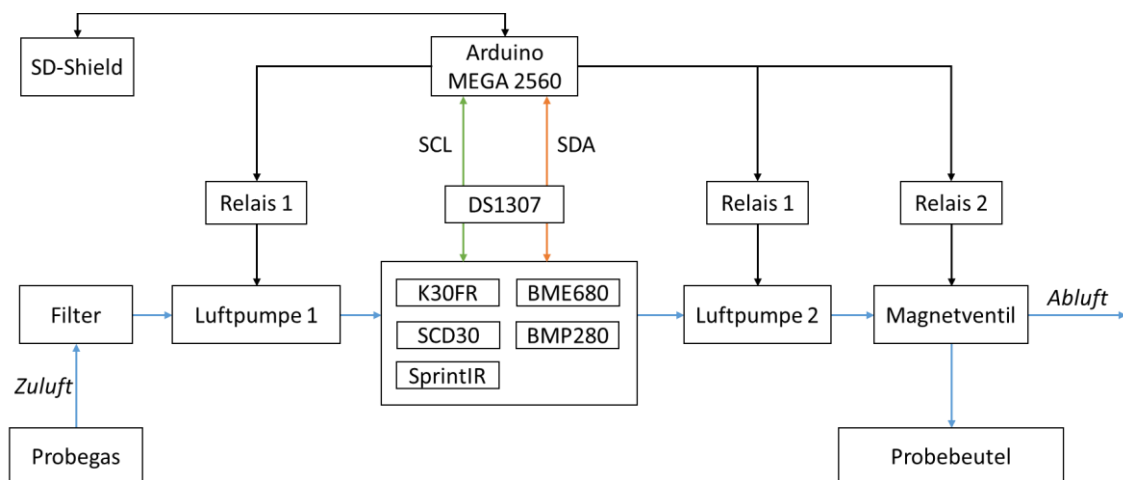


Abbildung 38: Schematischer Aufbau des InfraSampler v1.0

Das System enthält drei CO₂-Sensoren, der K30 FR (0 – 10.000 ppm CO₂, SenseAir, Delsbo Schweden), der SCD30 (0 – 40.000 ppm CO₂, Sensirion, Stäfa, Schweiz) und der SprintIR-6S (0 – 100 Vol.-%, Gas Sensing Solutions, Cumbernauld, England). Alle Sensoren beruhen auf dem Prinzip der nichtdispersiven Infrarot Absorption (NDIR). Dabei wird mit einem Spektrometer eine genaue Wellenlänge gemessen. Die Lichtquelle sendet Infrarot-Strahlung durch eine Messkammer, welche von den CO₂-Molekülen bei 4,26 µm absorbiert wird.

Die absorbierte Strahlung gelangt am Ende der Messkammer durch einen auf die Wellenlänge ausgelegten Filter in einen Detektor, dieser misst die Intensität der Strahlung (Roberts, 2014). Die CO₂-Sensoren sind in einer hermetischen Einheit platziert, welche Bestandteil des Gas Weges ist. Die Einheit ist zusätzlich mit Sensoren für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck (BME680 & BMP280) ausgestattet. Das ermöglicht die Bereinigung der Daten der benannten Umweltfaktoren. Alle Sensoren werden mit einer I²C-Verbindungen über den Arduino Mega 2560 auf eine Mikro SD, mit einer Abtastrate von 0,2 Hz übertragen. Das gesamte System mit Ausnahme des Arduinos wird mit zwei wiederaufladbaren 6 V NiMH-AA-Akkus in Reihe geschaltet betrieben. Das Arduino Mega 2560 muss mit einem separaten 9 V NiMH E-Block Akku versorgt werden. Über eine mit PVC-Schläuchen ausgelegte 1,7 m Carbonlanze wird das Reingas angesaugt. Ein PTFE-Filter (45 µm) am Gaseinlass verhindert das Eindringen von Partikeln in die Messeinheit. Das Gas wurde durch die Messeinheit mit zwei Membranpumpen mit einer Flussrate von 620 ml/min geleitet. Alle verwendeten Sensoren wurden am gleichen Messtag kalibriert. Das vollständige Modul ist über eine Aluminiumhalterung an der Landevorrichtung des UAV befestigt und wiegt 1,45 kg.

Tabelle 7: Technische Daten der verbauten Elemente im InfraSampler v1.0

Abschnitt		Stromversorgung			
Hersteller	RS Pro	Ansmann			
Beschreibung	AA Batterie	Akku E-Block			
Material	NiMH	NiMH			
Betriebstemp. [°C]	-10 ... 60	-20 ... 50			
Gewicht [g]	125	62			
Abschnitt		MCU			
Funktion	Mikrocontroller	Real Time Clock	SD-Karten Erweiterung		
Hersteller	Arduino	MikroElektronika	Seeed		
Beschreibung	Mega 2560 Rev3	RTC2click DS1307	SD-Card Shield v4.0		
Gewicht [g]	37	38	14,8		
Abschnitt		Gaseinlasssystem			
Funktion	Relais	Luftpumpe	Magnetventil		
Hersteller	Parallax Inc.	RS Pro	Bürkert		
Betriebstemp. [°C]	-25 ... 70	-20 ... 100	0 ... 50		
Gewicht [g]	15	34	30		
Abschnitt		Umweltsensoren			
Funktion	p [hPa], rH [%], T [°C]			CO ₂ [ppm]	
Hersteller	Adafruit	DEBO	Sensirion	GSS	Sense-air
Beschreibung	BME680	BMP280	SCD30	SprintIR-6S	K30FR
Betriebstemp. [°C]	-40 ... +70				
Gewicht [g]	3	1	5	15	15

Abschnitt	weitere Komponenten		
Funktion	Luftschlauch	Daten- /Stromübertra- gung	Widerstände
Hersteller	Tygon	AZ-Delivery	Vishay BC
Material	Schlauch R- 3603	Jumper Wire	CBR-12 (0207)
Betriebstemp. [°C]	-50 ... 74	-	-

5.1.4 Problemstellung

Die Stripperkolonne verfügt eine Probenahmestelle in rund 14 m Höhe, welche mit der Bezeichnung „E1“ für offizielle Messungen und Gasentnahmen genutzt wird (Abbildung 39). Der Zugang ist nur mit einer Hebebühne möglich, die während der gesamten Dauer der Messung an der Probenahmestelle ausgefahren bleiben muss, da keine Möglichkeit besteht, das Messgerät dauerhaft an der Probenahmestelle abzustellen. Aufgrund dieser Einschränkungen sind Probenahmestellen am Kopf von Stripperkolonnen nicht für Langzeitstudien geeignet. Da ein drohnenbasierter Einsatz eine einfache Beprobungsmöglichkeit des Kamins darstellt, konnte an dem Standort eine praktische Beurteilung der mobilen Messstrategie durch den Infra-Sampler erfolgen, indem die Besprobung am Kamin stattfand.



Abbildung 39: Reguläre Probenahmestelle „E1“ und „E1-Ersatz“ für Reingase an der Stripperkolonne.

5.1.5 Durchführung der Probenahme

Vor der Durchführung der Probenahme wurden alle Vorbereitungen aus dem Kapitel 4.3, S.- 48 - ff. realisiert und die benötigten Genehmigungen eingeholt. Die Emissionsmessungen an dem Kamin der Stripperkolonne erfolgte an drei unterschiedlichen Tagen. Die Probenahmetage mit der vorherrschenden Witterung sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Witterungsverhältnisse an den Probenahmetagen. WG = Windgeschwindigkeit, WR = Windrichtung, rH = relative Luftfeuchtigkeit, T = Temperatur

Datum	Uhrzeit	WG [m/s]	WR _{aus} [°]	rH [%]	T [°C]	p [hPa]
12.10.2021	8:00 – 11:00 Uhr	4,00	SSW	95,3	10,0	1011
02.11.2021	8:00 – 11:00 Uhr	2,15	SSW	96,0	8,3	989
11.11.2021	8:00 – 11:00 Uhr	< 0,5	NNW	99,4	1,2	1012



Abbildung 40: Probenahme an dem Schoornstein nach der Stripperkolonne. Die drei Bilder a) bis c) zeigen das UAS während der Probenahme. Erkennbar ist, wie sich der Probenahmebeutel über den Zeitraum von acht Minuten füllt.

5.2 Stationäre Messkampagne im IPH

Im folgenden Kapitel werden alternative Messsysteme zur Immissionsüberwachung zu dem bestehenden Messsystem im IPH vorgestellt. Mikrosysteme für die Immissionsüberwachung bieten im Gegensatz zu festen Messstationen eine hohe räumliche Flexibilität der Messanwendung. Sie erlauben einfache Standortwechsel für stationäre Messungen und bieten die Möglichkeit eine Immissionsüberwachung zu betreiben, welche auf einem eingegrenzten Bereich eine höhere Dichte an Sensormodulen erlaubt, wie es bisher mit herkömmlichen Messstationen nicht möglich ist. Ausgestattet mit modernen Messinstrumenten mit hoher Messfrequenz können kleinskalige und fluktuierende Phänomene gut erfasst werden (z.B. Schluchten- oder Düseneffekte). Hinzu kommt der notwendige robuste Aufbau, um auch in hohen Konzentrationen belastbare Messergebnisse zu erzeugen. Die Infraser GmbH & CO. Höchst KG im Industriepark Höchst setzte 2021 zum ersten Mal das Immissionsüberwachungsmodul IMB, sowie ein Mikrosystem ein, um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Messsystemen und den Referenzmethoden zu ermöglichen. Die Ergebnisse aus der Studie, sollen den stationären Einsatz der Sensorik erfassen und anschließend den Anwendungsfall für den mobilen Einsatz (UAV-basiert) bewerten.

5.2.1 Lage des Beurteilungsgebietes

Der Industriepark Höchst liegt am westlichen Rand des Stadtgebietes von Frankfurt am Main im Untermain-Gebiet. Er wird im Westen, Südwesten, Osten und Nordosten eingegrenzt von Wohngebieten, die z. T. bis an die Grenzen des Industrieparks heranreichen. Die topografische Gliederung des Gebietes wird wesentlich geprägt durch den in Südwest/Nordost-Richtung verlaufenden Taunus (maximale Höhe 880 m) und den Main, der den Industriepark durchschneidet und parallel zum Taunus verläuft.

Der Taunus und in geringerem Maße auch der Main beeinflussen die klimatischen und meteorologischen Bedingungen des Gebietes und haben somit Einfluss auf die Verteilung der Luftschadstoffe in der Atmosphäre.

5.2.2 Aufbau des Messnetzes

Die kontinuierliche Immissionsüberwachung im Industriepark Höchst umfasst zurzeit insgesamt fünf mit automatischen Messgeräten bestückte Luftmessstationen, die an den Grenzen des Industrieparks so angeordnet sind, dass vor allem Geländebereiche mit Produktionsbetrieben abgedeckt werden (Abbildung 41). Die Messstation West ist eine akkreditierte Messstelle, an welcher alle Feldversuche durchgeführt wurden.

Die meteorologischen Parameter werden an der Luftmessstation West sowie auf dem Gebäude B598 in ca. 38 m Höhe (nur Wind) gemessen. Die Messstationen sind ganzjährig in Betrieb.

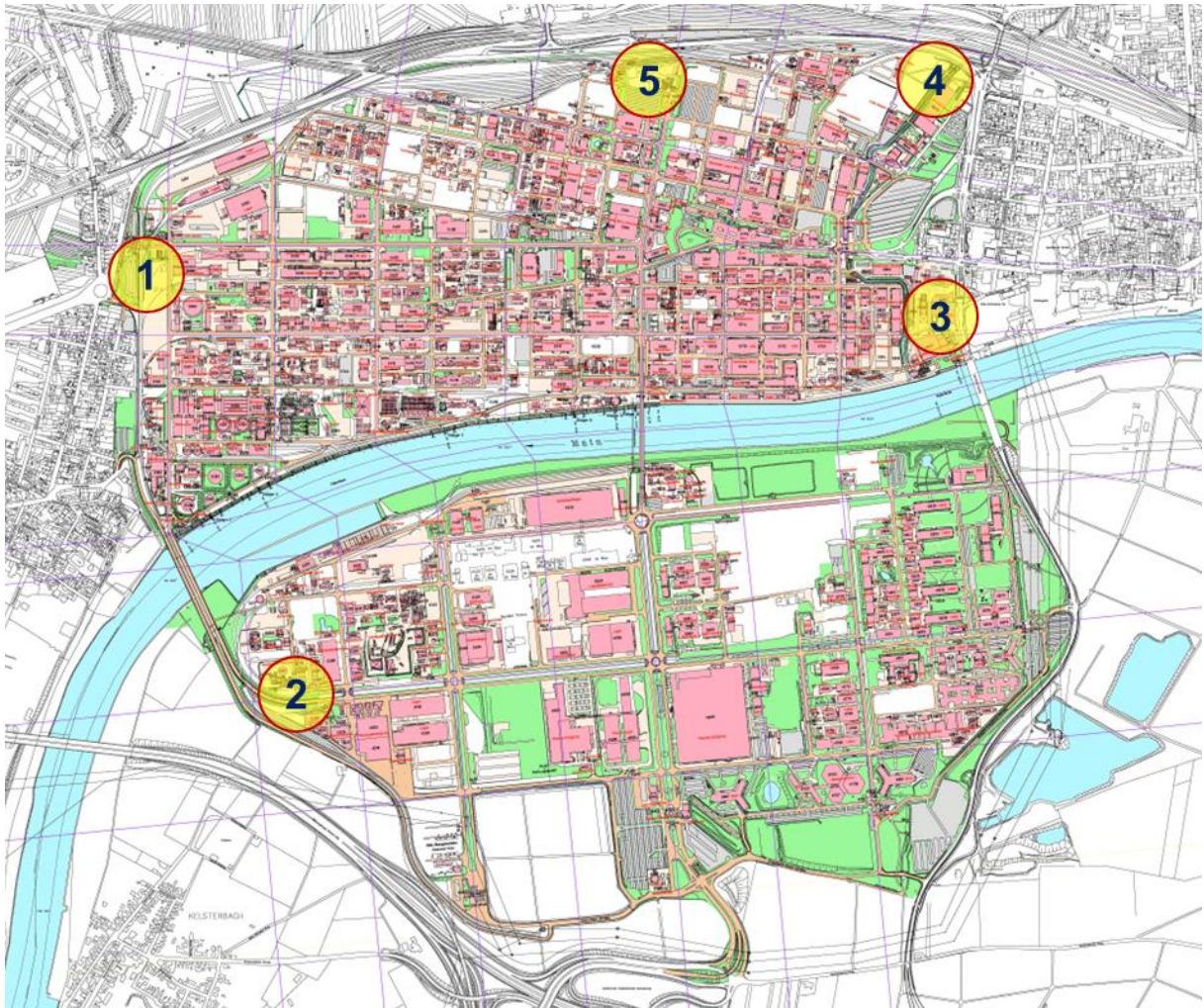


Abbildung 41: Industriepark Höchst mit den fünf eingezeichneten Luftmessstationen. 1.Messstation West (akkreditierte Messstelle), 2.Messstation Süd, 3.Messstation Ost, 4.Messstation Nord-Ost, 5.Messstation Nord. (Geodatenmanagement InfraserV Höchst, 2011)

5.2.3 Meteorologische Situation

Der Industriepark Höchst (IPH) mit einer Größe von 4,2 ha, befindet sich seit 1870 auf 50,09° nördlicher Breite und 8,5° westlicher Länge und gehört zur Metropole Frankfurt am Main. Das Industriegebiet befindet sich damit im Bereich der nördlichen Erdhalbkugel. Über das gesamte Jahr herrscht ein gemäßigtes Klima von durchschnittlich 25 °C in Sommer und 3 °C im Winter. Die Temperatur kann auch lokal von den Aktivitäten in den Produktionsanlagen beeinflusst werden, da viele Prozesse Wärme emittieren. Im Allgemeinen zeichnet sich das Gebiet durch geringe Temperaturschwankungen (± 5 °C) und einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 70 % aus. Aufgrund der Nähe zum Fluss Main ist die Luftfeuchtigkeit im Industriepark Höchst im Vergleich zu anderen Teilen von Frankfurt a.M. höher. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit liegt bei etwa 11 km/h. Die Windrichtung variiert je nach Wetterlage und Tageszeit, aber in der Regel weht der Wind aus südwestlicher Richtung.

Stickstoffdioxid (NO₂)		MICS-6814
Kohlenstoffmonoxid (CO)		SGX Sensortech
Ammoniak (NH₃)		
	Metalloxid-Halbleiter (SnO₂)	Honeywell
Schwefeldioxid (SO₂)		4SO2-20
		CLE-0421-400
Ozon (O₃)		MQ-131
Leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC)		BME680

5.2.4.2 Immissionsüberwachungsmodul

Bei dem Immissionsüberwachungsmodul von Bosch handelt es sich um ein System mit aktiver Ansaugung, sowie zwei temperierten Messkammern, um alle Messungen unter konstanten Bedingungen durchzuführen. Eine Messkammer wird ausschließlich für Feinstäube verwendet, während die zweite Messkammer mit Gassensorik ausgestattet ist.

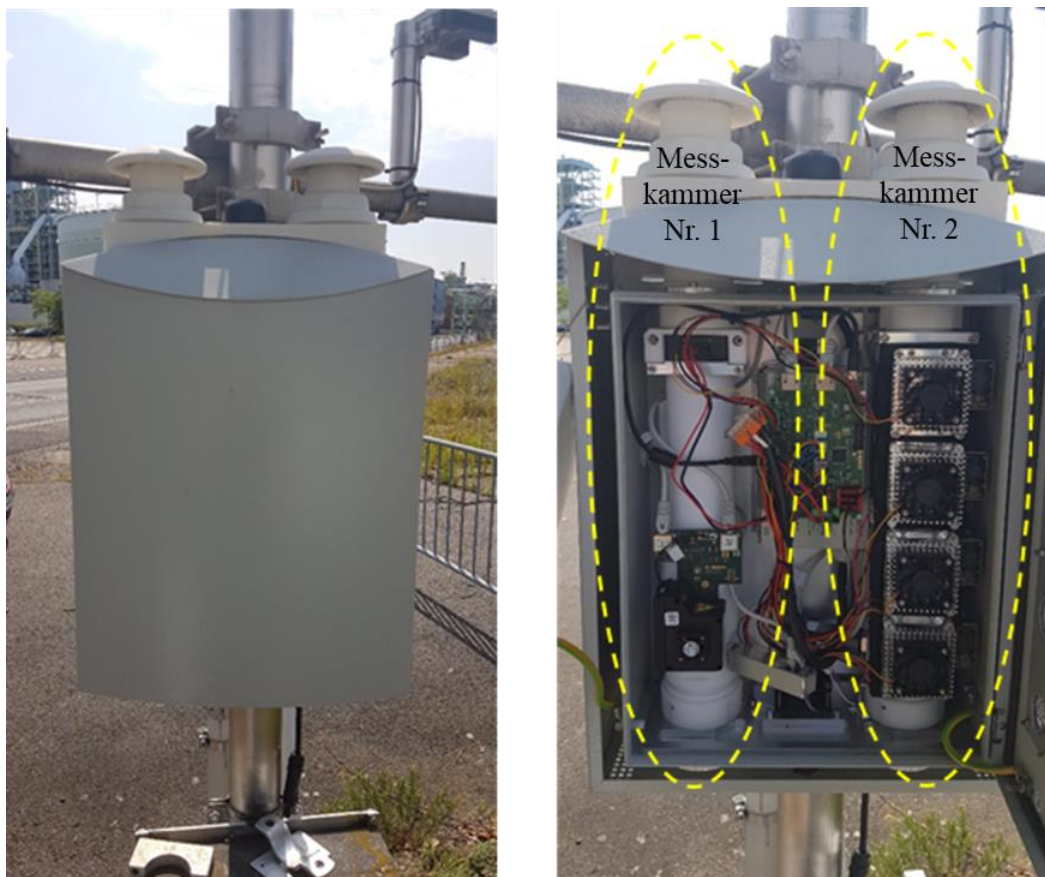


Abbildung 43: Immissionsüberwachungsmodul, geschlossen und offen. In der Messkammer 1 befindet sich die Sensorik zur Feinstaubmessung und in der Messkammer 2 die Gassensorik.

Tabelle 10: Verwendete Sensoren des Immissionsüberwachungsmodul.

Parameter	Methode	Modul
Temperatur		
Relative Luftfeuchtigkeit	MEMS	Modul von Bosch

Feinstaub	PM 2,5 PM 10	Optischer Partikelzähler	SEN50
Stickstoffdioxid (NO ₂)			
Ozon (O ₃)		Elektrochemisch	Modul von Bosch
Kohlenstoffmonoxid (CO)			
Schwefeldioxid (SO ₂)			

5.2.4.3 Messstation IPH

Die Messstationen im IPH (Abbildung 41), insbesondere die Messstation West als notifizierte Messstelle, werden nach §29 BImSchG betrieben. Eine Überprüfung der Messstelle durchgeführt vom Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) findet mit zwei Ringversuchen alle fünf Jahre statt.

In den Messstationen werden alle Parameter mittels Referenzmethoden erfasst (Abbildung 44). Die Messstation West ist mit den meisten Messgeräten ausgestattet. Die anderen Messstationen unterscheiden sich nur hinsichtlich einer geringeren Anzahl von gemessenen Parametern. Die Ausstattung aller Messstationen ist in der Anlage 9.3 hinterlegt.



Abbildung 44: Beispielhafte Darstellung der Messstation Süd (links) im IPH mit den verwendeten Messgeräten (rechts). 1) NO_x-Messgerät 2) Kohlenwasserstoff-Messgerät 3) SO₂-Messgerät 4) Chlor-Messgerät 5) Prüfgasgenerator 6) Katalysator

5.2.5 Datenerfassung und Datenauswertung

Die Messgeräte der etablierten Messstationen sind über Stationsrechner an einen zentralen Rechner angeschlossen. Die Rechner erfassen die Messsignale sowie die mit übertragenen Statussignale, die der Erkennung von Störungen, Wartungsarbeiten, Kalibrierungen etc. dienen und errechnen für alle Messkomponenten die 5-min- und 30-min-Mittelwerte sowie für ausgewählte Stoffe zusätzlich die 60-min- und die 24-h-Mittelwerte. Darüber hinaus werden aus den Zeitreihen die Kenngrößen

- Arithmetisches Jahresmittel,
- höchster Einzelwert
- und Überschreitungshäufigkeit des zulässigen Höchstwertes gebildet.

Im Rahmen einer einjährigen Messkampagne, an denen die beschriebenen Module beteiligt waren, wurden Vergleichsmessungen zwischen den Messinstrumenten in den Mikrosystemen und Messgeräten der etablierten Messstationen im IPH durchgeführt. Dies dient zur Überprüfung wie groß die Übereinstimmung der einzelnen Messsysteme ist, die dadurch beeinflusst wird, dass beispielsweise unterschiedliche Aerosoleinlässe, unterschiedliche Messgeräte zur Messung gleicher Größen oder individuelle Auswertemethoden verwendet werden. Im Rahmen der Messkampagne wurden stündliche Vergleichsmessungen zwischen den Modulen und den Messstationen West und Süd des IPH durchgeführt. Die Messstationen erfassen dieselben Parameter mit Messinstrumenten zur Untersuchung von Aerosolpartikel und Spurengasen wie die Mikrosysteme.

In Tabelle 11 ist die Gesamtzeit der Vergleichsmessungen, während der Feldkampagne aufgeführt. Durch den Einsatz des Mikrosystems Systems, das bereits im Sommer 2021 in Betrieb genommen wurde, wird die Gesamtbetriebszeit der Luftmessstationen erheblich erhöht.

Tabelle 11: Gesamtzeit der Messkampagne mit Start- und Endzeitpunkt der Messintervalle, aller Messsysteme.

Messsystem	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	Gesamtzeit [h]
Messstation West und Süd	15.05.2021	01.12.2022	13.560
Immissionsüberwachungsmodul (IMB)	01.12.2021	01.12.2022	8.760
Mikrosystem ND00365BD	15.05.2021	04.04.2022	7.776
Mikrosystem ND00488BD	09.06.2022	04.11.2022	3.552
Mikrosystem ND00367BD	02.06.2021	04.04.2022	7.344
Mikrosystem ND00502BD	09.06.2022	26.08.2022	1.872

5.2.6 Messdatenintegrität

Im folgenden Kapitel wird die Vollständigkeit und Konsistenz der erzeugten Messwerte über den gesamten Messzeitraum vom 01.12.2021 bis zum 01.12.2022 dargestellt (Abbildung 45).

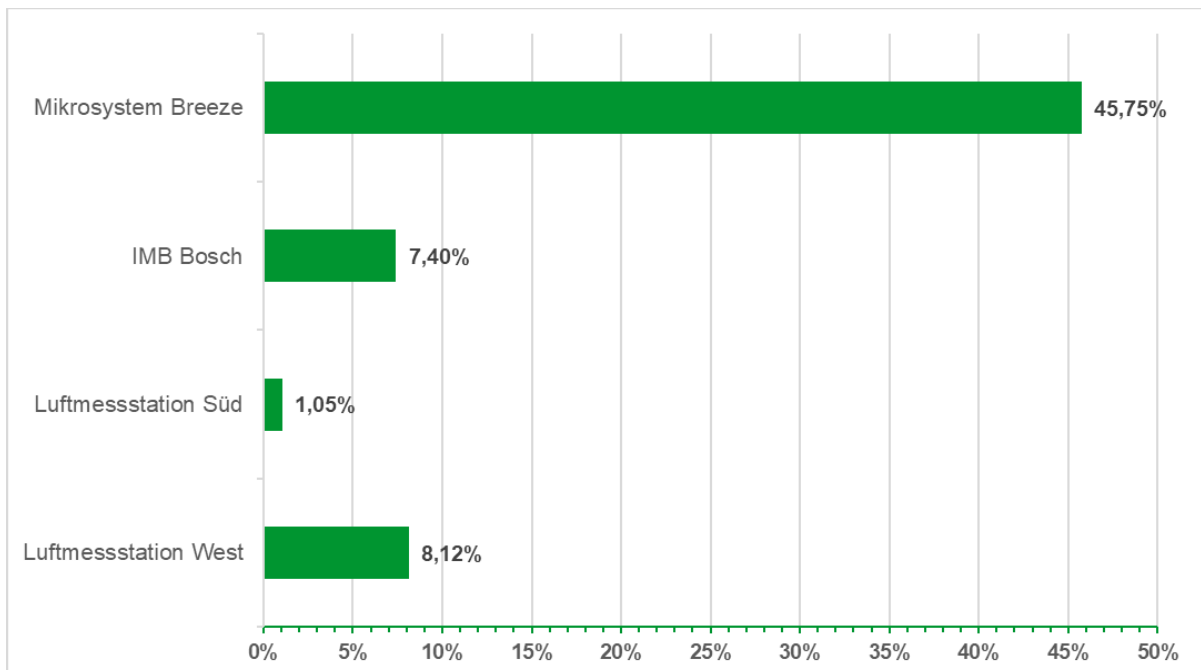


Abbildung 45: Darstellung des Datenverlustes über den Gesamtzeitraum von 12 Monaten, aufgeteilt in die unterschiedlichen Messsysteme.

Die Messstation Süd wies in dem Messzeitraum keinen signifikanten Datenverlust auf. Bei der Messstation West ist ein geringer Datenverlust von 8,12 % zu erkennen, welcher sich gleichmäßig über alle Parameter verteilt. Die Messwerte wurden in 5 Sekunden-Mittelwerten ausgegeben und zu Stundenmittelwerten zusammengefasst, um einen Vergleich mit den anderen Messsystemen zu ermöglichen.

Das Immissionsüberwachungsmodul wies einen Datenverlust von ca. 7,40 % auf. Ein Großteil ist auf den Parameter Feinstaub PM_{2,5} und Feinstaub PM₁₀ zurückzuführen, welcher aufgrund eines Softwareupdate die Datenaufnahme der Partikelzähler unterbrochen hat.

Der Datenverlust vom Mikrosystem wurde von den vier unterschiedlichen Mikrosystemen zusammengefasst. Aufgrund eines Hardwarefehlers war der Datenverlust so groß, dass das Messmodul in der Auswertung nicht vollständig berücksichtigt wurde. Im ersten Messhalbjahr traten keine signifikanten Datenverluste auf. Im zweiten Halbjahr kam es aufgrund von Hardwarefehlern zu einem Datenverlust aller Parameter von 45,75 %. Die Feinstaubmessungen des Systems lieferten zu keinem Zeitpunkt auswertbare Ergebnisse.

5.2.7 Korrelation der Messdaten

Anhand der folgenden beiden Korrelationsmatrizen ist zu erkennen, welche Parameter miteinander korrelieren (Abbildung 46). Die Matrizen beziehen sich auf den gesamten vergleichbaren Datensatz der Messkampagne im Süden und im Westen des IPH. Dabei sind Variablen wie

VOCs oder NH₃ nicht mitaufgeführt, da diese keinen Vergleich mit allen Systemen ermöglichen. Derartige Variablen werden gesondert betrachtet.

Die Korrelationsmatrix dient als Diagnose, um die Annahme der multiplen linearen Regression zu legitimieren, dass keine unabhängige Variable im Modell stark mit einer anderen Variable korreliert (Multikollinearität). In dieser Messkampagne müssen parameterbasiert Korrelationen aufgrund von Querempfindlichkeiten der Sensoren und wissenschaftlichen Grundsätzen auftreten, welche zur Legitimierung der Analysedaten herangezogen werden.

Wie zu erwarten, zeigt der rot eingefärbte Querschnitt (Abbildung 46), Korrelationen zwischen voneinander abhängigen Parametern (z.B. NO₂ mit O₃) und denselben Parametern unterschiedlicher Messsysteme (z.B. T, F oder O₃) an. Diese Korrelationen beweisen die Vergleichbarkeit der Messmodule und falls nicht vorhanden, weisen sie auf fehlerhafte Messparameter hin.

Auffällig sind die nicht auftretenden Korrelationen der Messung Feinstaub PM_{2,5} und PM₁₀. Das ist auf die Sensorik des Mikrosystems zurückzuführen, die keine auswertbaren Ergebnisse zu den Feinstäuben lieferten, gleiches trifft auf den Parameter SO₂ zu (Abbildung 46, links). SO₂ zeigt ebenfalls eine signifikante negative Korrelation zur Temperatur (Abbildung 46, rechts), welche bei der Auswertung berücksichtigt werden muss. Aufgrund des wissenschaftlichen Zusammenhangs zwischen NO₂ und O₃ ist eine negative Korrelation zu erwarten, gleiches trifft auf die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit zu.

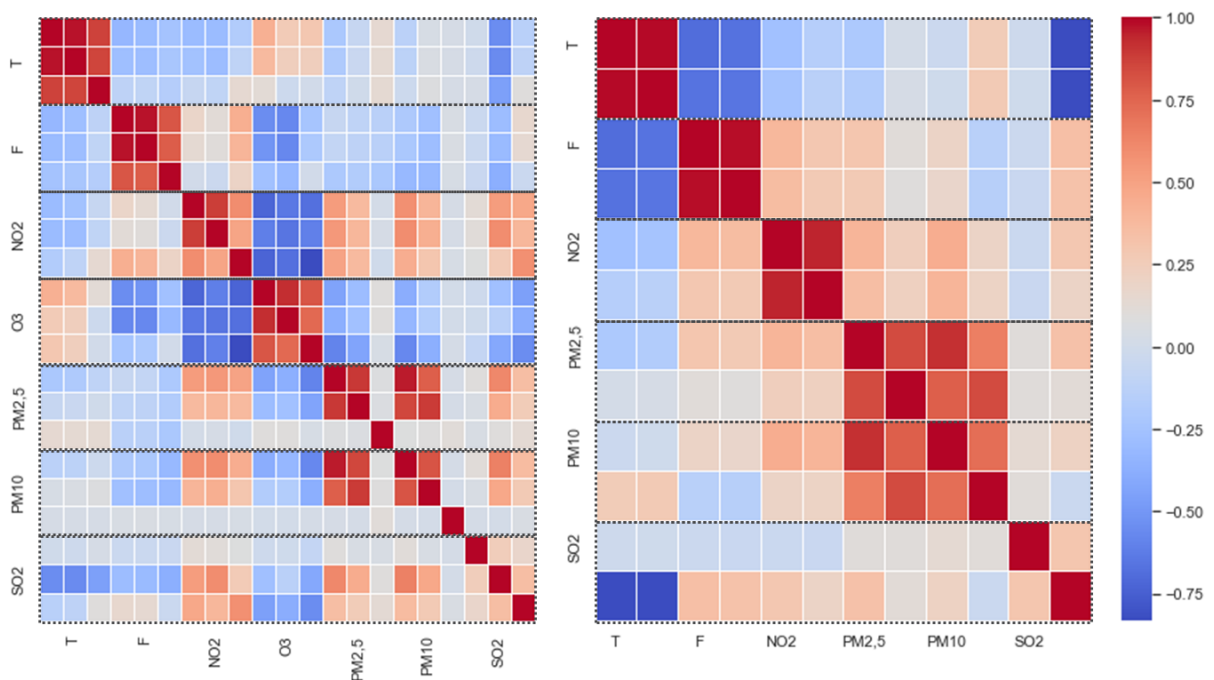


Abbildung 46: Korrelationsmatrix der direkt vergleichbaren Variablen. (links) Messkampagne im Westen des IPH. Vergleich zwischen den Referenzmethoden, IMB und dem Mikrosystem. (rechts) Messkampagne im Süden des IPH. Vergleich zwischen Referenzmethoden und IMB.

5.3 Quantifizierung simulierter Gasfahnen

Die vorliegende Fallstudie basiert auf Untersuchungen von Indikatorparametern (CO_2 & CH_4) in Abhängigkeit der Lokalität des Messpunktes zur Ausrichtung der simulierten Gasfahne und den direkten Vergleich der InfraSampler-Module mit weiteren UAV-basierten Messsystemen.

5.3.1 Hintergrund der Fallstudie

Die Lokalisierung und Darstellung von Gasfahnen durch drohnenbasierte Module ist aufgrund von der Unvorhersehbarkeit der Gasausbreitung, sowie der Beschränkungen der Stromsensortechnologien eine schwierige Aufgabe (Kapitel 4). In diesem Kapitel wird eine ganzheitliche Lösung für die Aufgabenstellung vorgeschlagen, die auch die Quellenermittlung umfasst. Wir testen die Methode der radialen Messung zur Verfolgung von Abgasfahnen und wenden ihn auf das drohnenbasierte InfraSampler-System an. Wir vergleichen die Leistung des vorgeschlagenen Systems in den realen Experimenten mit zwei weitere drohnenbasierten Modulen, die für Explorationsmissionen aus der Luft geeignet sind.

Zunächst wird die Verwendung von vordefinierten Messflugbahnen für die Kartierung der Gasverteilung mit dem UAS bewertet. Die Ergebnisse von Praxisexperimenten zeigen die Machbarkeit des Einsatzes von gasempfindlichen UAV für Überwachungsmissionen im Feld. Laborbedingungen können die Komplexität und Variabilität von Feldbedingungen oft nicht vollständig widerspiegeln. Sensoren, die im Labor präzise und rauscharm arbeiten, können im Feld unerwartete Störungen und verändertes Verhalten zeigen. Ein Beispiel hierfür ist ein photoakustischer CO_2 -Sensor, der im Labor genaue und rauscharme CO_2 -Konzentrationen lieferte, aber bei der Montage an einem UAV im Feld starkes Rauschen aufwies (Karbach, Bobrowski, und Hoffmann 2022). Es wurde vermutet, dass das UAV selbst einen negativen Einfluss auf den Sensor hatte, jedoch gab es keine detaillierte Analyse der Problematik. Dieses Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit, Sensoren unter möglichst realistischen, aber dennoch kontrollierten Bedingungen zu testen und zu charakterisieren. Das vorliegende Versuchskonzept zielt darauf ab, eine realistische Simulation einer Gasfahne, bestehend aus CO_2 oder CH_4 , sowie Vermischungen, sowohl horizontal als auch vertikal durchzuführen.

Das Hauptziel dieses Versuchs ist die Validierung der Methode zur Transmissionsmessung im Kontext der simulierten Gasfahne aus CO_2 und CH_4 . Durch diesen Feldversuch soll die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messergebnisse sichergestellt werden. Ein weiteres Ziel ist der Vergleich der verfügbaren drohnenbasierten Module, um deren Leistungsfähigkeit zu bewerten. Darüber hinaus wird untersucht, ob es Unterschiede in den Messergebnissen, aufgrund der Messung über oder unter den Rotoren gibt. Durch die Kombination von Referenzgeräten (PIR 7000) und mehreren Sensoren auf der UAV soll ein besseres Verständnis für das Verhalten der jeweiligen Sensorik erlangt werden. Dies ermöglicht die Auswahl der vielversprechendsten Sensorkombination für zukünftige Anwendungen. Zu den untersuchten Parametern gehören die Ansprechzeit des Sensors, Druck- und Temperaturabhängigkeit sowie die Auswirkungen des Flugs auf die Sensoren (Vibrationen, Luftverwirbelungen) und elektromagnetische Interferenzen (EMI) durch Motoren, Elektronik oder Funk. Zusätzlich bietet der Messaufbau eine Unterscheidung zwischen einer geschlossenen temperierten Messkammer und diffuser Messung, wie sie schon stationär in Kapitel 5.2 durchgeführt wurde.

Während der Versuche und bei der Auswertung wird auch auf die Auswirkungen unterschiedlicher Flugmanöver auf die gemessenen Daten geachtet. Dieses Wissen kann bei späteren Messflügen helfen, eine besonders „schonende“ Flugweise zu wählen, um bestmögliche Ergebnisse sicherzustellen und um Anwendungsbeispiele ausschließen zu können, für die sich drohnenbasierte Verfahren nicht eignen.

5.3.2 Beprobungsort

Als Versuchsort wurde das Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Horstwalde/Baruth (Mark), Brandenburg, gewählt (Abbildung 47). Das TTS erstreckt sich über eine Fläche von 12 km² und dient als bedeutender Standort für maßstabsgetreue Versuche, insbesondere im Bereich der Sicherheit von Technologien und Materialien. Innerhalb des TTS befindet sich das BAM Testzentrum für Unbemannte Luftfahrtsysteme (BAM TUAS), ein szenarienbasiertes Testzentrum zur Qualifizierung, Charakterisierung und Validierung von UAV-basierten Messverfahren. Unser Versuch nutzte spezifische Bereiche des TTS, die für UAV-basierte Messverfahren vorgesehen sind. Dies umfasste die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur und Ressourcen des BAM TUAS, einschließlich der Möglichkeit zur Simulation verschiedener Szenarien wie simulierte Gasfahnen, Gasaustritt aus dem Boden oder Leckagen in gasführenden Rohrleitungen. Die Auswahl dieses Standorts ermöglichte es uns, die Durchführung unserer Untersuchungen unter realistischen Bedingungen durchzuführen und gleichzeitig von der Infrastruktur der BAM zu profitieren.

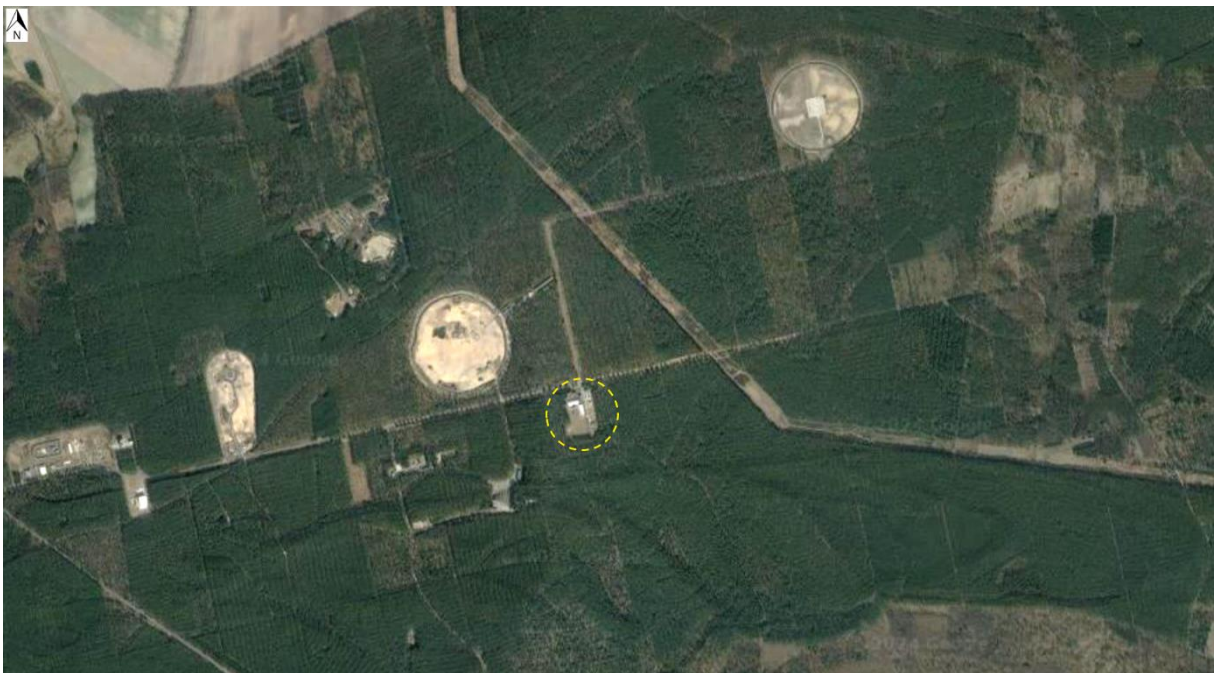


Abbildung 47: Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der BAM in Horstwalde. Gelb markiert ist das Versuchsgelände für UAV-Missionen.

Die Gasfahne wurde simuliert, indem CO₂- und CH₄-Quellen an einem definierten Standort auf dem TTS-Gelände der BAM platziert wurden (Abbildung 48). Die Ausrichtung des Distributionssystems (Ventilator) erfolgte in südöstliche Richtung, während Ultraschallanemometer

(USA) auf der Nord- und Südseite in einer Höhe von 6 m platziert wurden. Zudem wurden sieben infrarot-optische Transmitter (PIR) in einer Höhe von ca. 100 cm und drei weitere PIR in einer Höhe von ca. 230 cm aufgebaut, um die untere sowie obere Grenze der Gasfahne abbilden zu können. Die Position der Gastransmitter definieren ebenfalls die Messpunkte (MP) der UAS-Messung an. Die direkte Distribution der Gase am Ventilator wurde mithilfe des X-am 8000 überprüft. Die Start-/Landezone des UAV befand sich 25 m im Nordöstlichen Bereich neben der Bodenstation, welche die Daten der USA, der UAV und der PIR-Sensoren überwachte. Das Flugmanöver wurde immer aus südöstlicher Richtung durchgeführt, um eine radiale Messung (Kapitel 4.2.2) zu ermöglichen. Die Flughöhe wurde zunächst an den unteren PIR-Sensoren orientiert, bevor das gleiche Manöver in Höhe der oberen PIR-Sensoren durchgeführt wurde. Mögliche Querströmungen durch Wind sind über den gesamten Versuchszeitraum abgebildet, um eine Neuausrichtung der Gasfahne zu erkennen.

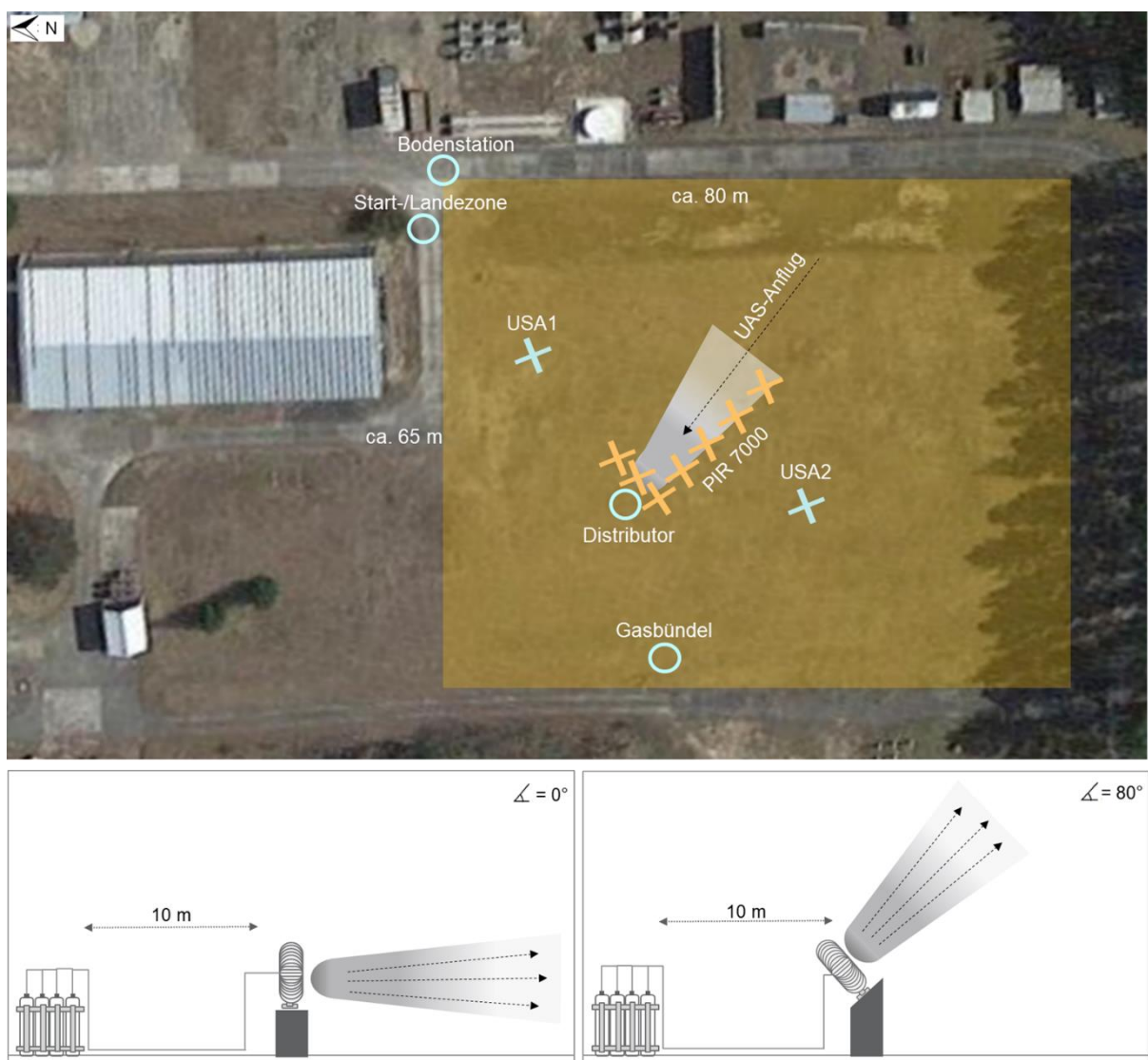


Abbildung 48: Versuchsgelände auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM. Die gelb markierte Fläche, bildet das Fluggebiet mit 5200 m^2 ab (oben). Schematische Darstellung der simulierten Gasfahne mit horizontaler (0°) bis abgewinkelter (80°) Ausrichtung (unten).

5.3.3 Messaufbau

Für die Durchführung der Versuche standen verschiedene Instrumente und Geräte zur Verfügung, die für die Erzeugung, Erfassung und Analyse der Gasfahnen und deren Eigenschaften eingesetzt wurden (Tabelle 12). Als UAV wurde aufgrund der hohen erforderlichen Nutzlast von 2,7 kg die Matrice 300 RTK verwendet. Dadurch war eine gleichzeitige Bestückung des UAV mit allen Modulen möglich.

Tabelle 12: Verwendetes Material für die Fallstudie. Eine Aufteilung erfolgt aufgrund von Geräten zur Simulierung der Gasfahne und Messgeräten.

	Komponent	Sensorik	Hersteller
Simulation der Gasfahne	Ventilator ($\varnothing \approx 90$ cm)	-	-
	Gasbündel V12x50L (CO ₂ und CH ₄)	-	Air Liquide
	Fernauslöser-Ventil	-	-
Messgeräte	InfraSampler v1.0 & v2.0	Kapitel 3.1.2	Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
	Silverbox	<ul style="list-style-type: none"> • FlowEVO • SCD41 • MZ-H19 	Johannes-Gutenberg Universität
	Sniffer 4D	-	Soarability
	X-am 8000	<ul style="list-style-type: none"> • IR CO₂ ES • XXS O₂ • XXS H₂ • CatEx 125 PR Gas 	Dräger
	PIR 7000	Infrarot-Gastransmitter	
	uSonic-3	Ultraschall-anemometer	Scientific

Der verwendete Messaufbau für den InfraSampler v1.0 & 2.0 sind in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, mit dem Unterschied, dass für diese Fallstudie der InfraSampler v1.0 ebenfalls mit einem SJH-5 Sensor ausgestattet wurde, um eine CH₄-Messung zu ermöglichen. Für den Aufbau des Silverbox ist auf die Arbeit von Karbach u. a. und Rüdiger u. a. zu verweisen. Dabei handelt es sich um ähnliche Konfigurationen, welche sich in diesem Beispiel allerdings ausschließlich auf CO₂-Sensoren beziehen. Es wurden für diese Fallstudie insgesamt fünf CO₂-Sensoren verwendet. Bei dem Sniffer4D handelt es sich um ein kommerziell erhältliches drohnenbasiertes Messgerät.

Die Instrumente, die im Versuch eingesetzt werden, umfassen neben den genannten Messgeräten auch Computer zur Programmierung und Steuerung der drohnenbasierten Module sowie zur Datenaufzeichnung und -analyse. Durch simultanes Messen mit der Silverbox und dem Sniffer 4D wird ein direkter Vergleich der einzelnen Messgeräte ermöglicht (Abbildung 49). Alle Konzentrationsbestimmungen erfolgten über externe Kalibrierung der Systeme.



Abbildung 49: Anordnung der Messmodule auf dem UAV M300 RTK. Über den Rotoren ist der Sniffer 4D angebracht, unter den Rotoren wurde der InfraSampler v1.0 befestigt. Kurz vor dem Flugstart wurde die Silverbox hinter dem InfraSampler befestigt und an den zweiten Gaseinlass der Probenahmelanze angeschlossen.

5.3.4 Durchführung der Transmissionsmessung

Vor Versuchsbeginn wurden zuerst die Distribution der Indikatorgase am Ventilator festgestellt. Dafür wurde jeweils das Ventil mit 7,5 bar Ausgangsdruck geöffnet. 10 cm vom Ventilator entfernt wurden die Messungen an den definierten Einzelpunkten mit dem X-am 8000 durchgeführt (Abbildung 50).

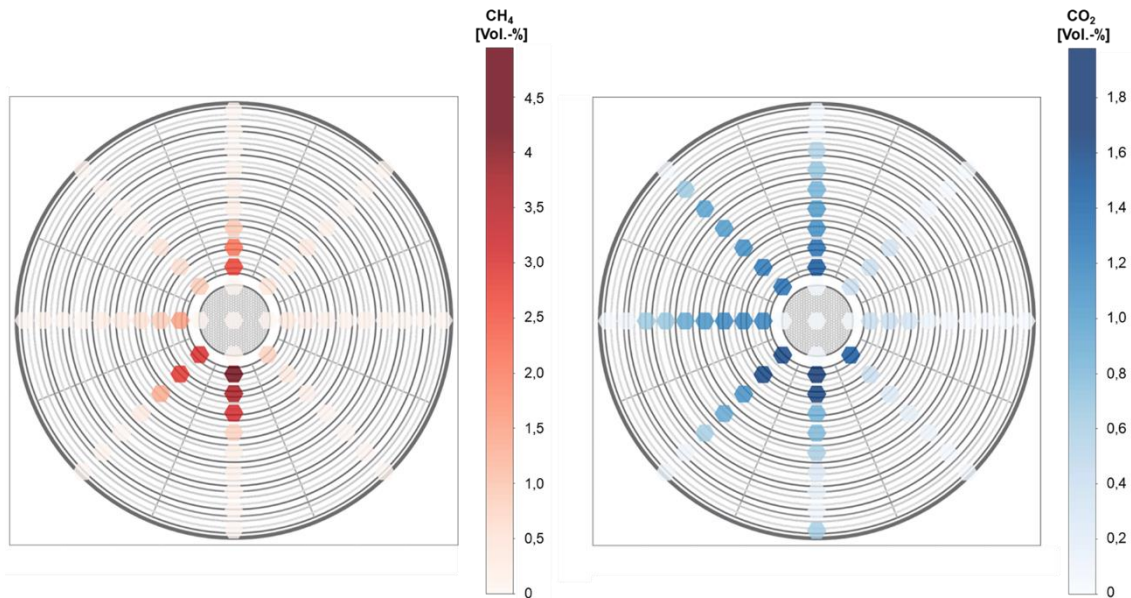


Abbildung 50: Gasdistribution am Ventilator.

Insgesamt wurden zwei Gruppen von Experimenten jeweils drei Flugmissionen durchgeführt. In den beiden Versuchsreihen wurde das UAS so gesteuert, dass es die sich ausbreitende Gasfahne radial zum Emissionspunkt erkundet. Im ersten Experiment wurde der Ventilator horizontal ausgerichtet, während im zweiten Experiment die Gasfahne mit einem 80° Winkel ausgerichtet wurde. Die Experimente wurden an einem Tag mit gleichbleibenden Wetterbedingungen (sonnig und windstill) durchgeführt. Zusätzlich wurden für jede Versuchsreihe die folgenden Einstellungen vorgenommen: Die Fluggeschwindigkeit des UAV zwischen den Messpositionen wurde auf 0,5 m/s festgelegt, die Höhe wurde während der Versuche manuell konstant gehalten, und an jeder Messposition hielt das UAS an, um für etwa 30 s Gaskonzentrationsmessungen mit einer Abtastrate von 1 Hz durchzuführen. In Tabelle 13 sind die Modulaufbauten auf der verwendeten Drohne für beide Experimente dargestellt, sodass mit den Flugmanövern insgesamt sechs Versuchsszenarien erzeugt wurden und zusätzlich ein Gehversuch, bei denen die Messmodule in den Händen gehalten wurden.

Tabelle 13: Versuchsdaten mit Modulpositionierung.

M300RTK	Horizontal Fahne (0°)		Schräge Fahne (80°)			
Obere Position	Sniffer 4D		Sniffer 4D			
Untere Position	InfraSampler v1.0	Siverbox	InfraSampler v1.0	Silverbox		
Fahngrenze	10x Dräger PIR 7000					
CO2/CH4-Mischung in bar	0 /7,5	7,5 /0	5 /7,5	0 /7,5	7,5 /0	5 /7,5

Mit den zehn Dräger-Sensoren wurden die Fahngrenzen überwacht. Über die gleichzeitige Messung oberhalb und unterhalb der Rotoren sollen potenzielle Unterschiede in den Messergebnissen erfasst werden. Die Messungen erfolgten kontinuierlich während des gesamten Versuchszeitraums, um eine repräsentative Datenerfassung sicherzustellen.

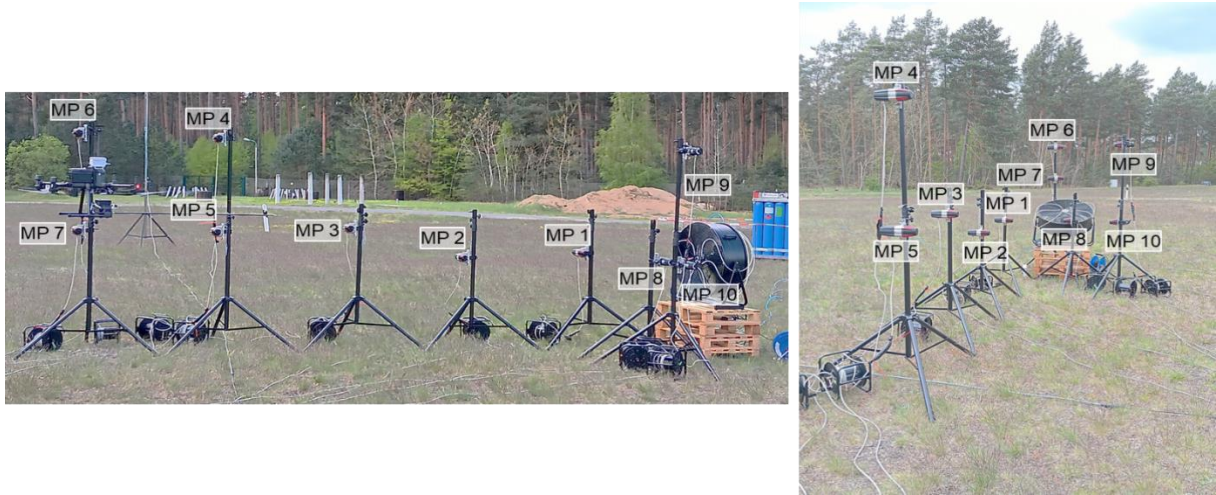


Abbildung 51: Versuchsaufbau des ersten Experimentes am 23.04.2024 mit horizontal ausgerichteten Ventilator (links) und nach oben gerichtetem Ventilator (rechts). Zu sehen ist das UAS im radialen Anflug. An den Seitengrenzen sind die zehn Gastransmitter (MP1 – MP10) in unterschiedlichen Höhen aufgestellt.

6 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Probenahmemoduls, der Probenahmestrategie, der Transportmodelle und die Implementierung des Sensornetzwerkes dargestellt. Es erfolgt ein Vergleich der Messwerte der Sensorik, sowie deren Beschreibung.

6.1 Charakterisierung von Reingasströmen mit dem InfraSampler

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Studie zur Probenahme von Reingasen und Transmissionsmessungen in anthropogen geprägten Gebieten mit den „InfraSampler“-Prototypen dargestellt. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Analyse der Daten gelegt, die während der Verwendung des Instruments gesammelt wurden. Die verwendeten Methoden zur Datenerhebung und Analyse wurden im Detail im Kapitel 3 bis 4 beschrieben. Diese Ergebnisse werden als Grundlage für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des In-Situ-Probenahme-Moduls genutzt und die Implikationen der Ergebnisse für die Praxis in Kapitel 7 diskutiert.

Die Messungen, die mit dem InfraSampler im Rahmen des Biogas-Projektes durchgeführt wurden, dienten schwerpunktmäßig der Probenahme am Kamin. Allerdings erfolgte ebenfalls eine Untersuchung der Abluftfahne. Die Abluftfahne sollte mit Hilfe von Messflügen charakterisiert werden, so dass die gewonnenen Aussagen eine statistische Belastbarkeit aufweisen.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die verschiedenen Messungen, die mit den InfraSampler-Systemen während der unterschiedlichen Feldtestkampagnen durchgeführt wurden. Die Unterschiede in der Anzahl der Flugmissionen, mit verschiedenen Messstrategien während der Kampagnen, sind vor allem auf die unterschiedlichen rechtlichen Bedingungen zurückzuführen.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Anzahl der Messungen unterschiedlicher Messstrategien, die mit dem InfraSampler-System durchgeführt wurden. Die einzelnen Messstrategien wurden in Kapitel 5 diskutiert. Unter „Sonstiges“ sind die Transmissionsmessungen durch den IPH, sowie die Flugtests auf dem Deponiegelände Limburg-Offheim aufgeführt.

Messstrategie	Feldtestkampagnen
Querschnitt Messung	2
Radiale Messung	8
Stationäre Messung	11
Sonstige	5
Gesamt	26

Im folgenden Unterabschnitt wird anhand einiger Einzelbeispiele detailliert beschrieben, wie die verschiedenen Zeiten, in denen die Abluftfahne und atmosphärische Hintergrundluftmassen beprobt wurden, in den Messdaten identifiziert werden konnten (Kapitel 6.1.1). Darauf aufbauend werden die typischen Eigenschaften der Abluftfahne mit denen atmosphärischer Hintergrundluftmassen verglichen, sowie die Struktur und Homogenität der Abluftfahne beschrieben (Kapitel 6.1.2).

6.1.1 Identifizierung von Gasfahnen

Bei der Planung einer Messung mit dem InfraSampler-System wurde festgelegt, ob die Abluftfahne beprobt werden sollte, oder nur eine Transmissionsmessung der Emission und von Hintergrundluftmassen sinnvoll erschien. Obwohl die Abluftfahne ein räumlich begrenztes Phänomen ist, das zeitlichen Variationen unterliegt, konnte im Vorhinein durch das stetige Monitoring der Wetterstation im IPH und den Prozessdaten des Betriebes abgeschätzt werden, in welche Richtung sich die Abluftfahne ausbildet. Diese Methode erfordert je nach Standort einen größeren Aufwand, da bei einer dichten Bebauung Strömungsphänomene wie Düseneffekte auftreten, sodass eine Windmessung direkt vor Ort essentiell ist. In unbebauten Flächen, können auch Windmessungen von weiter entfernten Messstationen als Orientierungswerte herangezogen werden. Für die Analyse der Charakteristika der Abluftfahne musste jedoch möglichst genau bestimmt werden, zu welchen Zeiten in der Abluftfahne und zu welchen Zeiten in einer atmosphärischen Hintergrundluftmasse gemessen wurde.

Hierfür wurden Indikatorparameter mit den bestehenden Prozesswerten herangezogen. Relevant für die Klassifizierung der Messzeitpunkte war ebenfalls der zeitliche Verlauf der Messdaten. Es war zu erwarten, dass die Abluftfahne durch eine deutliche Erhöhung der Konzentrationen wenig oxidiertes Luftschadstoffe im Vergleich zu Hintergrundluftmassen gekennzeichnet ist. Die Messdaten wurden daher auf deutlich erkennbare Änderungen der Indikationswerte untersucht und darauf basierend die Luftmassen klassifiziert. Eine Einteilung der Messzeiten erfolgte in vier Kategorien:

1. atmosphärischer Hintergrund (H)
2. Abluftfahne (A)
3. Maximum der Abluftfahne (MA)
4. nicht eindeutig zuzuordnen

Zeiten, die in Kategorie 4 eingeordnet werden mussten, wurden in der weiteren Auswertung nicht verwendet. Hier zählen zum Beispiel Zeiträume stationärer Messungen dazu, bei denen die Windrichtung mit hoher Frequenz schwankte und der Verlauf der Messreihen darauf hindeutet, dass abwechselnd unterschiedliche Luftmassen und möglicherweise auch nahe Quellen beprobt wurden. Im Folgenden wird anhand einiger Messbeispiele demonstriert, wie für die einzelnen Messungen basierend auf den unterschiedlichen Strategien die Messzeiten eingeteilt wurden. Alle Messdaten sind als 5 sek-Mittelwerte dargestellt.

Querschnittsmessung

Bei einer mobilen Querschnittsmessung startete die Messung (idealerweise) in einer Hintergrundluftmasse, querte dann einmal die Abluffahne und endete wiederum in einer nicht beeinflussten Luftmasse. In Abbildung 52 sind die gemessenen Konzentrationen einiger Indikatoren unprozessierter Luftverschmutzung gegen den Peilwinkel des Messpunktes in Bezug auf den Kamin der Stripperkolonne für eine mobile Querschnittsmessung während der Fallstudie dargestellt.

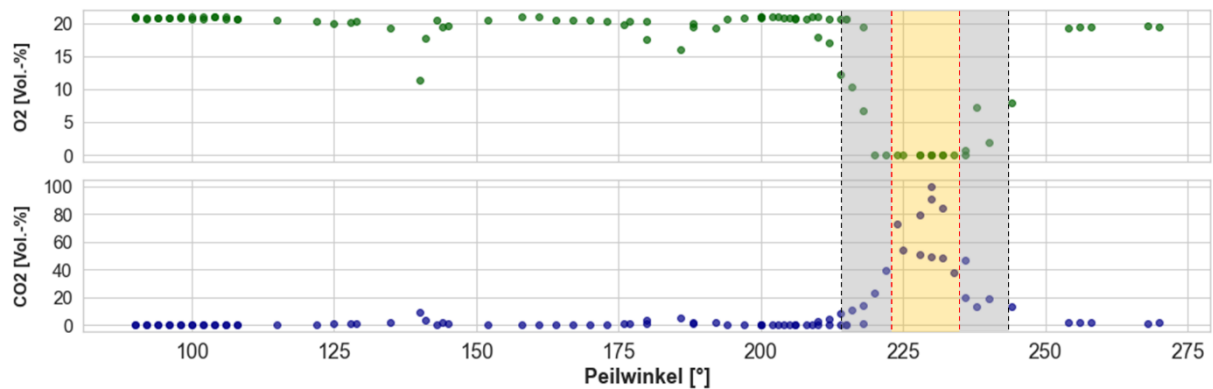


Abbildung 52: Während einer Querschnittsfahrt gemessene Konzentrationen von O₂ (grüne Punkte) und CO₂ (blaue Punkte) aufgetragen über den Peilwinkel in Grad des jeweiligen Messortes in Bezug auf das Zentrum des Emissionspunktes. Diese Querschnittsmessung (<1 m, 2 m Distanz zum Emissionspunkt der Stripperkolonne) fand am 02.11.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. Die Abluffahne wurde in süd-westliche Richtung advehiert. Die Datenpunkte, die im grau und blassorange eingefärbten Winkelbereich liegen, wurden der Kategorie 2 (Abluffahne) zugeordnet. Der blassorange gefärbte Bereich markiert die Daten, die zusätzlich der Kategorie 3 und damit dem Maximum der Abluffahne zugeordnet werden konnten. Die übrigen Messwerte (nicht gefärbter Winkelbereich) sind der Kategorie 1, Hintergrundluftmassen zuzuordnen.

Die Abluffahne ist in Abbildung 52 anhand der ausgeprägten Konzentrationserhöhung von CO₂ und Konzentrationserniedrigung von O₂ zwischen 213° und 240° identifizierbar. Maximal erhöhte Werte dieser Messgrößen sind zwischen 223° und 235° zu beobachten. Man kann jedoch auch erkennen, dass eine gewisse Freiheit darin vorliegt, wo man die Grenze zwischen betriebsbeeinflusster und nicht beeinflusster Datenpunkte zieht. Ebenso ist die Definition des Maximums der Abluffahne nicht eindeutig und objektiv. Es wurden jedoch alle Messungen nicht nur einzeln auf erkennbare Konzentrationsänderungen untersucht, sondern die Identifikation der Abluffahne der einzelnen Messungen auch untereinander verglichen. Somit ließ sich besser entscheiden, ob eine Erhöhung unprozessierter Luftschadstoffe während einer spezifischen Einzelmessung denen anderer Messungen in der Abluffahne oder eher einer Variation der Belastung des atmosphärischen Hintergrunds entspricht.

Radiale Messungen

Der radiale Messflug startete am Emissionspunkt der Stripperkolonne auf der Biogasaufbereitungsanlage und führte möglichst mittig durch die Abluftfahne bis in eine Entfernung von bis zu 6 m. In Abbildung 53 sind die gemessenen Konzentrationen derselben Indikatoren prozessierter Luftverschmutzung wie in Abbildung 52 für einen radialen Messflug im Herbst dargestellt, diesmal in Abhängigkeit der Entfernung zum Zentrum dem Kamin. Gezeigt sind nur die Daten des Fluges vom Kamin weg, da hier besonders gut die Abluftfahne zu erkennen ist. Für radiale Messflüge wurde eine Definition des Maximums der Abluftfahne bestimmt, welche direkt am Emissionspunkt liegt, da die Konzentrationen frisch emittierter Substanzen mit zunehmender Entfernung zum Kamin kontinuierlich abnehmen. Eine Art Plateau der höchsten Werte, wie im Fall der Querschnittsmessungen erkennbar, ist in den Messdaten der Radialfahrten nicht zu erkennen. Außerdem liegt die Messroute einer Radialfahrt möglicherweise nicht im Zentrum der Abluftfahne. In dem hier gezeigten Beispiel ist die Abluftfahne durch deutlich erhöhte Indikatorkonzentration bis in eine Entfernung von 1,5 m zu identifizieren. Die restlichen Datenpunkte sind zwar noch industriell beeinflusst, jedoch sind die frisch emittierten Substanzen in größeren Entfernungen zum Zentrum des Kamins bereits so weit verdünnt, dass mit zunehmender Distanz zum Emissionspunkt keine weitere Abnahme der Konzentrationen zu beobachten ist.

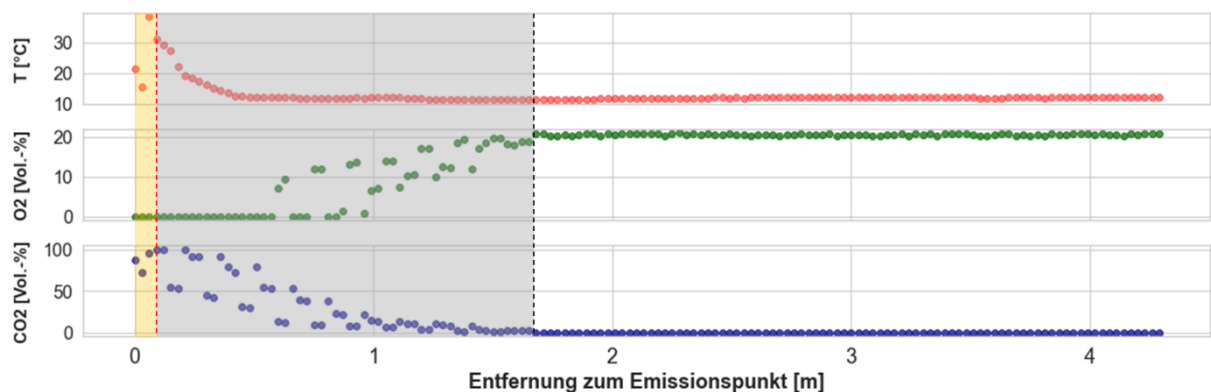


Abbildung 53: Während einer Radialfahrt gemessene Konzentrationen von Temperatur (rote Punkte), O₂ (grüne Punkte) und CO₂ (blaue Punkte) aufgetragen über die Entfernung zum Emissionspunkt der Stripperkolonne. Diese Flugmission fand am 12.10.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. Die Abluftfahne wurde in süd-süd-westliche Richtung advehiert. Gezeigt sind nur die Daten des Fluges von dem Emissionspunkt weg. Die Datenpunkte im grau gefärbten Bereich sind der Abluftfahne zugeordnet, die Punkte im gelben Bereich sind direkt am Emissionspunkt und die restlichen Punkte atmosphärischen Hintergrundluftmassen.

Stationäre Messung

Bei stationären Messungen kann die Ablufffahne in den Messdaten nur dann identifiziert werden, wenn sowohl die Messung urban beeinflusster als auch unbeeinflusster Luftmassen aufgrund einer entsprechenden Winddrehung möglich war. Wenn die Messung an einem Emissionspunkt wie einem Schornstein durchgeführt wird, kann die Ablufffahne auch anhand der vorgegebenen Prozessdaten sowie visuell durch den Probenehmer oder eine Drohnenkamera identifiziert werden. Die Ablufffahne zeigte am 11.11.2021 zwischen 10:16 Uhr und 10:35 Uhr einen deutlichen Anstieg der CO₂-Konzentration. Gleichzeitig war eine deutliche Abnahme der O₂-Konzentration zu verzeichnen, da atmosphärisches O₂ durch frisch emittiertes CO₂ verdrängt wurde. Während dieser Zeit drehte sich die mittlere gemessene Windrichtung am Messort, wobei die Luft aus den Richtungen NNW und NNO strömte. Vor diesem Zeitintervall war die Windrichtung vorwiegend nordwestlich, und nach der Messung änderte sie sich zu nordöstlich bzw. östlich. Basierend auf der beschriebenen Einteilung der Messzeiträume wurden mittlere Konzentrationen der gemessenen Parameter für die Kategorien 1 bis 3 berechnet. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften der Ablufffahne und der atmosphärischen Hintergrundluftmassen gegenüberzustellen sowie den Beitrag des geruchsbeladenen Abgases auf die Regionen windabwärts zu bestimmen.

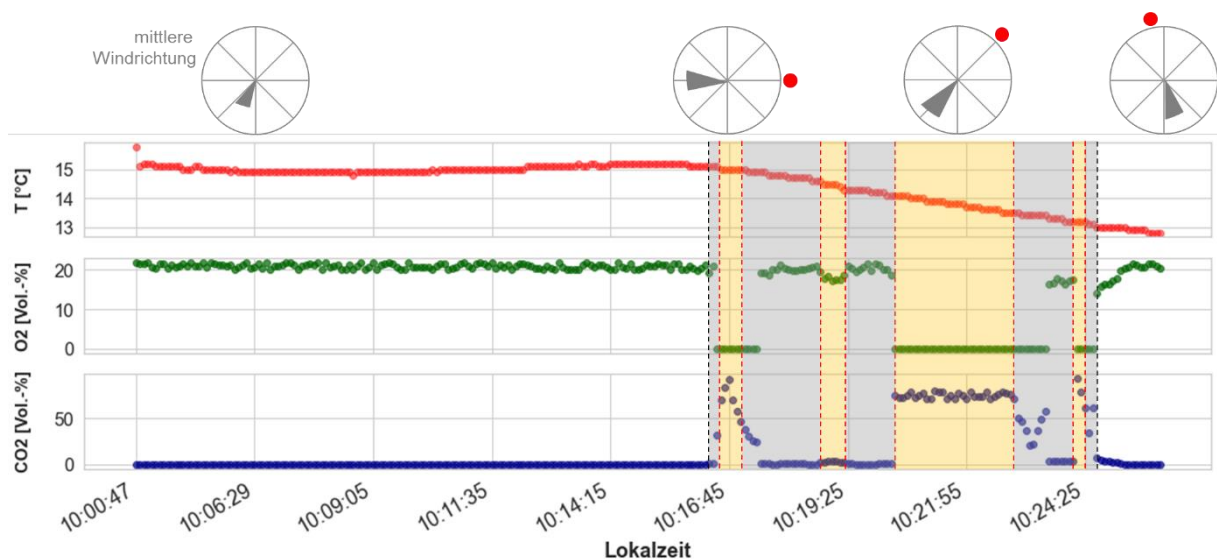


Abbildung 54: Während einer Winddrehung stationär gemessene Konzentrationen von Temperatur (rote Linie), O₂ (grüne Linie) und CO₂ (blaue Linie) aufgetragen über die Zeit. Die mittlere Windgeschwindigkeit steigt im Zeitintervall (10:00 Uhr bis 10:30 Uhr) von 0,2 m/s auf 0,4 m/s. Diese Messung fand am 11.11.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. In dem Zeitraum, der zwischen den beiden schwarzen gestrichelten vertikalen Linien liegt (grau und gelb gefärbter Bereich), wurde die geruchsbeladene Abgasfahne beprobt, wobei maximale Luftschadstoffkonzentrationen im gelb markierten Zeitintervall gemessen wurden. In den Zeiten außerhalb der markierten Bereiche handelt es sich um Hintergrundluft. Die vier Windrosen geben die mittlere gemessene Windrichtung am Messort für die vier Zeitabschnitte (Zeitraum während der Probenahme, sowie die Zeiten davor und danach) an. Der rote Punkt zeigt die UAV-Position relativ zum Emissionspunkt (Zentrum der Windrose).

6.1.2 Analyse der Gasfahnenstruktur

Die vorliegende Auswertung behandelt die Resultate der Test- und Probeflugphase sowie die erhobenen Daten aus der Probenahme mit dem InfraSampler v1.0. Es wird eine Gegenüberstellung der Sensor-Messwerte vorgenommen. Des Weiteren erfolgt ein Vergleich der Geruchsproben und ein Bezug zu den ermittelten Geruchskonzentrationen im Abgasstrom der letzten Jahre wurde hergestellt. Im Rahmen der Testphase wurden die Sensoren und zugehörigen Komponenten einer Funktionalitätsprüfung unterzogen. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass die gemessenen Werte kontinuierlich aufgezeichnet wurden und die Stromversorgung stabil war. Ein weiteres Testkriterium war die Überprüfung der selbstständigen Befüllung des Gasprobebeutels bei Erreichen eines zuvor festgelegten CO₂-Wertes im Programmcode. Zur Überprüfung der Sensoren im Feld mit bekannten Parametern fand ein Probeflug auf der Deponie Limburg-Offheim statt, die von Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG verwaltet wird. Während des Probeflugs wurde ebenfalls das Flugverhalten des UAV mit der zusätzlichen Nutzlast geprüft und bewertet. Die vorliegenden Messungen erfolgten in einem Zeitraum von ca. 30 Minuten. Die Zeitstempel sind in 5 Sekundenschritten angegeben. Da die beiden Sensoren K30 FR und SCD30 nicht den gesamten Messbereich der Emissionsquelle abbilden, wurde in der Auswertung für die CO₂-Konzentration nur der SprintIR-6S berücksichtigt. In Tabelle 15 sind alle Testflüge aufgeführt. Die zugehörigen Wetterbedingungen für die Mess-tage sind in Tabelle 16 gelistet.

Tabelle 15: Durchgeführte Messflüge mit dem InfraSampler v1.0 an den verschiedenen Lokalitäten.

Datum	Uhrzeit	Instrument	Flugort	n	Distanz m]
28.10.2021	08:07 – 11:37	InfraSampler v1.0	Limburg-Offheim	591	167
12.10.2021	09:12 – 09:36	InfraSampler v1.0	IPH	285	202
02.11.2021	09:42 – 09:57	InfraSampler v1.0	IPH	181	103
11.11.2021	10:00 – 10:41	InfraSampler v1.0	IPH	348	55

Tabelle 16: Monitoring über des Windverhaltens im Standort IPH an den Messtagen. Farblich in grün hervorgehoben sind die tatsächlichen Messzeiten, in denen ein UAS-Einsatz stattfand. WR = Windrichtung in °, WG = Windgeschwindigkeit in m/s, MW = Mittelwert, MAA = mittlere absolute Abweichung

Datum	12.10.2021		02.11.2021		11.11.2021	
Uhrzeit	WR [°]	WG [m/s]	WR [°]	WG [m/s]	WR [°]	WG [m/s]
09:00	215,95	2,9	177,53	2,6	350,27	1,2
09:30	202,12	3,9	178,22	2,4	341,83	0,8
10:00	200,05	4,3	230,39	2,1	33,27	0,2
10:30	211,96	3,6	251,89	1,2	353,78	0,4
11:00	197,12	4,3	160,77	1,2	346,99	0,5
11:30	204,34	4,1	186,59	2,9	69,53	0,4
12:00	219,72	4,3	232,74	2,1	341,04	0,4
MW	209,20	3,72	201,53	2,27	280,33	0,60
MAA	7,38	0,51	27,86	0,55	101,75	0,29

6.1.2.1 Messtag 12.10.2021

Am ersten Messtag der Fallstudie, wurde eine radiale Messung der Rauchfahne durchgeführt. Zusätzlich wurde das Probestgebiet kartiert, um weitere mögliche Emissionspunkte zu erfassen. Die radiale Messung startete am Emissionspunkt und führte mittig durch die Abluftfahne bis in eine Entfernung von bis zu 4 m. In dem hier gezeigten Beispiel ist die Abluftfahne durch eine deutlich erhöhte CO₂-Konzentration bis in eine Entfernung von etwa 2 m zu identifizieren. Die Metadaten sind zwar teilweise noch beeinflusst (Abbildung 55, relative Luftfeuchtigkeit), jedoch ist der Indikatorparameter in größeren Entfernungen zum Emissionspunkt so weit verdünnt, dass mit zunehmender Distanz keine weitere Abnahme der Konzentrationen zu beobachten ist (Abbildung 55, CO₂-Konzentration).

An dem Messtag lag die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 08:00 Uhr bis 12:00 Uhr bei 3,72 m/s ± 0,51 m/s. Es lag eine stabile Windrichtung aus 209,20 ° ± 7,38 ° vor. In dem Messzeitraum des UAS-Einsatzes lag eine Windgeschwindigkeit von 3,40 m/s ± 0,50 m/s und eine Windrichtung aus 209,04 ° ± 6,91 ° vor.

Abbildung 55 zeigt, dass die gemessenen Werte der Sensoren zur Umgebungstemperatur voneinander abweichen. Insbesondere ist zu erkennen, dass die Temperaturwerte innerhalb der Rauchfahne auf maximal 39,4 °C (BME680) ansteigen, um dann auf das Ausgangsniveau von ca. 12,4 °C (BME680) zurückzusinken (09:14:19 – 09:18:59). Der Anfangswert (09:12:34) des „BME680“ ähnelt dem Endwert (09:36:14) der Messung. Im Vergleich zur Umgebungstemperatur von 10,0 °C zum Messzeitpunkt (09:12:34 – 09:36:14) lässt sich feststellen, dass in der Messbox höhere Temperaturen gemessen wurden.

Die Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit im Verlauf der Messung ist ebenfalls dargestellt. Zu Beginn der Messung betrug die relative Luftfeuchtigkeit in der Messbox 20,4 % (BME680) und 15,8 % (SCD30). Im weiteren Verlauf der Messung stieg die gemessene Feuchtigkeit um ca. 14,8 % (BME680) bzw. 14,6 % (SCD30) an und erreichte einen Wert von 35,2 % (BME680) bzw. 30,5 % (SCD30). Zum Zeitpunkt der Messung betrug die relative Feuchtigkeit am Standort 95,3 %.

Tabelle 17: Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Temperatur [°C]			relative Luftfeuchtigkeit [%]	
	BME680	BMP280	SCD30	BME680	SCD30
Startwert	12,46	10,21	11,3	18,1	13,5
Mittelwert	12,94	10,73	11,8	30,8	26,2
Endwert	12,89	10,60	11,7	35,6	30,8

Der gemessene Umgebungsluftdruck nimmt zu Beginn mit zunehmender Höhe stark ab (09:12:34 – 09:14:14) und während der radialen Messung der Rauchfahne sinkt er nur noch geringfügig (09:14:19 – 09:18:04). Erst beim Absinken des UAV (09:18:04 – 09:18:29) ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen, der sich bei gleichbleibender Höhe wieder stabilisiert (09:18:29 – 09:32:34). Erst bei der Landung des UAV (09:32:39) steigt der Luftdruck wieder auf seinen ursprünglichen Wert an.

Tabelle 18: Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Luftdruck [hPa]		Flughöhe [m]	
Sensor	BME680	BMP280	BME680	BMP280
Startwert	1014,98	1015,94	0,21	0,25
Mittelwert	1013,71	1014,40	10,8	13,1
Endwert	1015,06	1016,06	0,44	0,62

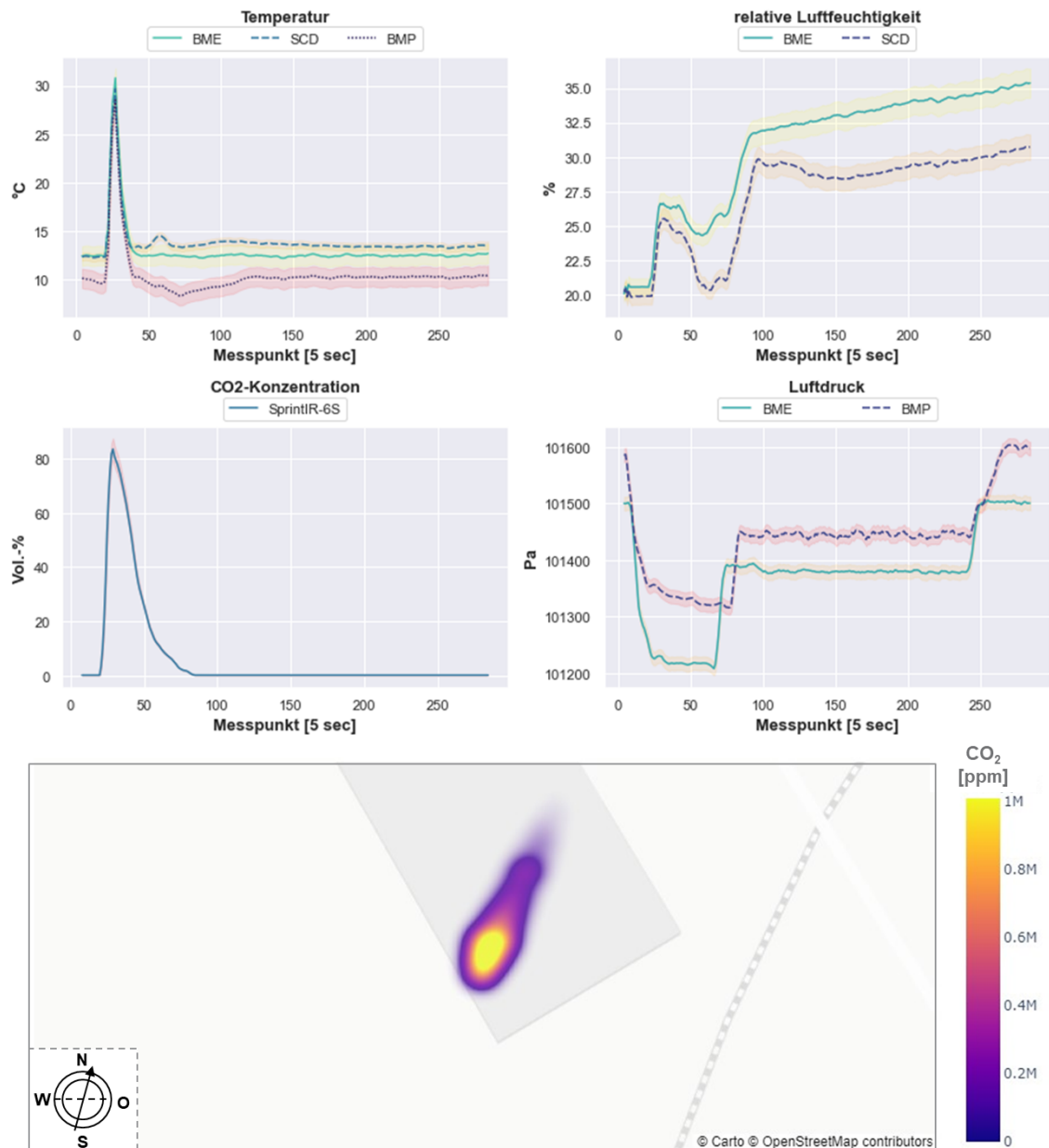


Abbildung 55: Exploration der Messdaten (12.10.2021) vom InfraSampler durch zweifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen sind oben dargestellt. Die Wärmekarte zeigt den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke in Abhängigkeit zur Windrichtung an. Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.

6.1.2.2 Messtag 02.11.2021

Am zweiten Messtag wurde eine Querschnittsmessung der Rauchfahne, mit geplanter Probenahme am Emissionspunkt durchgeführt. An dem Messtag lag die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 08:00 Uhr bis 12:00 Uhr bei $2,27 \text{ m/s} \pm 0,55 \text{ m/s}$. Es lag eine stabile Windrichtung aus $201,53^\circ \pm 27,86^\circ$ vor. In dem Messzeitraum des UAS-Einsatzes lag eine Windgeschwindigkeit von $2,25 \text{ m/s} \pm 0,15 \text{ m/s}$ und eine Windrichtung aus $204,31^\circ \pm 26,09^\circ$ vor.

Tabelle 19 zeigt, dass die gemessenen Werte der Sensoren zur Umgebungstemperatur von $8,3^\circ\text{C}$ voneinander abweichen. Die Temperaturmesswerte der drei Sensoren untereinander unterscheiden sich um ca. $1 - 2^\circ\text{C}$. Die höchsten Messwerte liefert der BME680 mit einem Offset von 2°C , das Offset vom SCD30 liegt bei ca. 1°C zu den Messwerten des BMP280, welcher am nächsten zu den Umgebungswerten liegt. Der Temperaturverlauf aller drei Sensoren zeigt, dass die Anfangstemperatur von $13,84^\circ\text{C}$ (BME680), $12,7^\circ\text{C}$ (SCD30) und $11,63^\circ\text{C}$ (BMP260) auf demselben Niveau bleibt (09:42:02 – 09:52:32), bis Sie dann langsam auf ihren Höchstwert von $16,67^\circ\text{C}$ (BME680), $15,35^\circ\text{C}$ (SCD30) und $13,63^\circ\text{C}$ (BMP260) ansteigt (09:52:37 – 09:55:12) und anschließend innerhalb von 40 s wieder auf den vorherigen Durchschnittswert abkühlt.

Zu Beginn der Messung betrug die relative Luftfeuchtigkeit in der Messbox $26,9\%$ (BME680) und $22,3\%$ (SCD30) (09:42:02). Im weiteren Verlauf der Messung stieg die gemessene Feuchtigkeit um ca. 6% (BME680) bzw. 5% (SCD30) an und erreichte einen durchschnittlichen Wert von $31,7\%$ (BME680) bzw. $27,2\%$ (SCD30) (09:42:02 – 09:44:57). Während die Probenahme sich direkt im Reingasstrom befand, stieg die Feuchtigkeit innerhalb von 200 s auf den Höchstwert von $43,8\%$ (BME680) bzw. $39,6\%$ (SCD30) an (09:52:27 – 09:55:47). Anschließend blieben die Messwerte bis zum Ende der Messung in dem Bereich 39% bis 44% . Zum Zeitpunkt der Messung betrug die relative Feuchtigkeit am Standort $96,0\%$.

Tabelle 19: Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Temperatur [$^\circ\text{C}$]			relative Luftfeuchtigkeit [%]	
	BME680	BMP280	SCD30	BME680	SCD30
Startwert	13,84	11,63	12,70	26,9	22,3
Mittelwert	14,46	11,93	13,24	33,6	29,1
Endwert	14,21	10,80	12,52	43,6	39,0

In Tabelle 20 ist zu erkennen, dass der gemessene Umgebungsluftdruck zu Beginn mit zunehmender Höhe stark abnimmt von dem Anfangsbereich $1013,32 \text{ hPa}$ (BME680) bzw. $1014,40 \text{ hPa}$ (BMP280) auf den minimalen Bereich $1012,04 \text{ hPa}$ (BME680) bzw. $1013,14 \text{ hPa}$ (BMP280) (09:45:27 – 09:45:52) und bei der Querschnittsmessung der Rauchfahne auf demselben Niveau bleibt (09:45:52 – 09:55:22). Erst beim Absinken des UAV (09:55:27 – 09:56:52) ist ein deutlicher Anstieg des Luftdrucks auf den Anfangswert bis zum Aufsetzen des UAV auf dem Boden zu verzeichnen (09:56:57).

Tabelle 20: Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Luftdruck [hPa]		Flughöhe [m]	
	BME680	BMP280	BME680	BMP280
Startwert	1014,51	1015,42	1,14	0,55
Mittelwert	1012,83	1013,86	15,06	13,49
Endwert	1014,57	1015,63	0,63	0,00

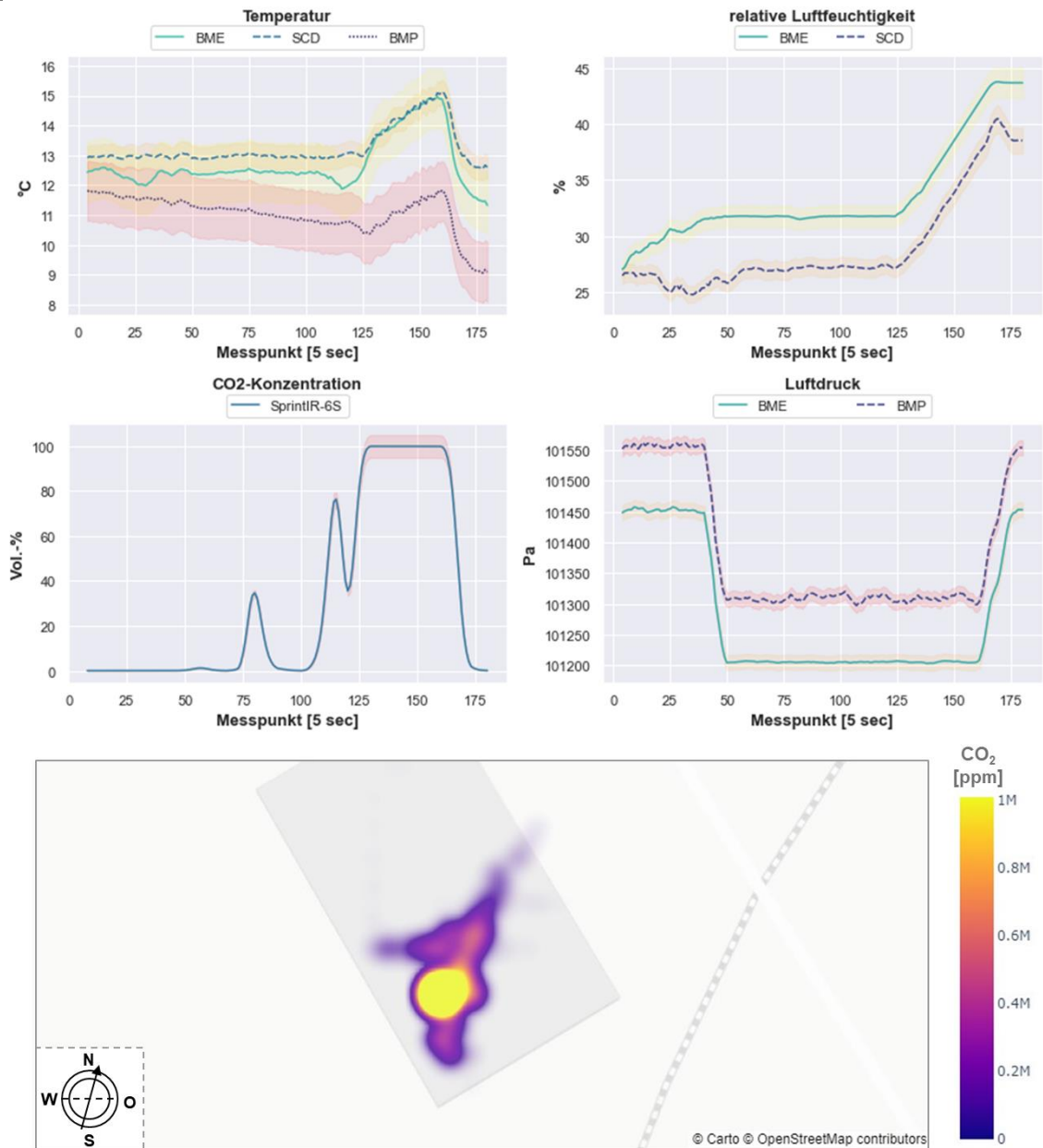


Abbildung 56: Exploration der Messdaten (02.11.2021) vom InfraSampler v.1.0 durch dreifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind zusammen dargestellt (oben). Das 3D-Diagramm und die Wärmekarte zeigen den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke aus dem Kamin in Abhängigkeit der Windrichtung (unten). Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.

Es wurde ein Probenahmeverfahren getestet, das jedoch erfolglos war, da das Ansaugsystem im bestehenden Setup nicht ausreichend Luft durch das System leiten konnte. Infolgedessen wurde der Messaufbau leicht modifiziert, indem eine zusätzliche Pumpe hinzugefügt und die Größe der Schläuche angepasst wurde. Zudem wurden die Sensoren in der Messkammer neu angeordnet, um eine bessere Durchströmung mit der Ansaugluft zu gewährleisten. Die Probenahme wurde am 11.11.2021 mit dem überarbeiteten Messaufbau wiederholt.

6.1.2.3 Messtag 11.11.2021

Am dritten Messtag wurde die Probenahme nach der Anpassung des Probenahmemoduls wiederholt.

An dem Messtag lag die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 08:00 Uhr bis 12:00 Uhr bei $0,60 \text{ m/s} \pm 0,29 \text{ m/s}$. Es lag eine instabile Windrichtung aus $280,33^\circ \pm 101,75^\circ$ vor. In dem Messzeitraum des UAS-Einsatzes lag eine Windgeschwindigkeit von $0,50 \text{ m/s} \pm 0,30 \text{ m/s}$ und eine Windrichtung aus $187,55^\circ \pm 154,28^\circ$ vor. In Abbildung 57, ist eine deutliche Abnahme der gemessenen Temperatur bei allen Sensoren erkennbar. Die durchschnittliche Abweichung zur Umgebungstemperatur beträgt $12,14^\circ\text{C}$. Insbesondere ab Messpunkt 270 ist erkennbar, dass die Werte des „SCD30“ und des „BMP280“ erst erneut angestiegen sind, während der Wert des „BME680“ stabil bleibt. An dem Punkt wurde das Probenahme-Modul nach der Landung für die zweite Probenahme neu gestartet. Im Vergleich zur Umgebungstemperatur von $1,2^\circ\text{C}$ zum Messzeitpunkt (10:13:40 Uhr – 10:26:35 Uhr) lässt sich feststellen, dass in der Messbox generell höhere Temperaturen gemessen wurden, welche durch die angesaugte Umgebungsluft langsam abkühlt.

Die Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit im Verlauf der Messung ist ebenfalls dargestellt. Zu Beginn der Messung betrug die relative Luftfeuchtigkeit in der Messbox $29,6\%$ (BME680) und $27,0\%$ (SCD30). Im weiteren Verlauf der Messung stieg die gemessene Feuchtigkeit um an und erreichte einen Maximalwert von $49,99\%$ (BME680) bzw. $44,8\%$ (SCD30). Zum Zeitpunkt der Messung betrug die relative Feuchtigkeit am Standort $99,4\%$.

Tabelle 21: Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Temperatur [$^\circ\text{C}$]			relative Luftfeuchtigkeit [%]	
	BME680	BMP280	SCD30	BME680	SCD30
Startwert	16,08	15,46	15,9	29,6	27,0
Mittelwert	14,06	12,99	14,76	41,4	38,1
Endwert	11,71	11,20	13,00	49,4	44,1

Am Anfang ist zu erkennen, dass der gemessene Umgebungsluftdruck zu Beginn leicht steigt, was auf die Umrundung des Betriebes mit dem UAV zurückzuführen ist (Messpunkt 0 – 120). Anschließend sinkt er beim Aufstieg zur maximalen Kaminhöhe stark ab (Messpunkt 120 – 125). Erst beim Absinken des UAV (Messpunkt 249 – 252) steigt der Luftdruck wieder auf seinen ursprünglichen Wert an.

Tabelle 22: Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.

Parameter	Luftdruck [hPa]		Flughöhe [m]	
	BME680	BMP280	BME680	BMP280
Startwert	1014,53	1016,09	0,91	-1,77
Mittelwert	1013,21	1014,48	11,88	11,40
Endwert	1014,59	1015,95	0,41	-0,79

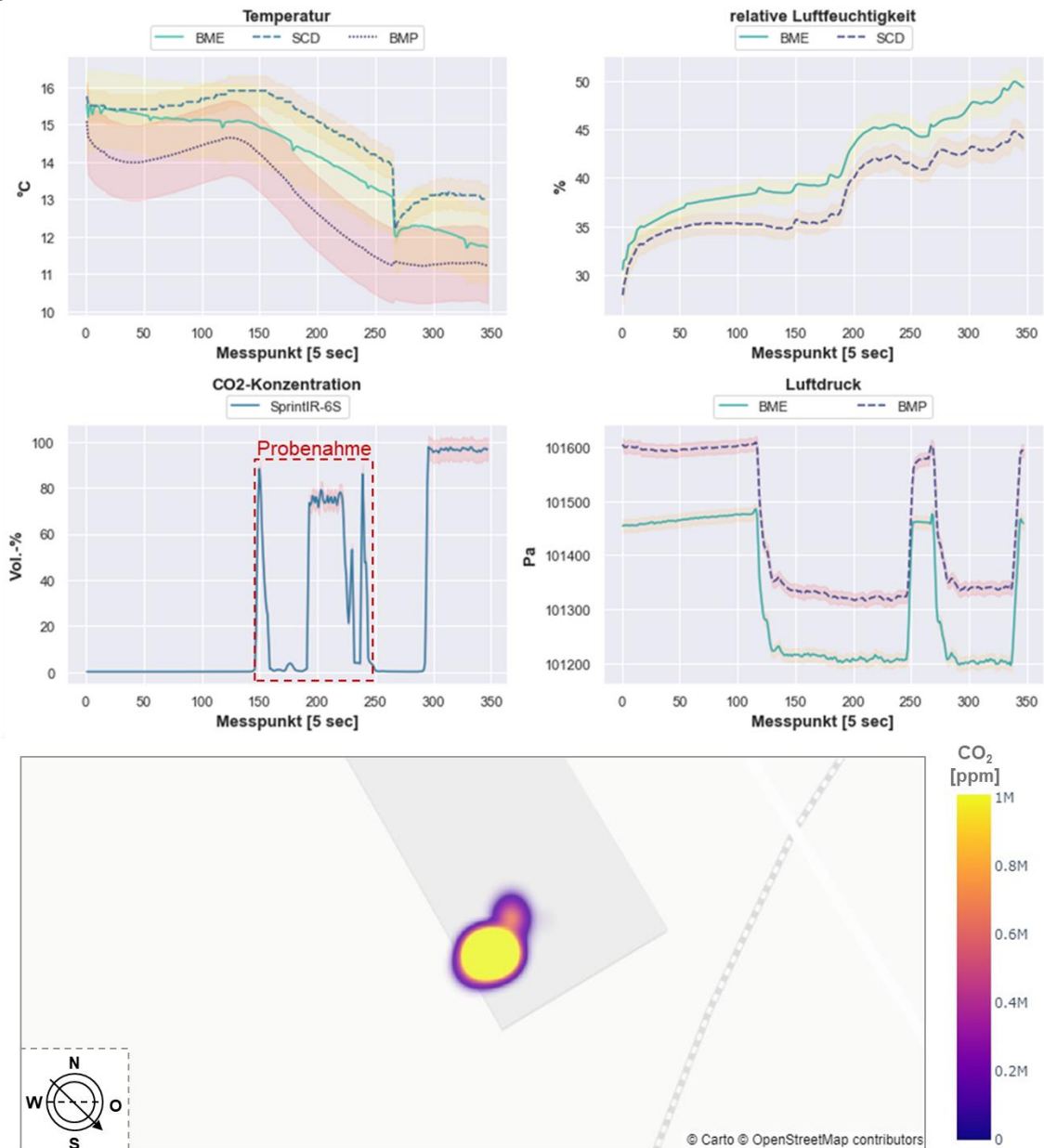


Abbildung 57: Exploration der Messdaten (11.11.2021) vom InfraSampler v.1.0 durch dreifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind zusammen dargestellt (oben). Das 3D-Diagramm und die Wärmekarte zeigen den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke aus dem Kamin in Abhängigkeit der Windrichtung (unten). Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.

In Abbildung 58 ist deutlich zu erkennen, dass die Probenahmelanze während der ersten Probenahme (10:16:20 Uhr - 10:25:45 Uhr) im Abgasstrom platziert war. Zu Beginn stieg die CO₂-Konzentration stark auf über 90 Vol.-% an, wodurch die automatische Probenahme auslöste. Dabei lag die Konzentration außerhalb des Messbereichs des K30 FR und des SCD30. Aufgrund eines Abwinds bewegte sich das UAV um 10:16:55 Uhr aus der Rauchfahne heraus und stabilisierte sich erst um 10:20:25 Uhr.

Über den gesamten Probenahmezeitraum hinweg zeigte die Sensorik durchschnittliche Konzentrationen von 0,77 Vol.-% (K30 FR), 2,23 Vol.-% (SCD30) und 23,15 Vol.-% (SprintIR-6S) an. Der SCD30 erfasste große Verdünnungen mit Hintergrundluftmassen, während der SprintIR-6S direkte Emissionen abbildete. Der K30 FR lag während des gesamten Zeitraums außerhalb seines Messbereichs, sodass er sich besser für Transmissionsmessungen eignet, bei denen von geringeren Konzentrationen auszugehen ist. Die Schwankungen in der Konzentration sind auf wechselnde Windströmungen zurückzuführen, durch sich drehende Winde, wodurch die Erfassung der Gasfahne erst nach mehreren Versuchen gelang.

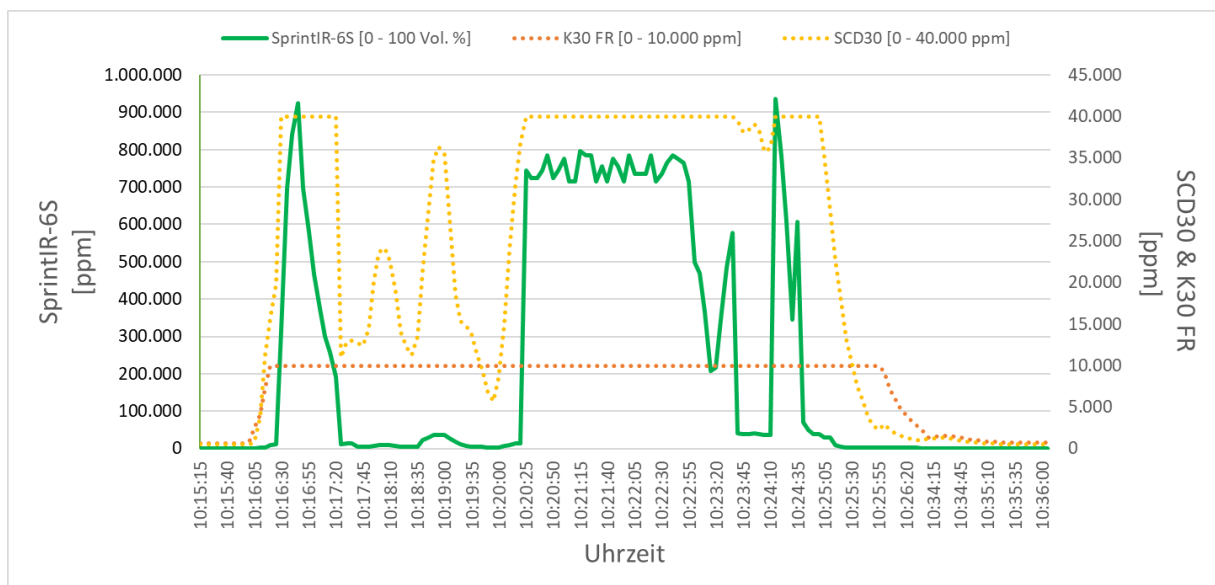


Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration am Kamin vom 11.11.2021.

6.1.2.4 Untersuchung der Geruchsproben

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Blindproben und der Probenahme des Abgasstroms an den beiden Probenahmepunkten präsentiert. Es wird ein Vergleich zwischen den Probenahmestellen E1-Ersatz und dem Schornstein angestellt und dabei Bezug auf die Geruchskonzentrationen der letzten Jahre genommen. Beispielhaft sind die Probenahmeprotokolle in Anlage 9.7 aufgeführt.

InfraSampler-System

Mit dem InfraSampler-System erfolgte eine Blindwertmessung, indem Umgebungsluft angesaugt und in den Probebeutel geleitet wurde. Der Zweck dieser Blindprobe bestand darin, den Eigengeruch der Messbox zu untersuchen, seine Wahrnehmbarkeit festzustellen und ob dieser die Ergebnisse der Olfaktometrie beeinflussen könnte. Zu Beginn war ein deutlicher Eigengeruch der Messbox erkennbar, der eine Mischung aus den Gummidichtungen der Luftpumpen und des Magnetventils aufwies. Daraufhin wurden die Schläuche größtenteils durch PTFE-Schläuche ersetzt und inerte Verbindungselemente verwendet, sodass kein Eigengeruch mehr wahrnehmbar war. Nach der Probenahme wurde das InfraSampler-System in einer geruchsneutralen Umgebung mit Umgebungsluft "gespült". Dabei war weiterhin der "süßlich stechende" Geruch des CO₂ reichen Abgases wahrnehmbar, sodass das InfraSampler-System so lange mit Frischluft gespült wurde, bis kein Geruch mehr wahrnehmbar war.

E1-Ersatz

Während der Messung und Probenahme mit dem UAV am 02.11.2021 wurde an der Probenahmestelle E1-Ersatz eine Geruchsprobe entnommen. Diese diente als Vergleichswert. Aufgrund der fehlgeschlagenen UAV-Probenahme konnte keine direkte Vergleichsmessung stattfinden. Dennoch sind die Daten von Relevanz und liefern Ergebnisse zu der Probenahme mit dem UAV, da die Anlage bis zu dem nächsten Probenahmetermin kontinuierlich betrieben wurde und auch keine Änderungen in den Prozessdaten sichtbar waren. Die Probenahme erfolgte mit einem Unterdruckprobenehmer. Es wurden insgesamt zwei Probebeutel mit einem Volumen von neun Litern befüllt. Die Schläuche des Gerätes bestehen aus inertem Material und wurden nicht beheizt. Die olfaktometrische Analyse wurde wie in Kapitel 3.1.7.1 beschrieben durchgeführt.

Bei der Geruchsanalyse der Probenahmestelle E1-Ersatz, wurden typische Geruchsschwellenwerte im Bereich von 10.000 GE/m³ ermittelt. Dabei wurde der Probengeruch als „süßlich und stechend“ beschrieben.

Schornstein

Die Probenahme erfolgte mit dem InfraSampler-System, welche mit einem UAV zum Abgasstrom befördert wurde und je zwei Probebeutel mit einem Volumen von je fünf Litern befüllten. Der zweite Probebeutel wurde nicht vollständig befüllt. Grund war das Auftreten einer sicherheitsbedenklichen Wetterlage. Zudem befand sich die Probenahmelanze, während der Probenahmen nicht kontinuierlich im Abgasstrom des Schornsteins, sodass eine initiale atmosphärische Verdünnung von 2,8 (Schornstein 1) und 7 (Schornstein 2) vorliegt. Die olfaktometrische Analyse wurde wie in Kapitel 3.1.7.1 beschrieben durchgeführt. Bei der Geruchsanalyse des Abgasstroms, wurden Geruchsschwellenwerte von ca. 30 % der offiziellen Probenahme ermittelt. Der Geruch der Probe wurde wie zuvor als „süßlich und stechend“ beschrieben.

In Abbildung 59 ist klar ersichtlich, dass im Vergleich zu der Probenahme an E1-Ersatz, die Probenahme am Schornstein nur einen Anteil der eigentlichen Geruchsemission darstellt. Dies lässt sich auf die zuvor beobachtete atmosphärische Verdünnung zurückführen. Durch Anwendung der Methode zur Korrektur der atmosphärischen Verdünnung (Kapitel 4.5.1) wurde der Verdünnungsfaktor berechnet und auf das Olfaktometrieergebnis angewendet. Darauf basierend liegen die tatsächlichen olfaktorischen Ergebnisse der Probenahme am Schornstein in einem vergleichbaren Bereich wie die Probenahme an E1-Ersatz.

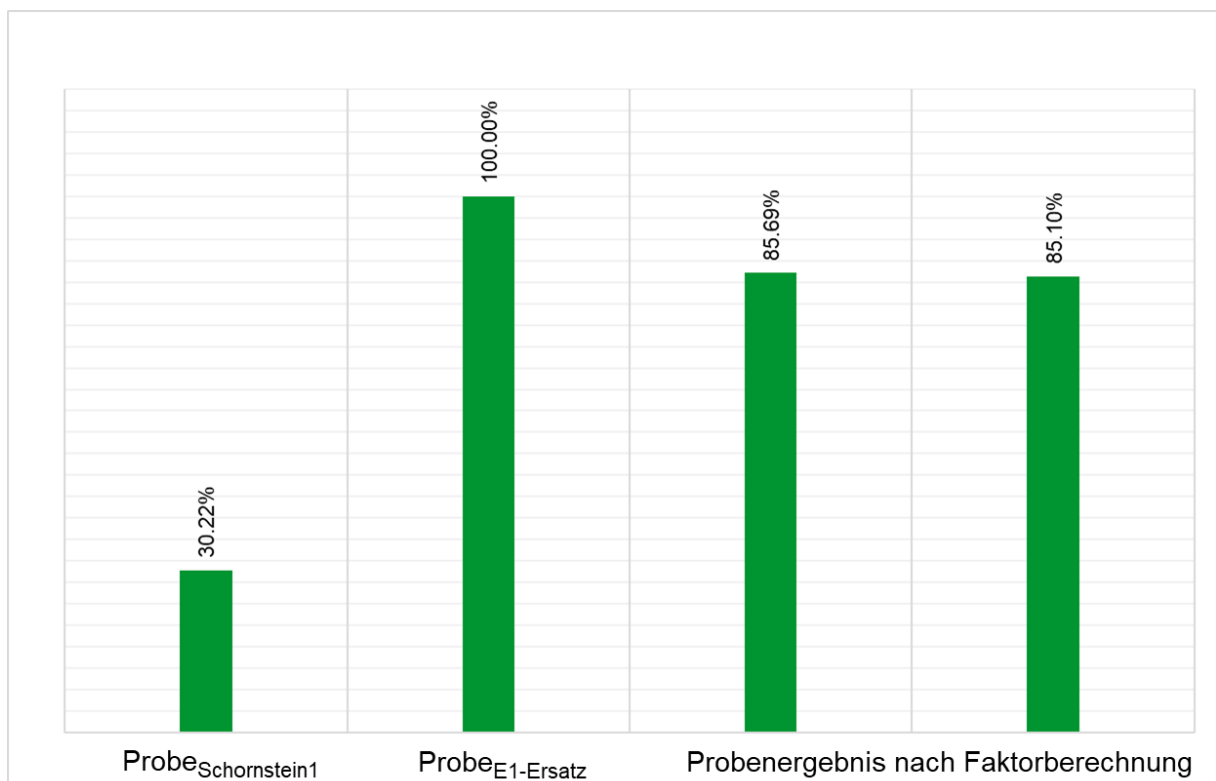


Abbildung 59: Vergleich der Geruchskonzentration der Probenahmestelle E1-Ersatz und dem Schornstein nach der Stripperkolonne. Aus den beiden E1-Ersatz Proben wurde der Mittelwert gebildet.

Der Verlauf der Geruchsstoffkonzentration bezogen auf das Abgas der Stripperkolonne aus den Jahren 2017 bis 2021 ist in Abbildung 60 aufgeführt. Innerhalb der erhobenen Messdaten lag der Wert über den herkömmlichen Geruchsbereich. Mit gelegentlichen Abweichungen sinkt dieser auf Werte wie sie in industriellen Gebieten vorherrschen. Somit war in den letzten Jahren bei gleichem Betriebszustand eine deutliche Abnahme Geruchsemissionen erkennbar. Die Geruchsstoffkonzentrationen der in dieser Arbeit durchgeführten Probenahmen befinden sich im durchschnittlichen Konzentrationsbereich industrieller Anlagen (gelbe Markierung).

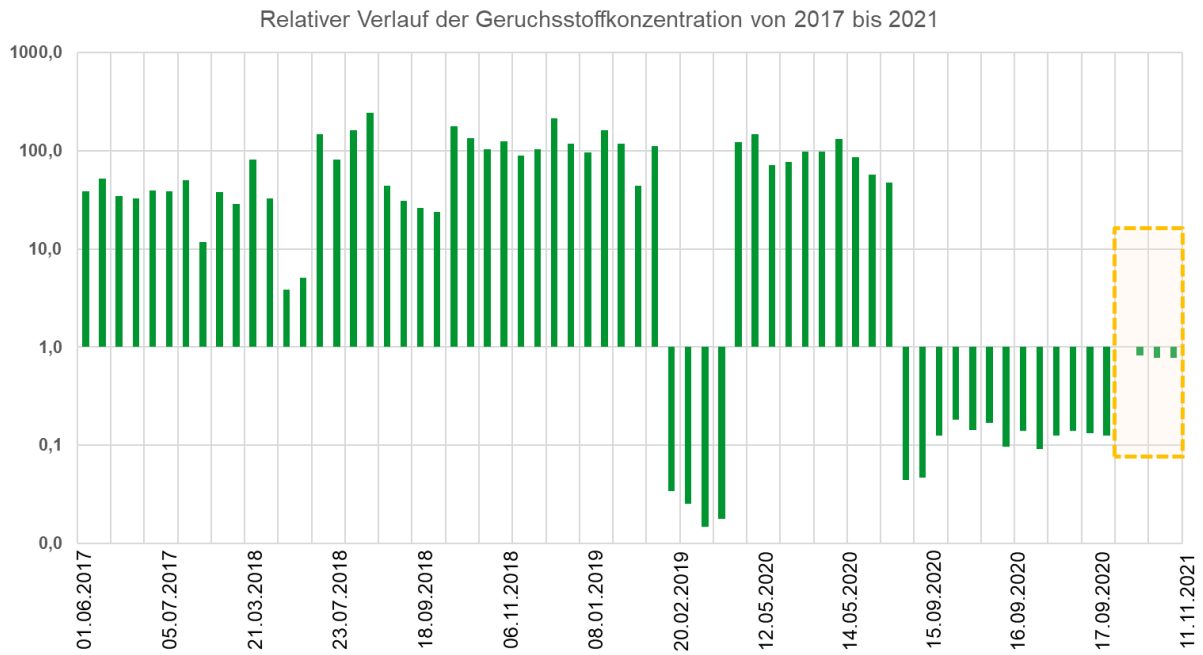


Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der relativen Geruchsstoffkonzentration eines geruchselbstenden Abgases bezogen auf die offizielle Messung vom 02.11.2021.

6.2 Stationäre Messkampagne im IPH

Nachfolgend sind die Ergebnisse der einjährigen Messkampagne mit stationärer Sensorik im Vergleich zu den Luftmessstationen aufgeführt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur Anwendung von Mikrosensorik, welche sich stationär bewährt hat und aufgrund dessen in der mobilen Messung mit UAV weiter Verwendung findet.

6.2.1 Ergebnisunsicherheit

Die Ergebnisunsicherheit setzt sich zusammen aus der Messunsicherheit und der Unsicherheit des Erhebungsprozesses. Dieser wird beeinflusst durch die Schwankungen der Konzentrationen am Messort. Da die fortlaufende Messung der Luftverunreinigungen keinen Beitrag zur Unsicherheit der zeitlichen Verteilung liefert, kann die Ergebnisunsicherheit der Messunsicherheit gleich gesetzt werden.

Die nach DIN EN 13005 ermittelten Messunsicherheiten der eingesetzten Messgeräte / Messverfahren der Messstationen IPH sind in Tabelle 30 im Anhang zusammen mit den Nachweisgrenzen angegeben. Die Messunsicherheiten des IMB und des Mikrosystems sind jeweils in Tabelle 31 und Tabelle 32 im Anhang nachzulesen.

6.2.2 Messergebnisse

Für eine Beschreibung der zeitlichen Variation der Messwerte über alle Messsysteme sind folgend zusammengefasste Abbildungen der Immissionssituation im Industriepark Höchst vom 01.12.2021 bis zum 01.12.2022 dargestellt. Die Darstellungen sind in Stunden-, Tages-, Monats- und Jahresmittelwerte aufgeteilt. Zusätzlich sind die Parameter Schwefeldioxid (SO₂) und leichtflüchtige organische Kohlenstoffe (VOCs) separat aufgeführt.

Ab dem 17.08.2022 wurden die Messsysteme in den Südbereich des IPH umgezogen, um vergleichbare Ergebnisse für Schwefeldioxid zu erhalten. Aufgrund der Entfernung zu den Vergleichsmessungen im Westen des IPH, kann es ab diesem Zeitpunkt zu größeren Abweichungen der Messwerte kommen. Das Mikrosystem lieferte aufgrund eines Hardwarefehlers, ein Schnittstellenproblem zwischen der Kommunikation des SO₂-Sensors, den Feinstaubsensoren und dem restlichen System, keine brauchbaren Messwerte mehr, welche in der Ergebnisdarstellung berücksichtigt werden. Für den Parameter Feinstaub sind keine Messwerte des IMB-Moduls für Juni und Juli verfügbar, da aufgrund eines Softwareupdates keine Aufzeichnung stattfinden konnte.

6.2.2.1 Stundenmittelwerte

In Abbildung 68 sind die Konzentrationswerte der Luftschadstoffe jeweils in der Einheit „Mikrogramm pro Kubikmeter Luft“ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) angegeben. Die gemessenen Feinstaubfraktionen PM10 und PM2,5 beinhalten Partikel mit einem Durchmesser kleiner oder gleich 10 bzw. 2,5 Mikrometer (μm).

Die standardisierten Residuen liefern ein standardisiertes Maß für den Abstand zwischen den beobachteten Daten (Referenzmethode) und den Zielvariablen (Vergleichsmethode). Dieser Abstand wird anhand der Anzahl der Standardabweichungen vom vorhergesagten Wert gemessen. Der Nutzen besteht in der objektiven Methode, Ausreißer oder bedeutende Datenpunkte zu identifizieren.

Für die Komponenten Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rH), Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Feinstaub (PM2,5) und Feinstaub (PM10) und Kohlenmonoxid (CO) sind auf den folgenden Seiten je eine Verlaufsgrafik der Stundenmittelwerte für den Zeitraum von zwölf Monaten dargestellt. Mittels dieser Darstellungen lässt sich pro Komponente ein vollständiger Jahresgang verfolgen.

Temperatur

Die Werte der Temperatur-Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $13,25\text{ }^\circ\text{C}$ (IPH West) und $14,70\text{ }^\circ\text{C}$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $-4,40\text{ }^\circ\text{C}$ und $38,20\text{ }^\circ\text{C}$ (IPH West) und $-3,87\text{ }^\circ\text{C}$ und $43,34\text{ }^\circ\text{C}$ (IMB). Das Regressionsmodell zeigt einen klaren linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,9502$. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,65 % der Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 61).

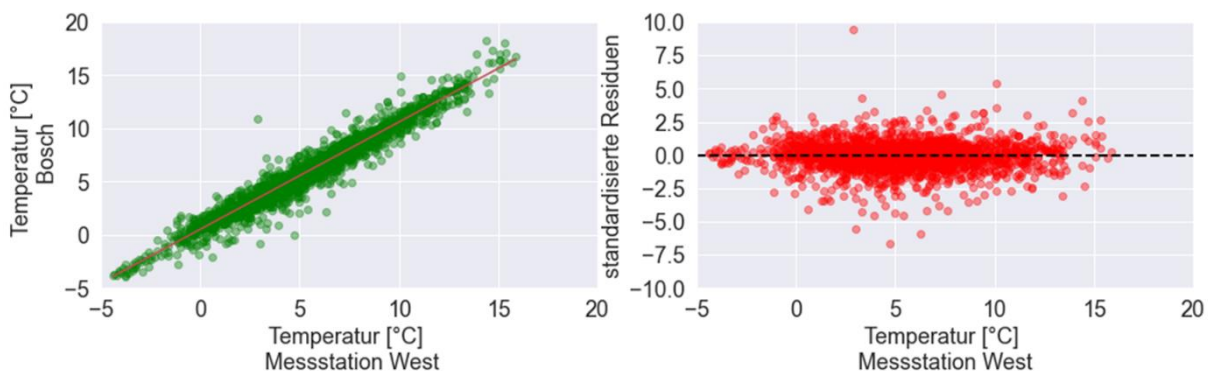


Abbildung 61: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von der Temperatur.

Relative Luftfeuchtigkeit

Die Werte der Luftfeuchtigkeit-Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $71,53\text{ }%$ (IPH West) und $72,83\text{ }%$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $19,00\text{ }%$ und $100,00\text{ }%$ (IPH West) und zwischen $15,27\text{ }%$ und $111,15\text{ }%$ (IMB). Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem

Gütekriterium von $R^2 = 0,9446$. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,48 % der Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 62).

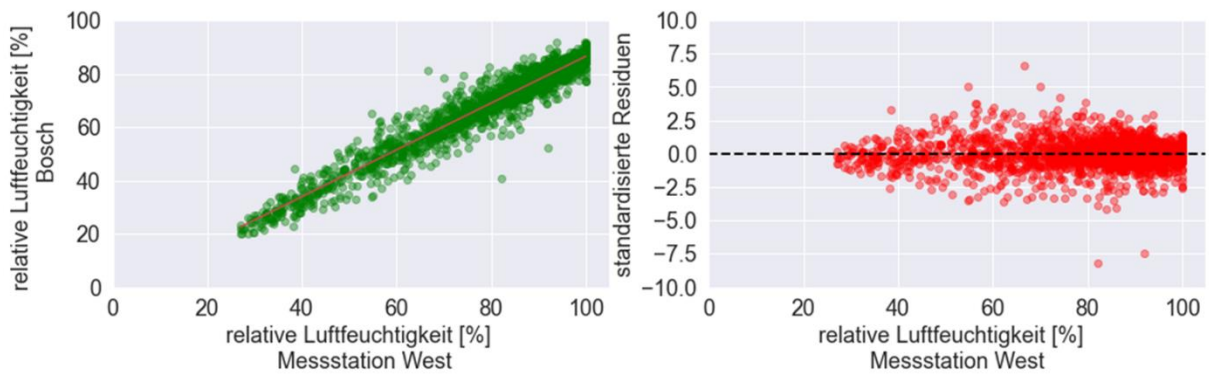


Abbildung 62: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von der rel. Luftfeuchtigkeit.

Stickstoffdioxid

Die Werte der NO_2 -Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $19,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und $19,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $85,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und zwischen $-35,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $92,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,7693$. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,98 % der Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 63).

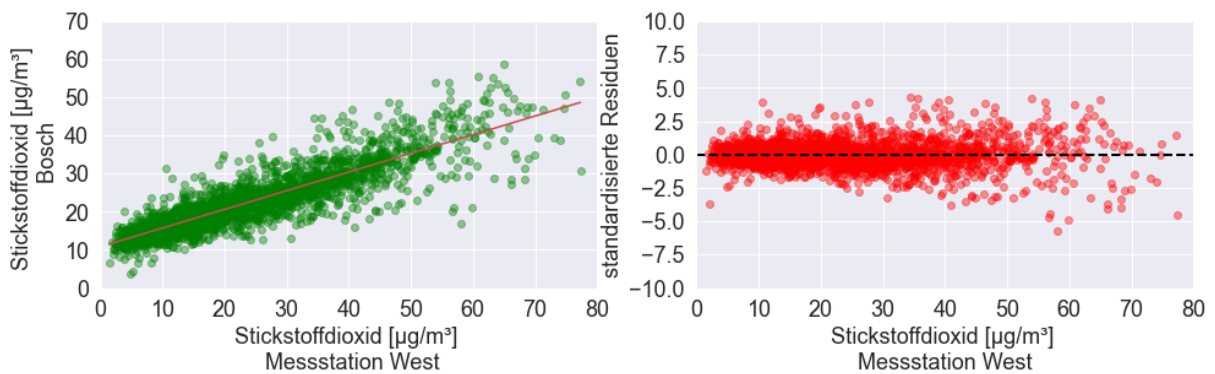


Abbildung 63: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Stickstoffdioxid.

Ozon

Die Werte der O_3 -Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $56,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und $40,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $-115,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $254,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und zwischen $-33,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $156,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Die Ozon-Werte des IMB haben immer ein leichter negativer Offset im Bezug auf die gemessene Ozon-Konzentration der Messstation West. Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,8472$. Anhand

der standardisierten Residuen werden 0,99 % der Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 64).

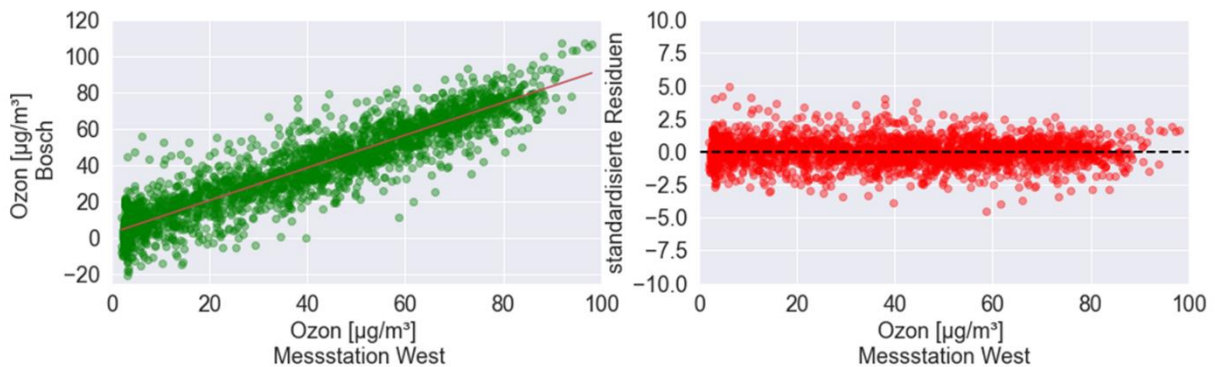


Abbildung 64: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Ozon.

Feinstaub PM2,5

Die Werte der PM2,5-Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $7,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und $6,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $45,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und zwischen $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $52,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,7975$. Mit steigenden Konzentrationen ist eine größere Abweichung der Messwerte zu erkennen. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,78 % der Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 65). Weiterhin ist eine eindeutige Heteroskedastizität zu erkennen.

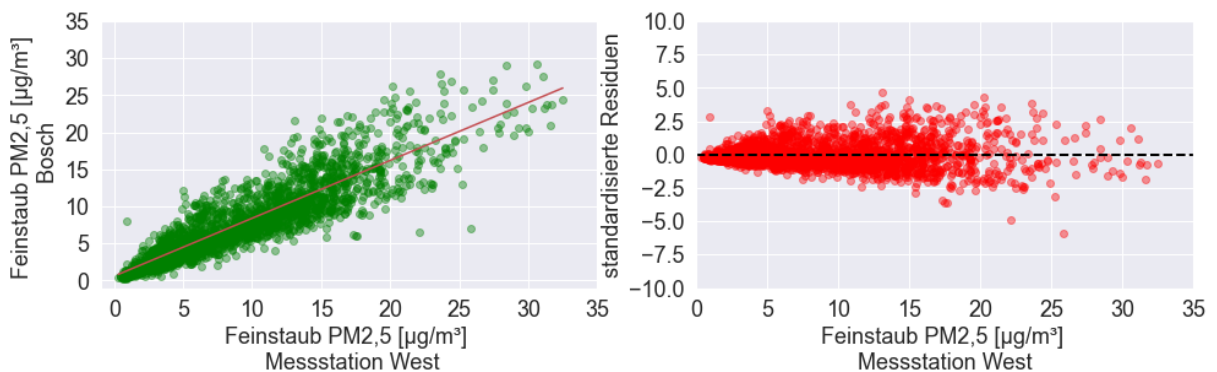


Abbildung 65: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Feinstaub PM2,5.

Feinstaub PM10

Die Werte der PM10-Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel $11,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und $10,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen $0,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $52,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und zwischen $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $147,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,6510$. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,61 % der

Messwerte als Ausreißer deklariert (Abbildung 66). Weiterhin ist eine eindeutige Heteroskedastizität zu erkennen.

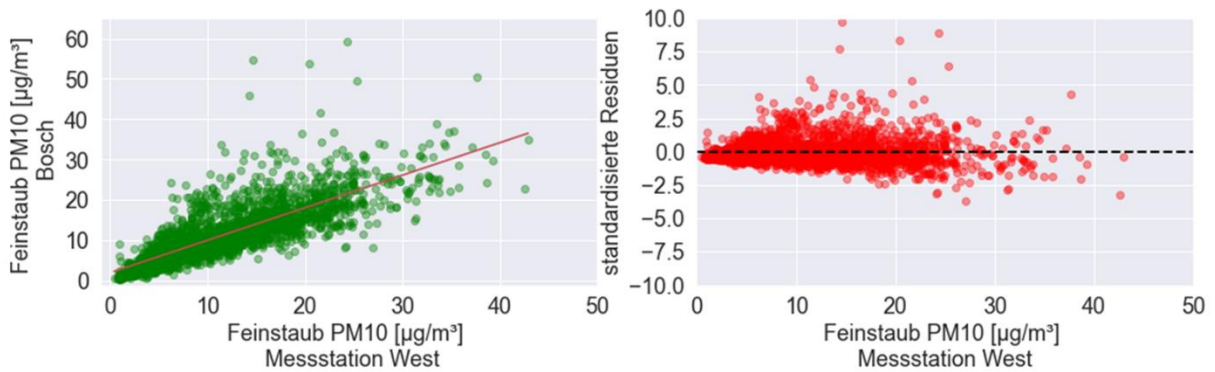


Abbildung 66: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Feinstaub PM10.

Kohlenstoffmonoxid

Die Werte der CO-Messreihe (Abbildung 68) betragen im Mittel 236,45 µg/m³ (IPH Süd) und 223,29 µg/m³ (IMB). Dabei Schwanken die Werte zwischen 83,69 µg/m³ und 909,60 µg/m³ (IPH Süd) und -89,00 µg/m³ und 3690,34 µg/m³ (IMB).

Das Regressionsmodell beweist einen eindeutigen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden, mit einem Gütekriterium von $R^2 = 0,5228$. Anhand der standardisierten Residuen werden 1,24 % der Messwerte als Ausreißer deklariert.

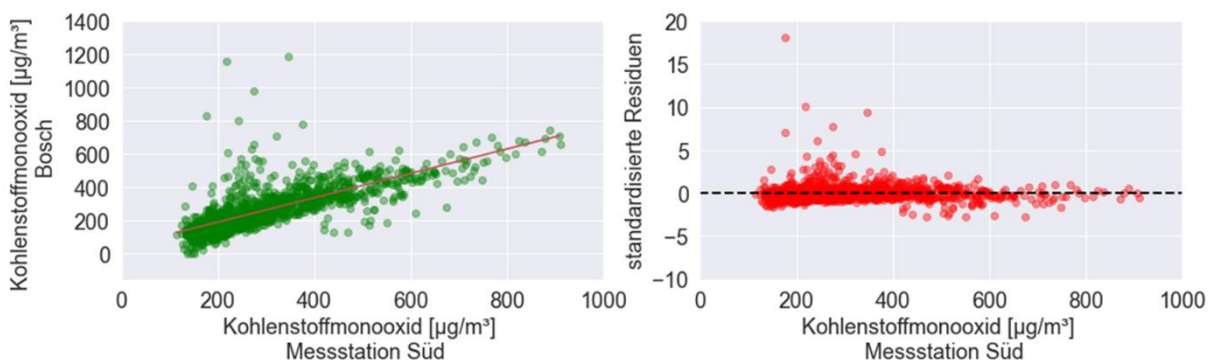


Abbildung 67: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Kohlenstoffmonoxid.

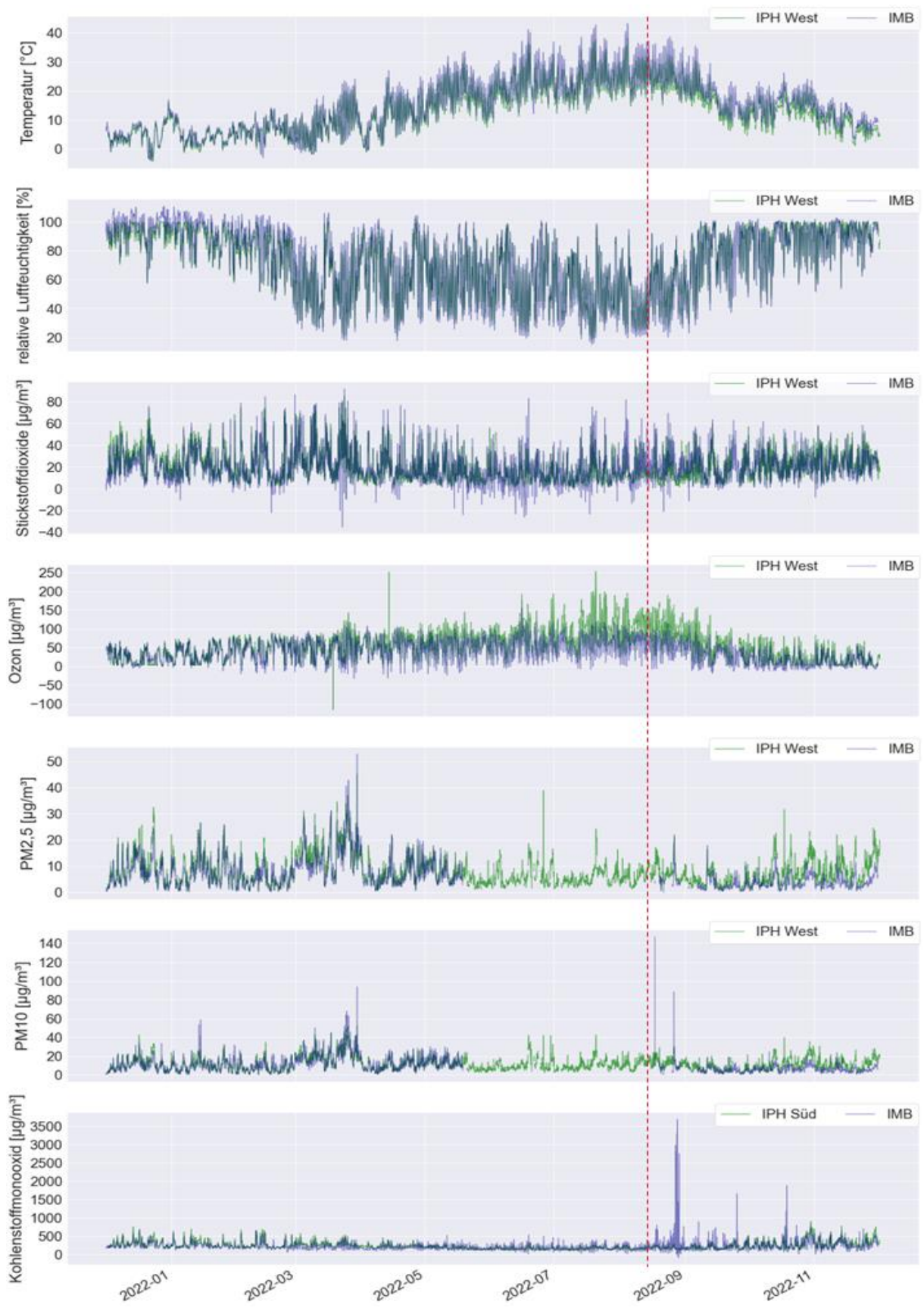


Abbildung 68: Stundemittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.

6.2.2.2 Tagesmittelwerte

In Abbildung 69 sind die Tagesmittelwerte der Vergleichsmessung dargestellt. Für die Komponenten Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rH), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Feinstaub (PM_{2,5}) und Feinstaub (PM₁₀) und Kohlenmonoxid (CO) sind auf den folgenden Seiten je eine Verlaufsgrafik der Tagesmittelwerte für den Zeitraum von zwölf Monaten dargestellt. Mittels dieser Darstellungen lässt sich pro Komponente ein vollständiger Jahresgang verfolgen.

In den Darstellungen sind die Konzentrationswerte der Luftschadstoffe jeweils in der Einheit „Mikrogramm pro Kubikmeter Luft“ (µg/m³) angegeben. Die gemessenen Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} beinhalten Partikel mit einem Durchmesser kleiner oder gleich 10 bzw. 2,5 Mikrometer (µm).

Temperatur

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 13,20 °C (IPH West), 14,69 °C (IMB) und 7,42 °C (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen -1,62 °C und 29,77 °C (IPH West), -1,40 °C und 32,89 °C (IMB) und zwischen 0,00 °C und 14,37 °C (Mikro).

Relative Luftfeuchtigkeit

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 71,58 % (IPH West), 71,85 % (IMB) und 46,09 % (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 34,63 % und 100,00 % (IPH West), 33,83 % und 104,21 % (IMB) und zwischen 0,03 % und 98,00 % (Mikro).

Stickstoffdioxid

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 19,40 µg/m³ (IPH West), 19,39 µg/m³ (IMB) und 12,58 µg/m³ (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 3,41 µg/m³ und 49,64 µg/m³ (IPH West), 3,02 µg/m³ und 46,70 µg/m³ (IMB) und zwischen 1,42 µg/m³ und 49,19 µg/m³ (Mikro).

Ozon

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 56,08 µg/m³ (IPH West), 40,37 µg/m³ (IMB) und 41,41 µg/m³ (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 1,80 µg/m³ und 143,47 µg/m³ (IPH West), -3,51 µg/m³ und 79,92 µg/m³ (IMB) und zwischen 0,27 µg/m³ und 90,77 µg/m³ (Mikro). Die Werte der Messstation IPH West liegen immer über den anderen Messreihen.

Feinstaub PM2,5

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 7,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 6,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 1,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 30,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 0,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 32,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

Feinstaub PM10

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 11,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 10,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 2,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 41,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 1,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 48,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

Kohlenstoffmonoxid

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 236,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und 223,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 125,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 721,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und 110,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 1059,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

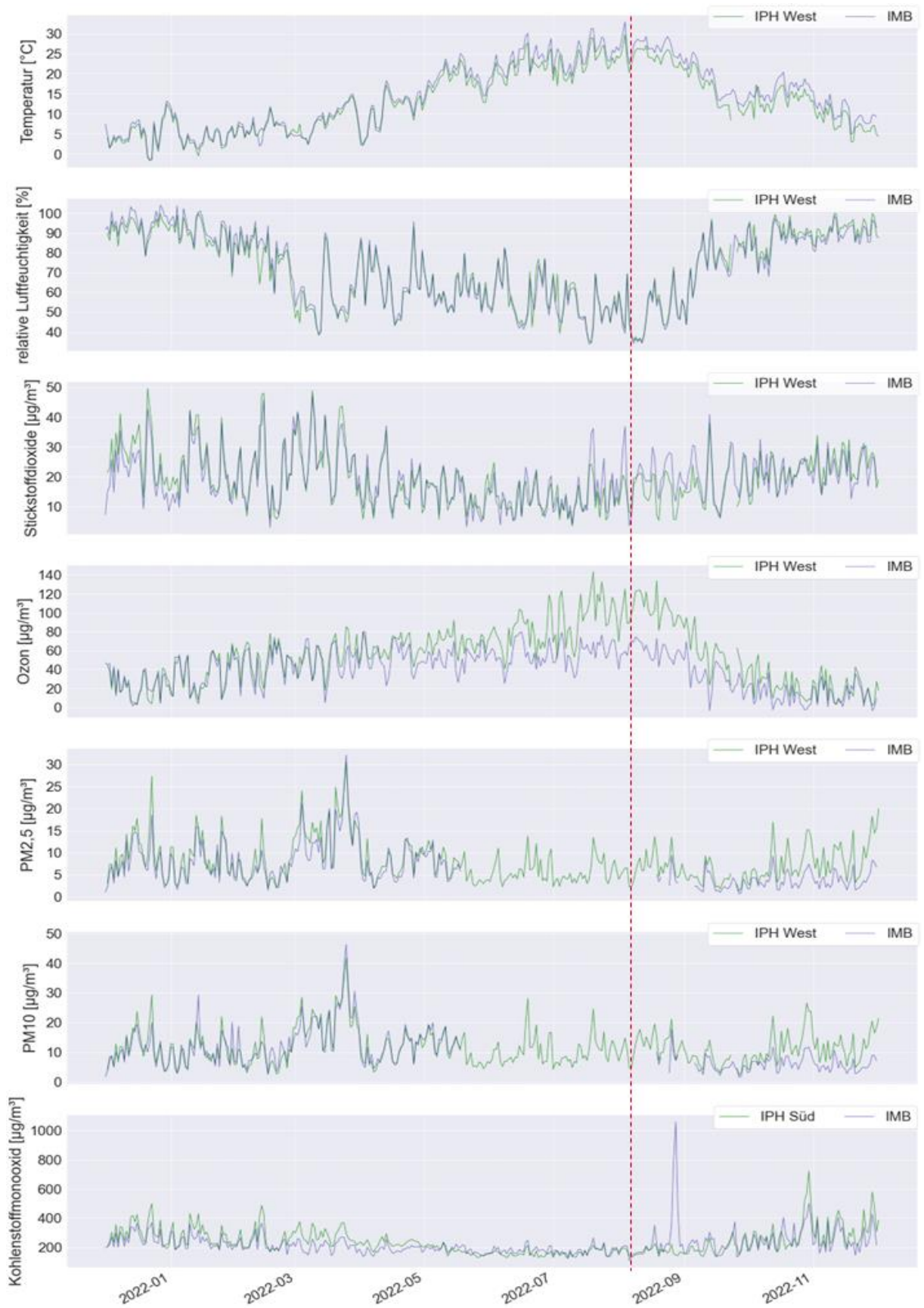


Abbildung 69: Tagesmittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.

6.2.2.3 Monatsmittelwerte

In Abbildung 70 sind die Monatsmittelwerte der Vergleichsmessung dargestellt. Für die Komponenten Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rH), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Feinstaub (PM_{2,5}) und Feinstaub (PM₁₀) und Kohlenmonoxid (CO) sind auf den folgenden Seiten je eine Verlaufsgrafik der Monatsmittelwerte für den zurückliegenden Zeitraum von zwölf Monaten dargestellt. Mittels dieser Darstellungen lässt sich pro Komponente ein vollständiger Jahresgang verfolgen.

In den Darstellungen sind die Konzentrationswerte der Luftschadstoffe jeweils in der Einheit „Mikrogramm pro Kubikmeter Luft“ (µg/m³) angegeben. Die gemessenen Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} beinhalten Partikel mit einem Durchmesser kleiner oder gleich 10 bzw. 2,5 Mikrometer (µm).

Temperatur

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 12,95 °C (IPH West), 15,92 °C (IMB) und 7,39 °C (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 3,94 °C und 24,57 °C (IPH West), 4,76 °C und 26,72 °C (IMB) und zwischen 5,37 °C und 9,69 °C (Mikro).

Relative Luftfeuchtigkeit

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 73,59 % (IPH West), 75,06 % (IMB) und 34,40 % (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 50,50 % und 92,26 % (IPH West), 52,07 % und 101,69 % (IMB) und zwischen 0,08 % und 97,91 % (Mikro). Die Messreihen der Sensoren IPH West und IMB sind in sich einheitlich.

Stickstoffdioxid

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 19,26 µg/m³ (IPH West), 19,26 µg/m³ (IMB) und 12,76 µg/m³ (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 12,10 µg/m³ und 26,93 µg/m³ (IPH West), 12,59 µg/m³ und 26,91 µg/m³ (IMB) und zwischen 7,31 µg/m³ und 19,54 µg/m³ (Mikro).

Ozon

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 54,15 µg/m³ (IPH West), 40,99 µg/m³ (IMB) und 34,32 µg/m³ (Mikro). Dabei schwanken die Werte zwischen 18,09 µg/m³ und 107,05 µg/m³ (IPH West), 11,57 µg/m³ und 59,26 µg/m³ (IMB) und zwischen 0,27 µg/m³ und 82,82 µg/m³ (Mikro).

Feinstaub PM2,5

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 8,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 6,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 5,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 14,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 2,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 14,55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

Feinstaub PM10

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 11,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 10,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 8,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 17,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und 4,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 21,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Die Messreihen der Sensoren IPH West und IMB sind in sich einheitlich, allerdings.

Kohlenstoffmonoxid

Die Werte der Messreihe betragen im Mittel 232,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und 229,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen 155,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 322,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und 175,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 276,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

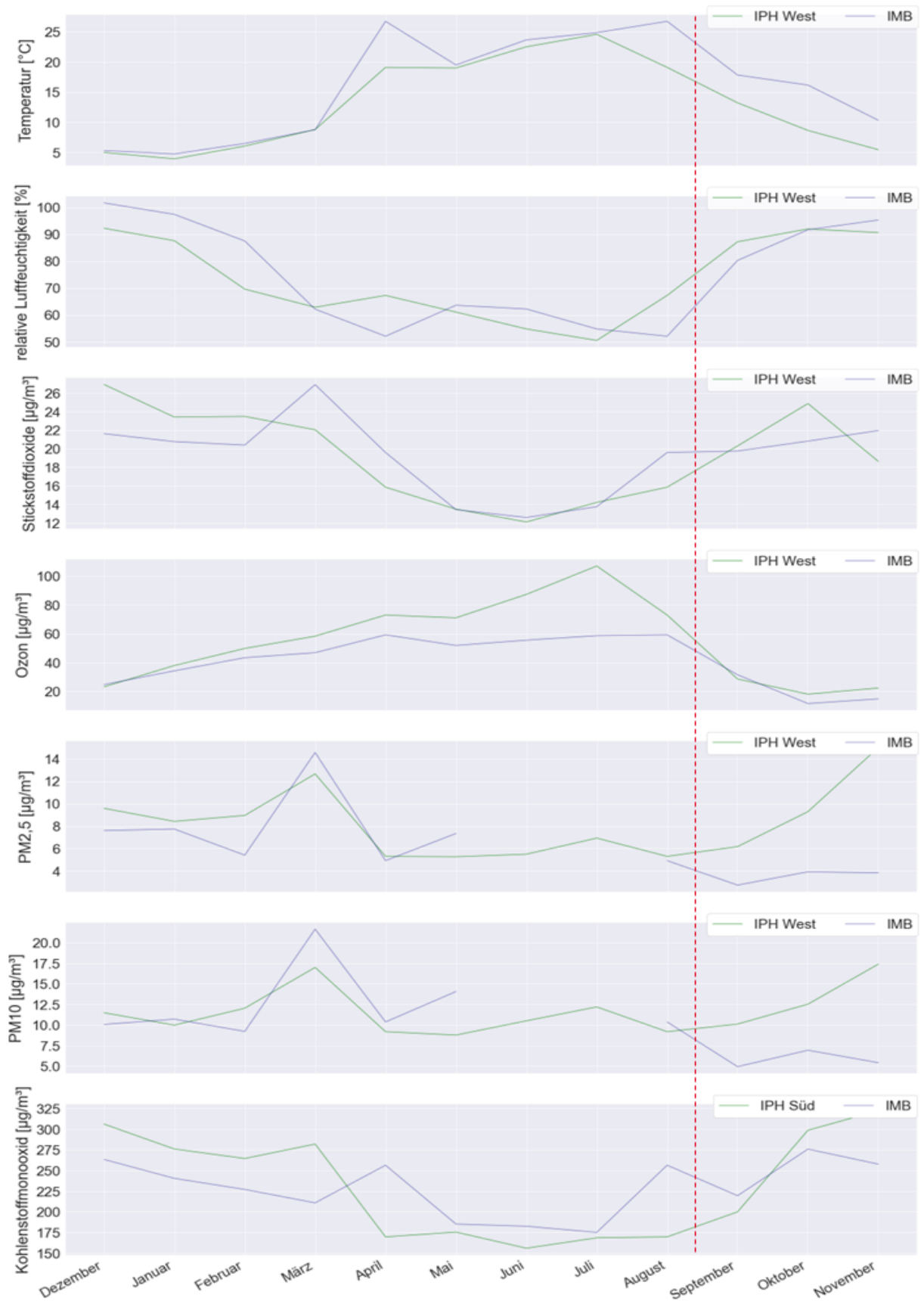


Abbildung 70: Monatsmittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.

6.2.2.4 Jahresmittelwerte

Für die Komponenten Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rH), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Feinstaub (PM_{2,5}) und Feinstaub (PM₁₀), Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO₂) sind auf der folgenden Seite je der Jahresmittelwerte für den zurückliegenden Zeitraum von zwölf Monaten (12.2021 - 12.2022) tabellarisch dargestellt.

Tabelle 23: Vergleich der Jahresmittelwerte der unterschiedlichen Messsysteme. Die angegebenen Grenzwerte wurden aus der gültigen TA Luft übernommen. Aufgrund der Analysengerätebelegung auf den unterschiedlichen Luftmessstationen, kommt es zu fehlenden Messwerten. Das gilt für die Luftmessstation Süd (Feinstäube) und die Luftmessstation West (CO).

Parameter	Messsystem	Jahresmittelwert		98-Perzentil
		Messwert	Grenzwert	Messwert
Stickstoffdioxid [µg/m ³]	Messstation West	19,40	(40)	52,84
	Messstation Süd	15,56		46,50
	Mikrosystem	18,19		49,62
	IMB	19,40		54,42
Ozon [µg/m ³]	Messstation West	56,40	-	151,78
	Messstation Süd	-		-
	Mikrosystem	71,76		90,61
	IMB	40,45		95,61
Feinstaub PM_{2,5} [µg/m ³]	Messstation West	7,91	(25)	22,20
	Messstation Süd	-		-
	Mikrosystem	13,37		99,32
	IMB	6,70		22,15
Feinstaub PM₁₀ [µg/m ³]	Messstation West	11,52	(40)	30,14
	Messstation Süd	-		-
	Mikrosystem	1,90		47,79
	IMB	10,36		31,20
Kohlenstoffmonoxid [µg/m ³]	Messstation West	-	-	-
	Messstation Süd	189,00		536,93
	Mikrosystem	1397,59		61,30
	IMB	223,33		498,67
Schwefeldioxid [µg/m ³]	Messstation West	2,6	(50)	8,94
	Messstation Süd	12,65		67,09
	Mikrosystem	2,12		3,79
	IMB	-11,24		43,83

6.2.2.5 Schwefeldioxid

Aufgrund von Messproblemen und Modellanpassungen in dieser Studie wurde Schwefeldioxid (SO_2) separat betrachtet. In Abbildung 71 ist die Zeitreihe von SO_2 am Messpunkt der Luftmessstation West dargestellt. An diesem Standort sind aufgrund der vorherrschenden Windrichtung und umliegenden Betriebe keine hohen SO_2 -Konzentrationen zu erwarten. Die Werte betragen im Mittel $3,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und $2,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken sie zwischen $1,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $57,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH West) und zwischen $-26,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $37,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Es ist zu erkennen, dass die SO_2 -Konzentration des IMB auf- und absteigt, jedoch keine Korrelation mit den Messergebnissen der Referenzmethode aufweist. Die NO_2 -Konzentration wird ebenfalls dargestellt, da bekannt ist, dass es eine Querempfindlichkeit zu diesem Parameter gibt. Dadurch wird deutlich, dass der Sensor außerhalb seines Messbereichs NO_2 -Werte anstelle von SO_2 -Werten ausgibt. Dies wird in Abbildung 71, a) durch die Referenzmethode (rote Linie), die auf einer Basisebene liegt, und die Vergleichsmethode (violette Linie), deren Verlauf dem der NO_2 -Konzentration ähnelt, verdeutlicht. Wenn die Referenzmethode erhöhte SO_2 -Konzentrationen misst, passt sich die Vergleichsmethode entsprechend an und zeigt ebenfalls einen Anstieg der SO_2 -Werte an. Dies geschieht, weil die Querempfindlichkeit in diesem Moment an Einfluss verliert. (Abbildung 71, b) und c)).

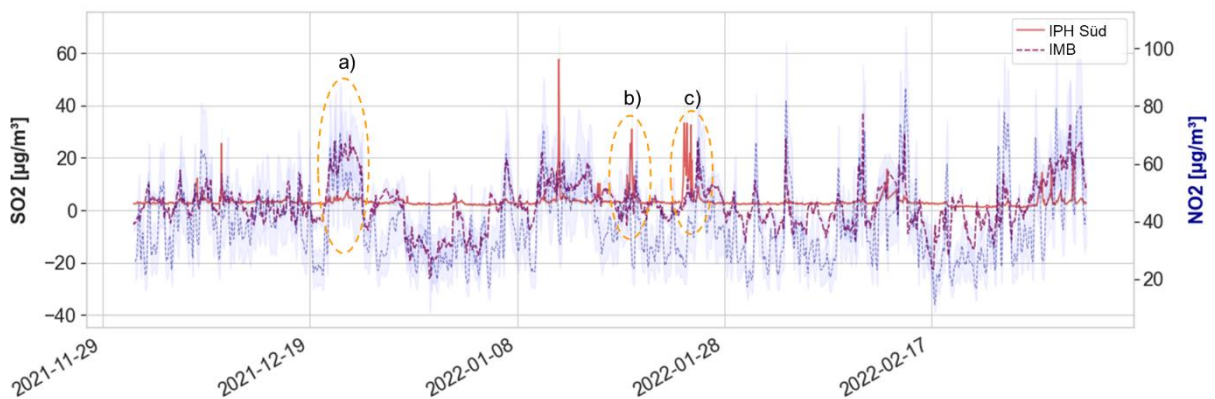


Abbildung 71: Stundenmittelwert von Schwefeldioxid am Standort IPH West. Die SO_2 -Konzentration liegt außerhalb vom Messbereich des IMB-Sensors.

Aufgrund der Beobachtungen im ersten Halbjahr wurde das IMB zur Luftmessstation Süd verlagert, da aufgrund von betriebsabhängigen Abfüllprozessen, mit höheren SO_2 -Konzentrationen zu rechnen ist. Die Werte in Abbildung 72 nach Standortwechsel des Sensors in den Süden des IPH betragen im Mittel $15,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und $2,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB). Dabei schwanken die Werte zwischen $2,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $79,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IPH Süd) und zwischen $-26,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $37,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB).

Aufgrund des deutlich erkennbaren negativen Abweichungsmusters der SO_2 -Konzentration im Vergleich zur Referenzmethode bedarf es einer Anpassung des Modells für eine quantitative Auswertung. Für eine qualitative Beurteilung genügt jedoch die Berücksichtigung des Messbereichs des Sensors und des Einflusses von NO_2 .

Im markierten gelben Bereich der Abbildung 72 ist der gleichartige Verlauf der Vergleichsmethode (IMB) zur Referenzmethode (IPH Süd) erkennbar. Diese Anstiege konnten aufgrund von Abfüllvorgängen zu diesem Zeitpunkt vom verantwortlichen Betrieb bestätigt werden. Ein ein sichtbarer Einfluss der NO₂-Konzentration auf das Messergebnis, wie in der ersten Hälfte der Messkampagne, ist nicht feststellbar.

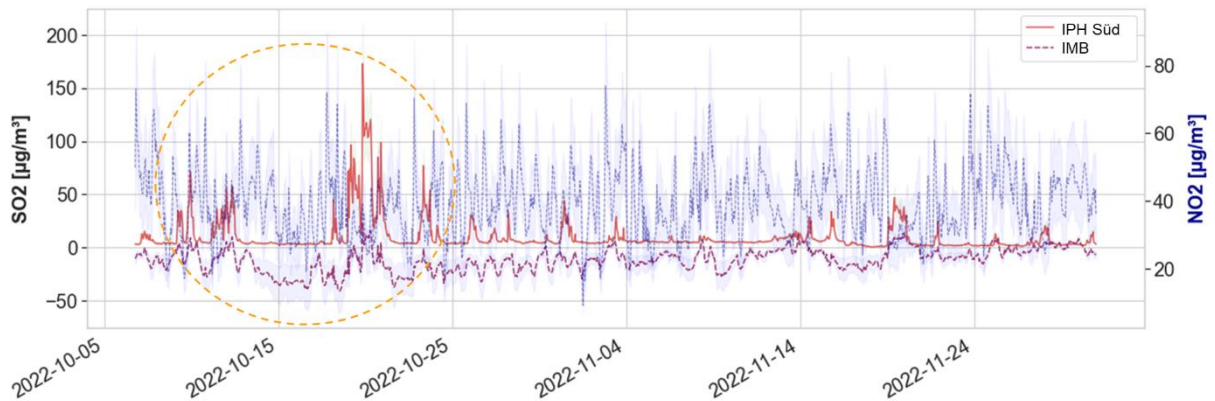


Abbildung 72: Stundenmittelwert von Schwefeldioxid am Standort IPH Süd. Die SO₂-Konzentration liegt am Standort-Süd innerhalb vom Messbereich des IMB-Sensors.

Die Reduzierung der Querempfindlichkeit ist durch die Regressionsanalyse der beiden Standorte ersichtlich, wobei das Bestimmtheitsmaß zwischen SO₂ und NO₂ mit Standortwechsel von $R^2 = 0,9814$ auf $R^2 = 0,0196$ deutlich abnimmt (Abbildung 73).

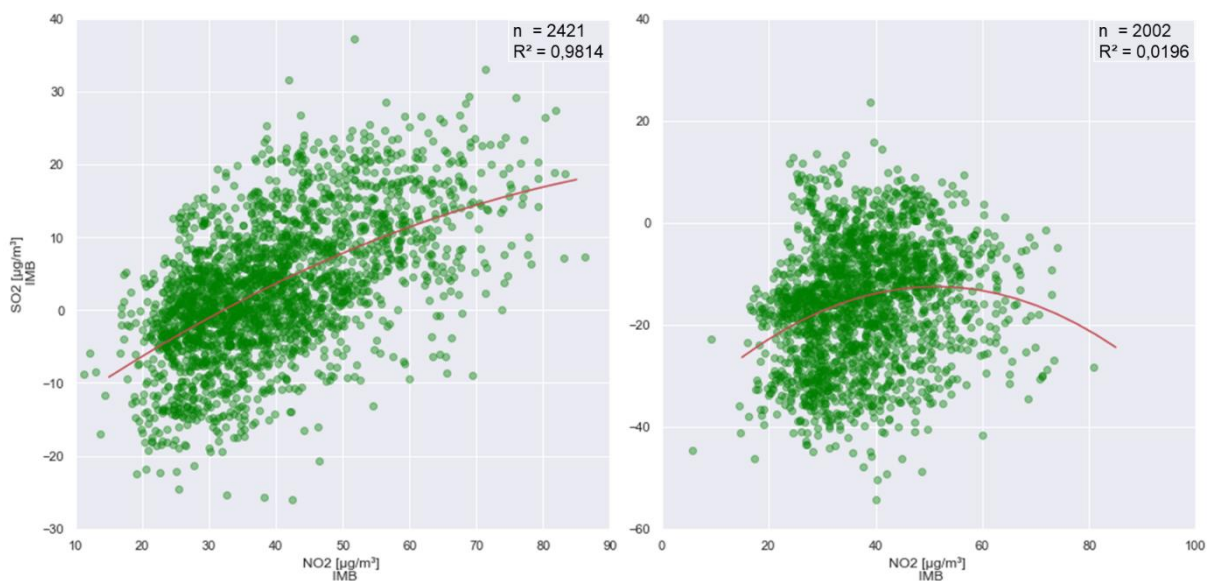


Abbildung 73: Quadratische Regression mit Bestimmtheitsmaß zur Darstellung des Einflusses der Querempfindlichkeit von NO₂ auf die SO₂-Messung nach Standortwechsel.

6.2.2.6 Leichtflüchtige organische Kohlenstoffe

In dem Mikrosystem wurde ein Widerstandssensor (BME680) verbaut, welcher anhand der Stromstärke bei Kontakt zu VOC eine Aussage über einen VOC-Index ermöglicht. Der Sensor ist ausschließlich auf Ethanol kalibriert, sodass keine quantitative Aussage zu in der Luft

enthaltenen Gemischen möglich ist. Weiterhin ist nicht bekannt, wie empfindlich der Sensor auf unterschiedliche Mischungsverhältnisse in der Luft reagiert.

In Abbildung 74 sind die Konzentrationswerte leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe jeweils in der Einheit „Mikrogramm pro Kubikmeter Luft“ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) und IAQ-Index angegeben. Für die Komponenten organischen Kohlenstoffen (org. C), Methan (CH_4), gesamte Kohlenwasserstoffe (THC) und leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC) sind folgend je eine Verlaufsgrafik der Stundenmittelwerte für den Zeitraum von zwölf Monaten dargestellt. Mittels dieser Darstellungen lässt sich pro Komponente ein vollständiger Jahrgang verfolgen.

In Tabelle 24 sind die deskriptiven Werte des gesamten Messzeitraumes aufgeführt. Dabei handelt es sich bei den Parametern Org. C und THC um Summenparameter. Der VOC-Wert wird ausschließlich qualitativ betrachtet. Es ist erkennbar, dass die ersten drei Parameter direkt miteinander verglichen werden können, während VOC normalerweise auf einem Niveau von 1 liegt und nur in kurzen Aufnahmen einen starken Anstieg auf bis zu 500 IAQ durchführt.

Tabelle 24: Deskriptive Zusammenfassung der Messergebnisse über den Gesamtzeitraum von zwölf Monaten.

Zeitpunkt	Parameter	Mittelwert	Minimum	Maximum
01.12.2021 - 01.04.2022	CH₄ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1384	1274	2258
01.04.2022 - 15.08.2022		1377	1294	2328
15.08.2022 - 01.12.2022		1396	1299	1947
01.12.2021 - 01.04.2022	Org. C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	261	102	900
01.04.2022 - 15.08.2022		154	11	847
15.08.2022 - 01.12.2022		199	35	911
01.12.2021 - 01.04.2022	THC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1479	1316	2586
01.04.2022 - 15.08.2022		1433	1321	2541
15.08.2022 - 01.12.2022		1468	1333	2128
01.12.2021 - 01.04.2022	VOC [-]	29	1	408
01.04.2022 - 15.08.2022		9	1	497
15.08.2022 - 01.12.2022		9	1	500

Der VOC-Sensor reagiert in 97,3 % der Fälle, in denen der organische Kohlenstoff (Org. C) den Wert von $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet, dabei variiert der gemessene VOC-Wert zwischen 2 bis 500 IAQ. Während des gesamten Messzeitraumes liegen 1,3 % der Messwerte (Org. C) über $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

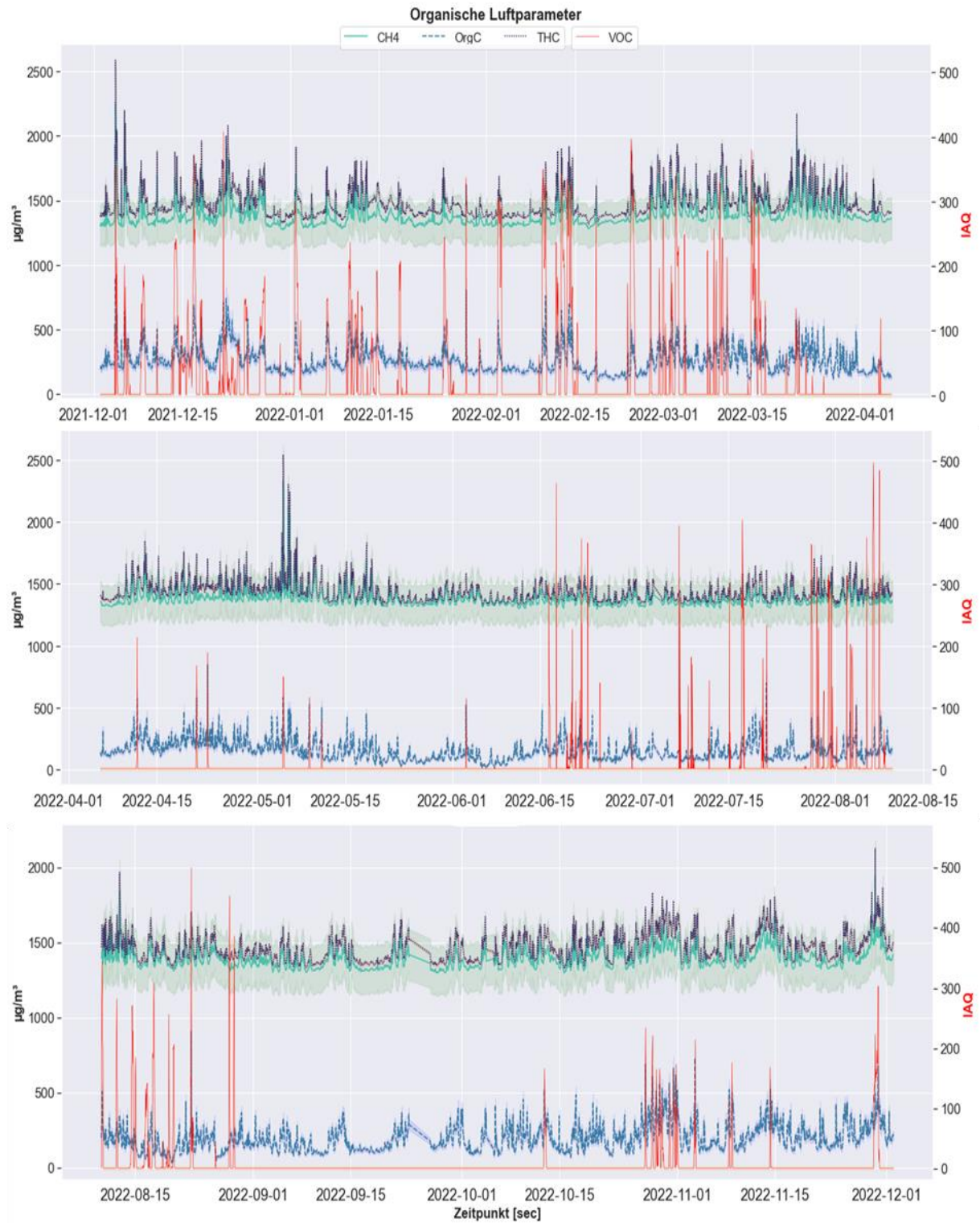


Abbildung 74: Stundenmittelwerte vom VOC-Index (rechte Skala), verglichen mit den Parametern, organischer Kohlenstoff (Org. C), Methan (CH₄) und gesamten Kohlenwasserstoffen (THC) (linke Skala).

6.3 Quantifizierung simulierter Gasfahnen

Im Rahmen der Fallstudie wurden Vergleichsmessungen zwischen den Messinstrumenten vom InfraSampler und Messgeräten anderer Fallstudienteilnehmer durchgeführt (Kapitel 5.3). Das Hauptziel dieser Untersuchung war die Validierung der Methode zur Messung der Transmission im Zusammenhang mit der simulierten Gasfahne aus CO₂ und CH₄. Ein weiteres Ziel bestand im Vergleich der verfügbaren Module sowie der Analyse der Unterschiede, die sich aus der Messungen oberhalb bzw. unterhalb der Rotoren ergeben. Das UAS führte an jedem MP eine Mindestaufnahme von 30 s durch. Der Versuchstag war klar mit einer Durchschnittstemperatur von ca. 7 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 42 %.

6.3.1 Horizontale Ausbreitungsfahne

Anhand des gemessenen Indikators CH₄, der mit den Gastransmittern erfasst wurde, lässt sich in Abbildung 75 und Abbildung 79 die ausgebildete Gasfahne auf eine Höhe von weniger als 2,3 m und eine maximale Länge von etwa 3 m abschätzen. Diese Angaben sind als ungefähre Werte zu betrachten, da die Ausbreitungsfahne aufgrund wind- und drohneninduzierter Strömungen hoch dynamisch sein kann. In Abbildung 75 ist die aufgenommene CH₄-Konzentration des ersten Versuches zu sehen.

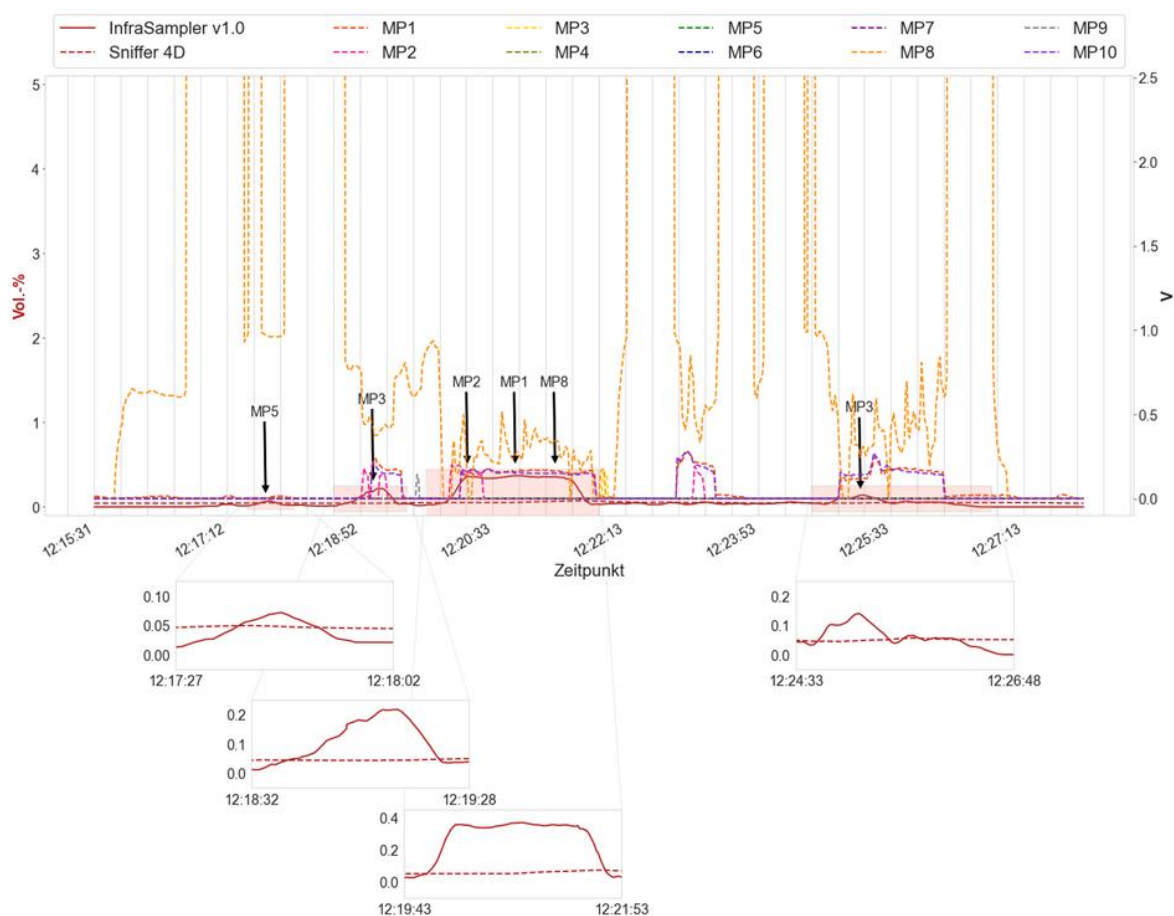


Abbildung 75: 1. Versuch mit den Kenndaten CH₄ mit 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) als Referenzmessung der Fahngrenze. Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb des Messbereiches.

Mit der radialen Näherung des UAV zum Emissionspunkt, ist ein stetiger Konzentrationsanstieg zu beobachten. Die zwischenzeitlichen Konzentrationsabfälle sind auf das sich bewegendende UAV und Querströmungen durch den Wind zurückzuführen. Von 12:20:03 Uhr bis 12:21:37 Uhr ist das Maximum der gemessenen CH₄-Konzentration zu erkennen. Zur gleichen Zeit nimmt das Signal des MP8 aufgrund der drohneninduzierten Strömung des Bodeneffektes am Distributor rapide ab. Über den gesamten Messzeitraum ist kein Anstieg der CH₄-Konzentration oberhalb der Rotoren zu erkennen. Ab 12:22.13 Uhr wurde die Flughöhe auf 230 cm AG erhöht.

Anhand der Winddaten aus Abbildung 76 ist ersichtlich, dass über den gesamten Versuchszeitraum ein stetiger Nord-Ost-Wind herrschte. Dabei lag die Windrichtung bei über 78 % der Messungen bei Ostwind und mit 20 % eher Nord-Ost-Wind. Die Windgeschwindigkeit blieb bei 98 % der Messungen unterhalb 2 Bft (< 1,5 m/s), dass entspricht einem leisen Zug. Hierbei ist der Wind kaum merklich und Rauch treibt leicht ab. 7,4 % der Messwerte lagen bei 0 Bft (< 0,2 m/s), was Windstille entspricht.

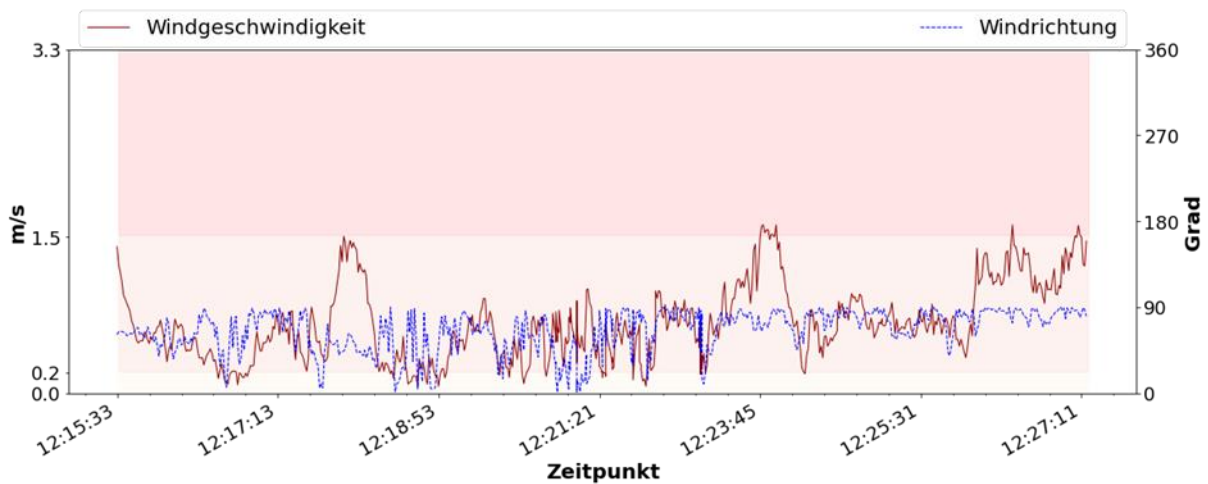


Abbildung 76: Winddaten vom 1. Versuch mit einer Windstärkeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.

Im zweiten Versuch in Abbildung 77 ist ein Anstieg der CO₂-Konzentration von MP1 bis MP8 (h = 90 cm AG) zu erkennen. Hierbei befand sich das UAS direkt vor dem Distributor. An den anderen MP konnte keine Konzentrationserhöhung festgestellt werden.

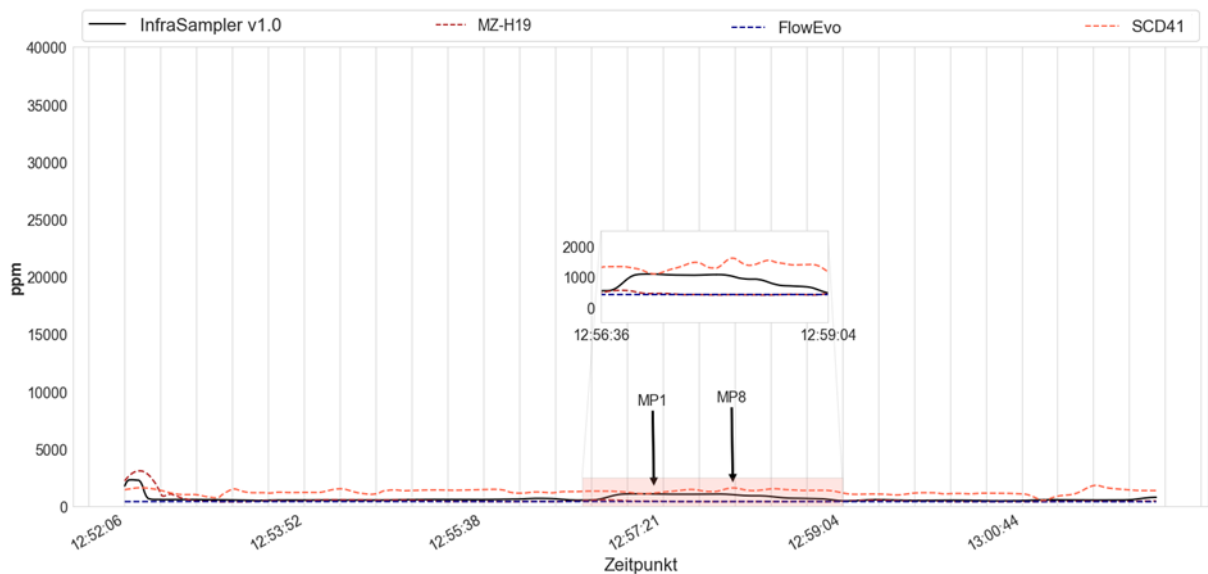


Abbildung 77: 2. Versuch mit den Kenndaten CO₂ 7,5 bar und der Simultanmessung mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO₂-Daten der Silverbox wieder.

Während des 2. Versuches gab es, im Gegensatz zum ersten Versuch, über den gesamten Versuchszeitraum stärkere Änderungen der Windrichtung, mit ca. 50 % Nordwind und 50 % Ostwind (Abbildung 78). Die Windgeschwindigkeit blieb bei 93 % der Messungen unterhalb 2 Bft (< 1,5 m/s) und 7,9 % der Messwerte lagen bei 0 Bft (< 0,2 m/s).

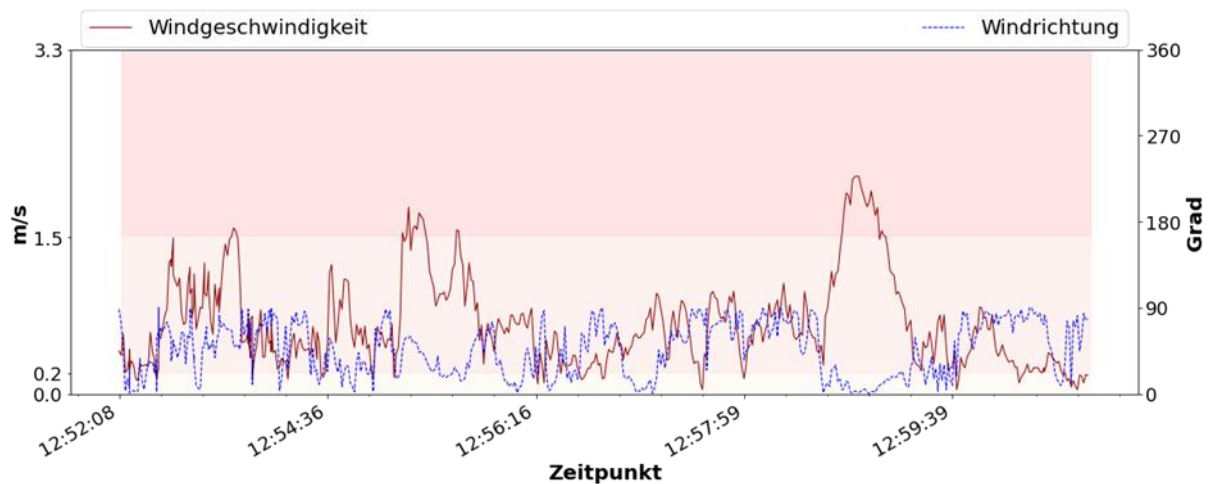


Abbildung 78: Winddaten vom 2. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.

Beim 3. Versuch (Abbildung 79) wurde eine gemischte Gasfahne erzeugt mit den Ausgangsparametern $\text{CH}_4 = 7,5 \text{ bar}$ und $\text{CO}_2 = 5 \text{ bar}$. Hierbei ist für CO_2 ein Konzentrationsanstieg bei MP1 ($h = 90 \text{ cm AG}$) und MP2 ($h = 230 \text{ cm AG}$) zu erkennen.

Für CH_4 konnten für MP4 bis MP3 ($h = 230 \text{ cm AG}$) ein Konzentrationsanstieg erfasst werden. Näher an den Distributor ist die Ausbreitung der Fahne für CH_4 nicht hoch genug, um messbar zu sein. Oberhalb der Rotoren konnte über den gesamten Versuchszeitraum kein CH_4 erkannt werden.

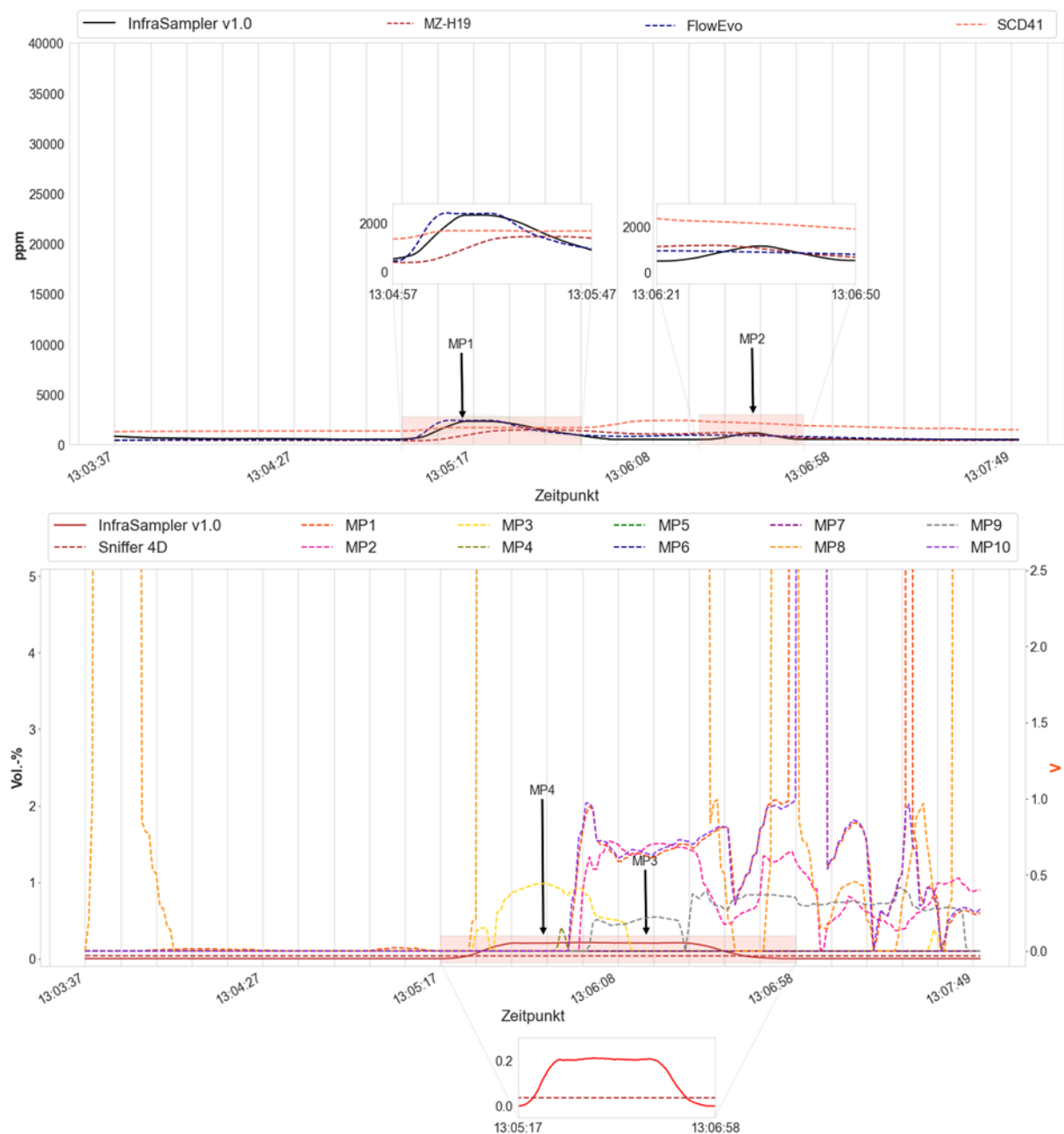


Abbildung 79: 3. Versuch mit den Kenndaten CO_2 5 bar und CH_4 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) zur Ermittlung der CH_4 -Fahngrenzen (unten). Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb des Messbereiches. Zusätzliche Simultanmessung von CO_2 mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO_2 -Daten der Silverbox wieder (oben).

Anhand der Winddaten aus Abbildung 80 ist ersichtlich, dass sich der Wind über den Versuchszeitraum in 79 % der Messungen aus nördlicher Richtung ausrichtete und zwischendurch wieder mit knapp 20 % in die nordöstliche Richtung schwankte. Die Windgeschwindigkeit erreichte nie 2 Bft (< 1,5 m/s) und 11 % der Messwerte lagen bei 0 Bft (< 0,2 m/s). Damit weist während der horizontalen Fahnenausrichtung dieser Versuch die wenigsten windinduzierten Turbulenzen auf.

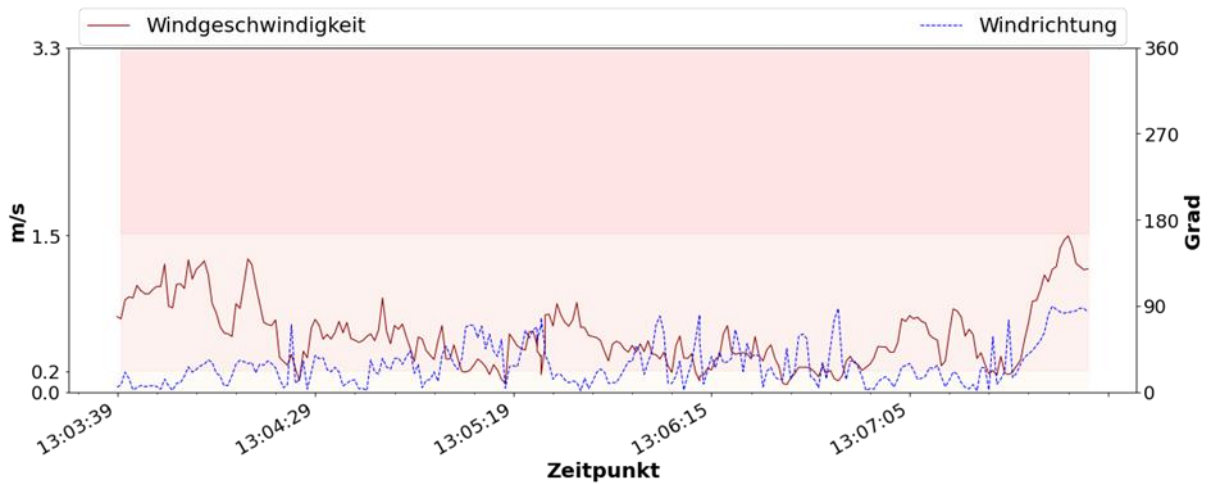


Abbildung 80: Winddaten vom 3. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.

Die Maximalwerte während aller Versuche, mit einer horizontal ausgerichteten Fahne erreichten für CO₂ 2324 ppm und für CH₄ 0,37 Vol.-%. Auffällig sind die gemessenen Konzentrationen während der Flughöhe von 90 cm AG, da hier nur bei MP1 und MP8 erhöhte Konzentrationen gemessen wurden, was dem Standort direkt vor dem Distributor entspricht.

6.3.2 Aufsteigende Ausbreitungsfahne

Bei den Versuchen 4 bis 6 wurde der Ventilator um 80 ° gedreht, sodass die Gasfahne sich nach oben hin ausbreitet. Dieser Aufbau dient dazu, den Bodeneffekt durch die Drohnenrotoren zu umgehen. Da eine horizontale Ausbreitung der Gasfahne nicht mehr möglich ist, wurde die Distribution der Gastransmitter, wie auf der rechten Seite in Abbildung 51, angepasst.

In Abbildung 81 ist die aufgenommene CH₄-Konzentration des vierten Versuches zu sehen. Beim Anfliegen der Gasfahne konnte bereits auf Höhe von MP3 eine erhöhte Konzentration festgestellt werden. Diese unterbricht bei der Bewegung des UAS nach MP2. Mit der Annäherung zum Distributor (MP1 und MP8) ist ein vergleichsweise hoher Anstieg der CH₄-Konzentration zu beobachten. Besonders markant sind die Konzentrationsspitzen an den Messpunkten MP3, MP7 und MP8 der Gastransmitter. Diese Spitzen korrelieren mit den durch den InfraSampler aufgezeichneten Daten. Der Sniffer 4D konnte keine Erhöhung der CH₄-Konzentration oberhalb der Rotoren feststellen.

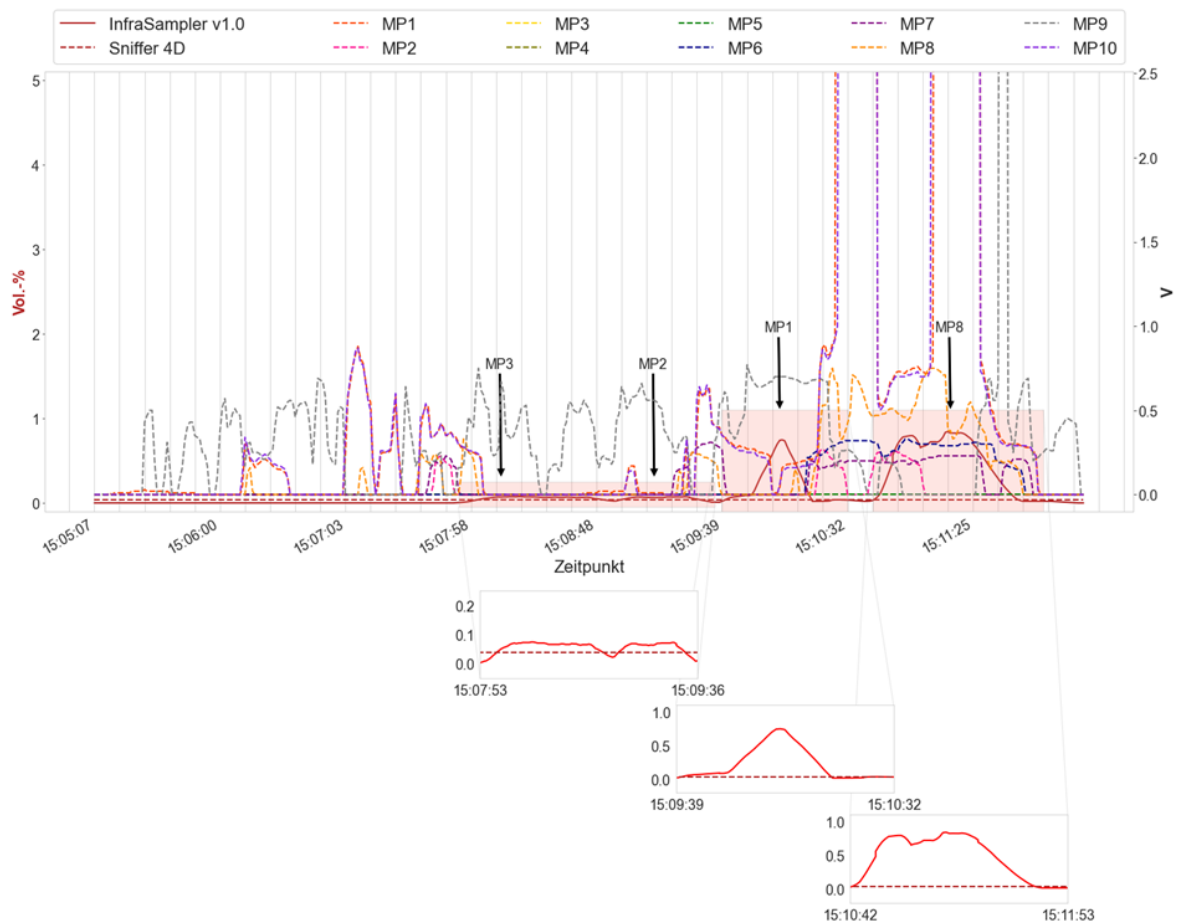


Abbildung 81: 4. Versuch mit den Kenndaten CH₄ mit 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) als Referenzmessung der Fahngrenze. Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb des Messbereiches.

Anhand der Winddaten aus Abbildung 72 ist ersichtlich, dass über den gesamten Versuchszeitraum der Wind in 61 % aus nördlicher Richtung kam und mit 39 % aus östlicher Richtung. Die Windgeschwindigkeit blieb bei 93 % der Messungen unterhalb 2 Bft (< 1,5 m/s). 10 % der Messwerte lagen bei 0 Bft (< 0,2 m/s).

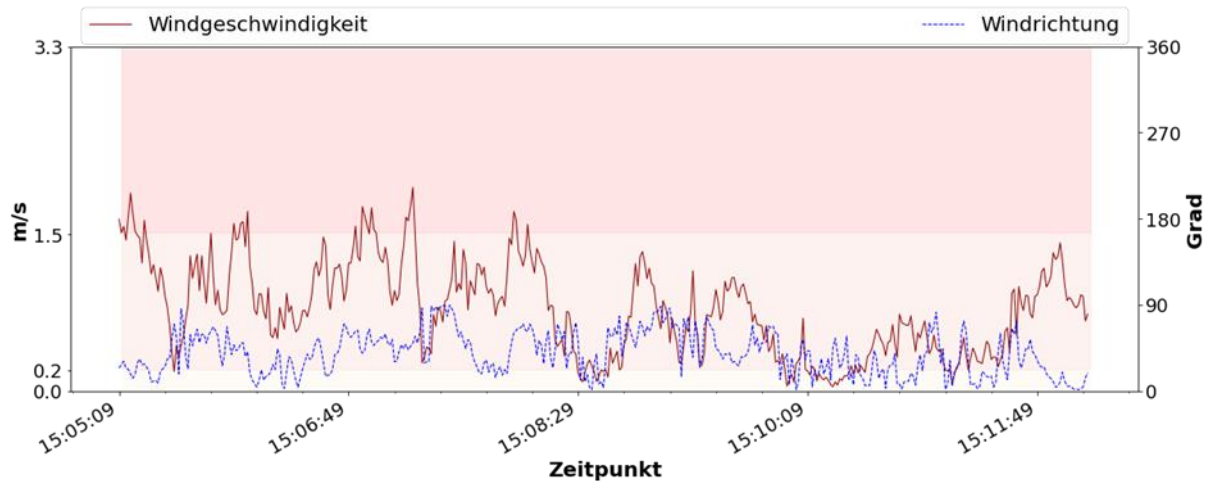


Abbildung 82: Winddaten vom 4. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90° = O, 180° = S, 270° = W und 360° = N entspricht.

Im fünften Versuch (Abbildung 83) ist ein Anstieg der CO₂-Konzentration von MP4 bis MP3 und von MP2 bis MP8 zu erkennen. Der SCD41 von Sensirion, welcher in der Silverbox verbaut ist, korreliert dabei mit den InfraSampler-Ergebnissen. Durch die Neuausrichtung des Ventilators und der Messhöhe des UAS ist ein verringerter Bodeneffekt zu beobachten. Insbesondere der InfraSampler zeigt deutliche Spitzen in den aufgezeichneten Daten. Die Korrelation zwischen den verschiedenen Messgeräten bestätigt die Zuverlässigkeit der Daten.

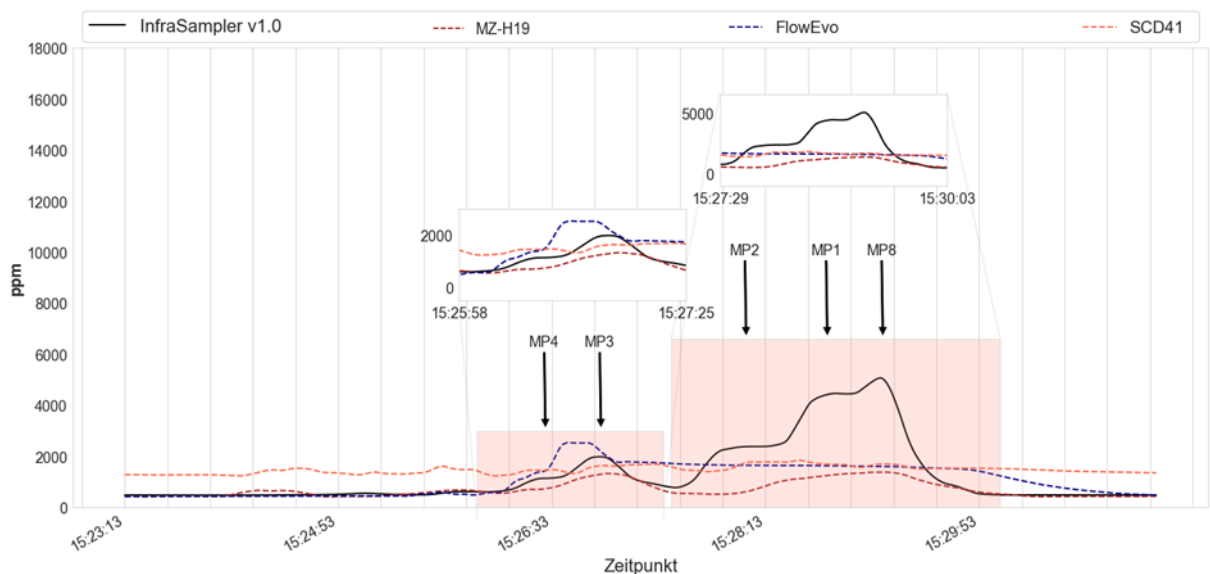


Abbildung 83: 5. Versuch mit den Kenndaten CO₂ 7,5 bar und der Simultanmessung mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO₂-Daten der Silverbox wieder.

Während des 5. Versuches gab es über den gesamten Versuchszeitraum Schwankungen in der Windrichtung mit ca. 29 % Nordwind und 70 % Ostwind (Abbildung 84). Die Windgeschwindigkeit blieb bei 97 % der Messungen konstant im Bereich 1 Bft ($< 1,5 \text{ m/s}$ und $> 0,2 \text{ m/s}$). Damit weist während der 80° Fahnenausrichtung dieser Versuch die wenigsten windinduzierten Turbulenzen auf.

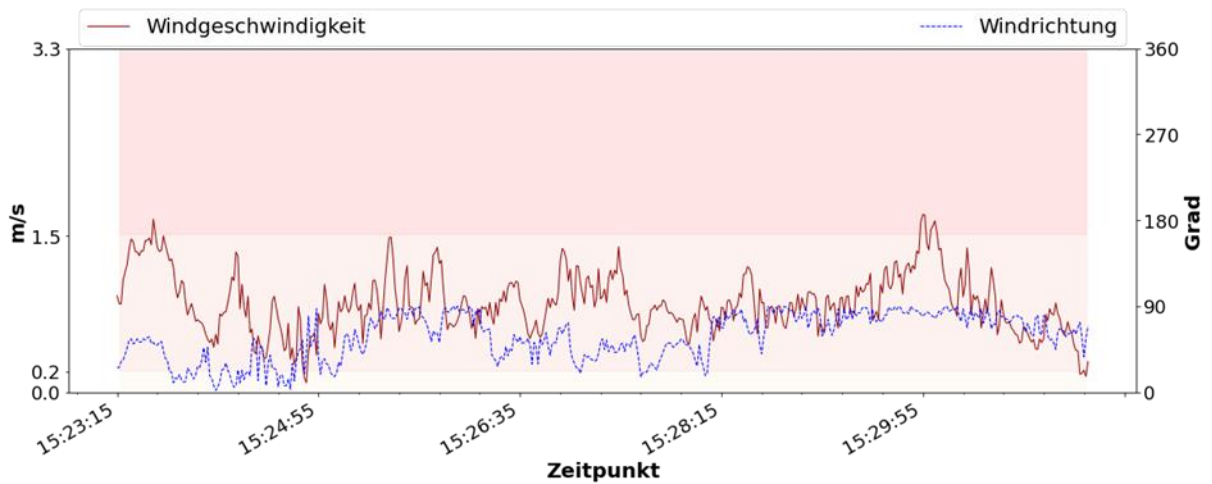


Abbildung 84: Winddaten vom 5. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl $90^\circ = \text{O}$, $180^\circ = \text{S}$, $270^\circ = \text{W}$ und $360^\circ = \text{N}$ entspricht.

Beim 6. Versuch (Abbildung 85) wurde eine gemischte Gasfahne erzeugt mit den Ausgangsparametern $\text{CH}_4 = 7,5 \text{ bar}$ und $\text{CO}_2 = 5 \text{ bar}$. Der obere Graph zeigt die gemessenen CO_2 -Konzentrationen, welche mit dem InfraSampler- und der Silverbox-System erfasst wurden. Der untere Graph stellt die CH_4 -Konzentrationen dar, gemessen mit InfraSampler v1.0 und Sniffer 4D sowie den Messpunkten MP1 bis MP10.

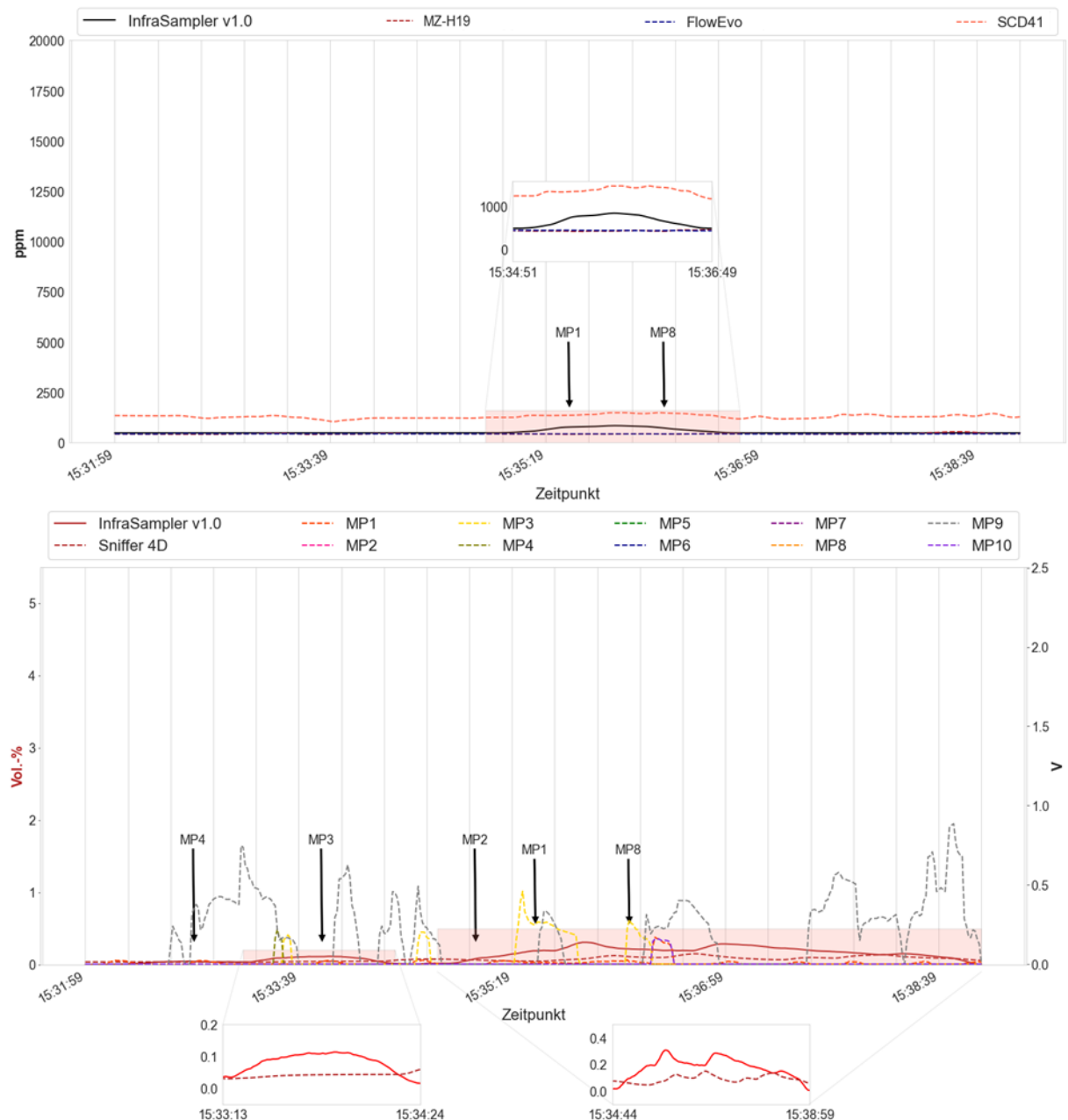


Abbildung 85: 6. Versuch mit den Kenndaten CO_2 5 bar und CH_4 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) zur Ermittlung der CH_4 -Fahngrenzen (unten). Zusätzliche Simultanmessung von CO_2 mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO_2 -Daten der Silverbox wieder (oben).

Die CO_2 -Daten zeigen, dass die Konzentrationen im Bereich von MP1 und MP8 ansteigen, insbesondere in den Messungen des InfraSamplers. Dieser Anstieg deutet auf eine signifikante CO_2 -Freisetzung hin, die in diesen Bereichen der Gasfahne stattfindet. Zusätzlich ist ersichtlich,

dass die verschiedenen CO₂-Sensoren ähnliche Trends aufweisen, was auf eine gute Übereinstimmung der Daten hinweist.

Bei den CH₄-Messungen sind deutliche Spitzen an den Messpunkten MP4, MP3, MP2, MP1 und MP8 zu erkennen. Besonders auffällig ist der Anstieg bei MP2 und MP8. Auch der Sniffer 4D konnte in diese mVersuch CH₄-Konzentrationen oberhalb der Rotoren erfassen. Die zeitliche Auflösung der Daten zeigt, dass die Spitzenwerte in kurzen Intervallen auftreten, was auf dynamische Veränderungen in der Gasfahne hindeutet. Dies kann, wie zuvor durch drohneninduzierte Turbulenzen oder wechselnde Windbedingungen verursacht werden, die die Verteilung der Gase beeinflussen.

Anhand der Winddaten aus Abbildung 86 ist ersichtlich, dass sich der Wind über den Versuchszeitraum in 25 % der Messungen aus nordöstlicher Richtung ausrichtete und zwischendurch wieder mit knapp 74 % in die östliche Richtung schwankte. Die Windgeschwindigkeit lag mit 97 % unter 2 Bft (< 1,5 m/s) und 7 % der Messwerte lagen bei 0 Bft (< 0,2 m/s).

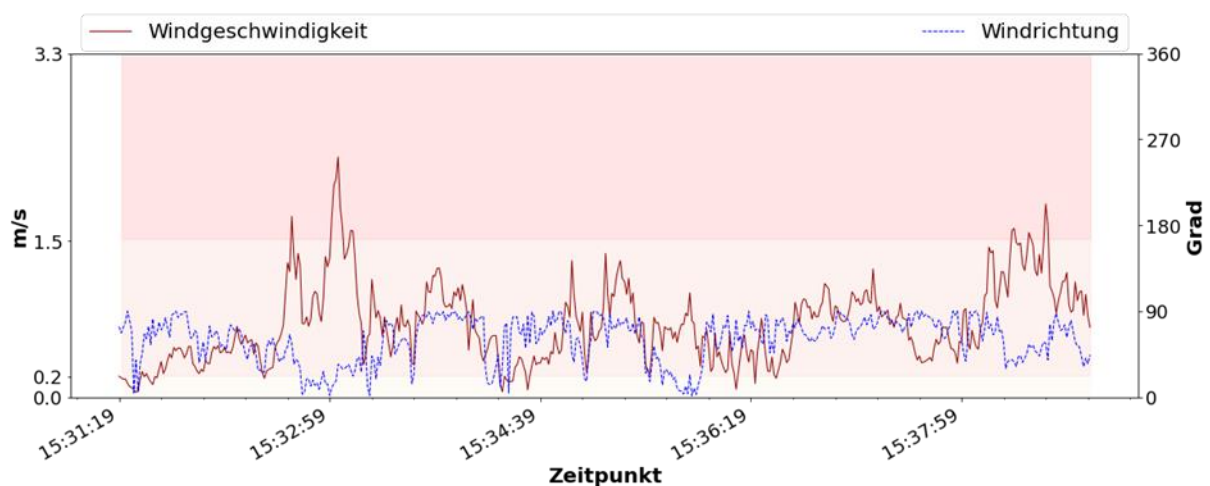


Abbildung 86: Winddaten vom 6. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90° = O, 180° = S, 270° = W und 360° = N entspricht.

Die Maximalwerte während aller Versuche, mit einer auf 80° ausgerichteten Fahne, erreichten für CO₂ 5074 ppm und für CH₄ 0,84 Vol.-%. Damit liegen beide Parameter über den Maximalwerten, welche während der horizontalen Ausrichtung gemessen wurden.

Für den gesamten Messtag wiesen die Windverhältnisse sehr stabile Windverhältnisse auf mit Windrichtungsschwankungen zwischen Nord- und Ostwind und Windgeschwindigkeiten, welchen normalerweise unterhalb 2 Bft (< 1,5 m/s) lagen. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit lag zwischen 0,34 und 1,24 m/s und die durchschnittliche Windrichtung schwankte zwischen 26° und 79°.

7 Diskussion

7.1 Bewertung der Messmethoden

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche In-situ-Probenahme-Plattformen verwendet (InfraSampler v1.0 & 2.0) um horizontale und vertikale Konzentrationsdaten zu erhalten, sowie stationäre Probenahmen zu ermöglichen. Sie stellen einen pragmatischen Ansatz zur Durchführung orientierender Probenahmen anthropogener Emissionsquellen dar. Relevante olfaktometrische, CO₂- und CH₄-Emissionen dienten als qualifizierende Parameter der Methode. Folgend werden die Vor- und Nachteile der Messmethoden diskutiert und mit weiteren UAV-Plattformen verglichen.

7.1.1 Leistungsbewertung des UAS

Aufgrund der begrenzten Flugzeit (etwa 20 Minuten mit Nutzlast) ist es schwierig, mit dem UAS Messungen oberhalb der mittleren Troposphäre (> 3 km) zu messen. Um die verfügbare Flugzeit zu maximieren, wurde eine leichte Bauweise gewählt. Die Messungen in den Fallbeispielen fanden bis zu einer Höhe von 50 m innerhalb des IPH und 120 m außerhalb des IHP statt. Das UAS ist für Messungen in größeren Höhen nicht geeignet.

Das getestete, mit dem InfraSampler ausgestattete UAV (DJI M200 V2) wurde von einem 16.500 mAh Li-Po-Akku (22,2 V) mit einer Startmasse von 7,8 kg unterstützt. Die maximalen Windgeschwindigkeiten während dieser Testflüge betrugen < 0,5 – 4 m/s. In allen Fällen zeigten die GNSS-Daten, dass der Multikopter mit dem InfraSampler die vorgesehenen Probenahmepositionen genau erreichte, und der Schwebeflug des vom Multikopter getragenen InfraSampler an den vorgesehenen Probenahmepositionen blieb ohne Ausreißer innerhalb von ± 1 m stabil.

Die Ergebnisse der Testflüge zeigten, dass der vom UAV getragene InfraSampler problemlos Probenahmeaufgaben unter Wetterbedingungen (Kapitel 5.1.5) durchführen kann und innerhalb von 120 m in vertikaler und 100 m in horizontaler Richtung von der Bodenkontrollstation (d. h. dem Startplatz) zuverlässig gesteuert werden kann. Bei einem Startgewicht von 7,8 kg betrug die verfügbare Schwebzeit für die Probenahme in 20 m bis 150 m Höhe etwa 20 Minuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der InfraSampler, welcher von einem UAV getragen wird, dank seiner vertikalen Start- und Landemöglichkeiten, seiner Wendigkeit und seines stabilen Schwebefluges problemlos Proben in einem definierten Bereich nehmen kann. Es konnte dargestellt werden, dass der Messaufbau in der Lage ist, gleichzeitig Luftqualitäts- und Metadaten zu sammeln und dabei vorgegebenen Flugpfaden zu folgen. Obwohl diese Plattform die ursprünglichen Planungsziele erreicht hat, sollten einige Einschränkungen der Studie anerkannt werden. Die konstruktiven Einschränkungen betrafen vor allem die Energieversorgung und die Messbereiche der Sensoren. Obwohl ein Ausbau oder Austausch der Sensorik möglich ist, sind jedesmal zusätzliche Experimente erforderlich, um die Zuverlässigkeit der Sensoren, den Stromverbrauch und die MCU-Leistung zu testen. Der Stromverbrauch bildet dabei die

Grundlage für die verwendeten Li-Ionen-Akkus, welche die Hauptgewichtsquelle sind und damit direkt proportional zur möglichen Nutzlast stehen.

In Abbildung 87 ist der Stromverbrauch auf die einzelnen Bauteile der Module dargestellt. Durch die Echtzeitintegration beim InfraSampler v2.0 musste die MCU-Einheit vergrößert werden, sodass eine zusätzliche Li-Ionenbatterie eingebaut wurde. Damit hat sich die Kapazität um 33 % erhöht, allerdings auch der MCU-Verbrauch um 89 %. Durch Auswahl anderer Sensorik (CO₂, O₂ und CH₄), konnte der Stromverbrauch um 30 % verringert werden. Insgesamt kommen wir für das gesamte Modul (InfraSampler v2.0) auf eine Kapazitätserhöhung von 38 %, eine Gewichtserhöhung von rund 300 g und eine Verlängerung der Betriebszeit von ca. 219 min.

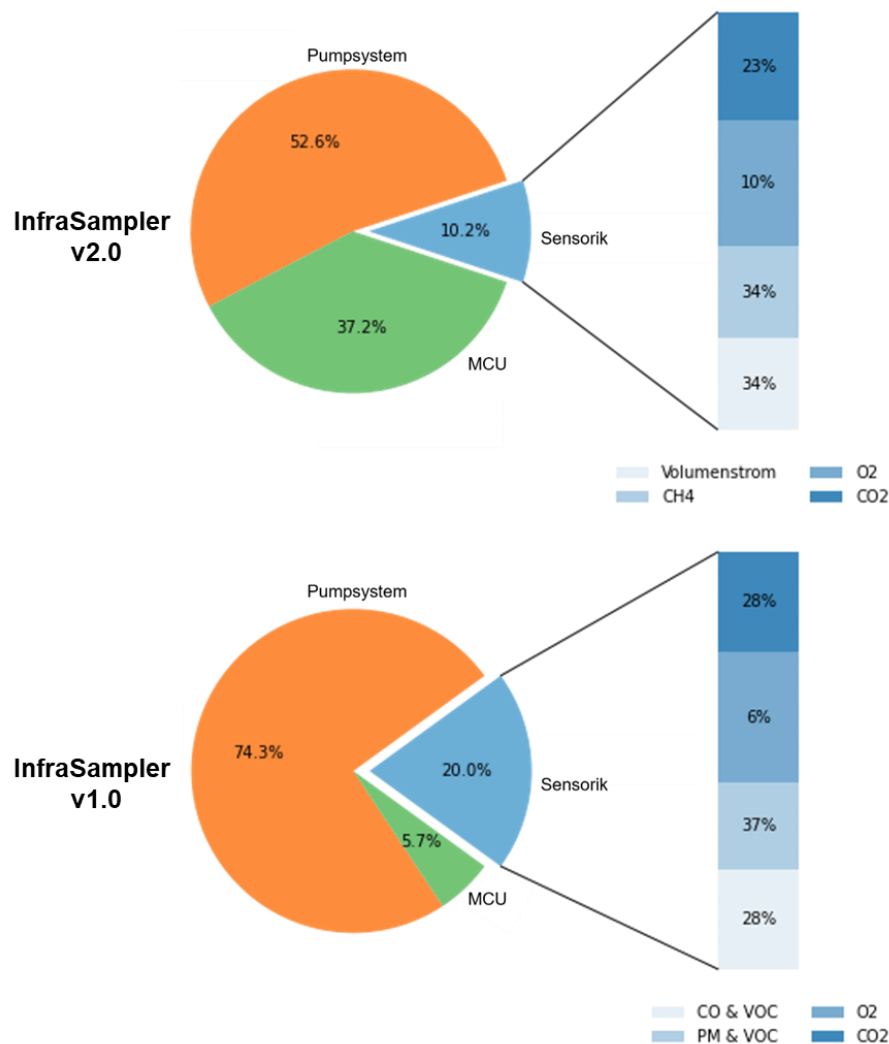


Abbildung 87: Kategorische Darstellung des relativen Stromverbrauches der In-Situ-Probenahme Module.

Die verwendeten Sensoren sind in Tabelle 1 aufgeführt. In der Studie wurde ersichtlich, dass eine Probenahme mit komplementärer Indikatorsensorik (CO₂, O₂ & VOC) sowohl im oberen Messbereich als auch im unteren Messbereich (Kapitel 6.1.2.3) zu einer Verbesserung des Verdünnungsfaktors des atmosphärischen Anteils führt, welcher mit den Messergebnissen verrechnet wird.

Mit dem derzeitigen Aufbau erreicht der InfraSampler v1.0 eine maximale Laufzeit von ca. 4 h und der InfraSampler v2.0 eine Laufzeit von ca. 8 Stunden. Damit erreichen beide Module eine Laufzeit, welche mind. 10-mal höher liegt als die mögliche Flugzeit einer Akkuladung.

Bei der derzeitigen Konstruktion gibt es keinen Einfluss auf die Sensormessungen aufgrund von elektronischen Störungen. Verbesserungsmöglichkeiten gibt es im elektronischen Design der Module, um eine höhere Leistung zur Verfügung zu stellen, ohne dabei die Nutzlast durch Akkumulatoren zu binden. Das UAS ist wasserdicht, mit einem komplexen Design für die Luft-einlässe und die Kondensationseinheit, sodass die Sensorik frei von Wasserinterferenzen ist. Die Belastbarkeit und Feldvalidierung der Sensoren wurde anhand mehrerer Fallstudien belegt (Kapitel 5). Die automatisierte Probenahme, über das 2/3-Wege-Ventil gekoppelt mit dem Indikatorparameter (CO₂, O₂ oder VOC), war die Schlüsselkomponente des UAS zur Erfassung von Emissionen. Der elektrische Antrieb für das Ventil wird mit 12 V Gleichstrom betrieben. Da der Probebeutel nicht unter Vakuum steht, musste nicht auf ein hohes Drehmoment des Ventils zur Aufrechterhaltung eines Vakuums geachtet werden. Damit fällt eine mögliche Fehlerquelle während der Probenahme weg (Chang u. a. 2016).

Mit jedem Versuchsaufbau wurden mindestens drei Testflüge unter mäßig windigen Bedingungen durchgeführt, um die Flugstabilität, die Schwebzeit und die maximale Flugdistanz des Luftprobenahmegeräts zu bewerten. Dabei wurden die Testflüge zur Flugstabilität nicht mit den Flügen der Fallstudien gleichgesetzt.

Bei den Probenahmen muss zwischen Emissionsmessungen und Transmissionsmessungen unterschieden werden. Transmissionsmessungen wurden generell ausschließlich mit der On-board-Sensorik durchgeführt, während Emissionsmessungen i.d.R. mit einer Probenahme gekoppelt wurden, welche anschließend im Labor untersucht wurde. Die olfaktometrischen Proben, welche an einem Emissionspunkt genommen wurden, wurden anschließend ins Labor gebracht, wo mit vier Prüfern die Geruchseinheiten der UAS-Proben und der herkömmlichen Proben ermittelt wurden (Kapitel 5.1). Die Unversehrtheit der Luftproben und die qualitativ hochwertige Analyse im Labor erleichterten eine sinnvolle Interpretation der Daten, die im nächsten Abschnitt erörtert wird.

7.1.2 Technische Aspekte und Sensorleistung

Durch die optimale Anpassung des Standorts und der Flughöhe werden bei UAV-Messungen vertikale Indikatordaten, insbesondere CO₂ und CH₄, über einem begrenzten Gebiet erfasst. Diese Studie zeigt, dass UAS zur Überwachung lokaler Konzentrationen nützlich sind. Kontinuierliche UAV-Messungen können langfristige Schwankungen, einschließlich saisonaler und jährlicher Muster, erkennen. Aufgrund ihrer Natur sind Sensoren auf dynamischen UAV-Systemen jedoch nicht so spezifiziert, kontrolliert oder reproduzierbar wie anerkannte Referenzmethoden zur Messung von Luftschadstoffen.

Mit den fortschreitenden UAV-Technologien basiert eine erfolgreiche Plattform vor allem auf geeigneten Gassensoren für UAV-Anwendungen. Es ist jedoch eine Herausforderung, die vielen verfügbaren Luftsensoren zu identifizieren, zu testen und zu validieren. Die US-Umweltbehörde (EPA) hat eine Reihe von Luftqualitätssensoren getestet (Chiliński, Markowicz, und

Kubicki 2018), aber alle Tests wurden an festen Standorten am Boden durchgeführt. Frühere Studien haben Sensorstörungen durch Umweltfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck und andere Schadstoffe untersucht (Helm u. a. 2021; Zhou u. a. 2017) und auch drohenbasierte Sensorik wurde in der Forschung berücksichtigt (Araujo u. a. 2020; Karbach, Bobrowski, und Hoffmann 2022; Rüdiger u. a. 2018). Selten jedoch wurden direkte Anwendungsfälle im industriellen Umfeld behandelt und Methoden für repräsentative Probenahmen entwickelt, wie sie in dieser Studie durchgeführt wurden.

Alle erhaltenen Zeitreihen der verschiedenen Messsysteme wurden analysiert, um die Reaktionsfähigkeit der Sensorik (bezogen auf 1 Hz) zu untersuchen. Besonders die Overlapping-Allan-Deviation wurde analysiert, wie an den in Abbildung 88 gezeigten Beispielergebnissen. Die in dieser Studie erhaltenen VOC-Daten wurden aufgrund ihrer nur qualitativ relevanten Ergebnisse nicht in die Bewertung einbezogen.

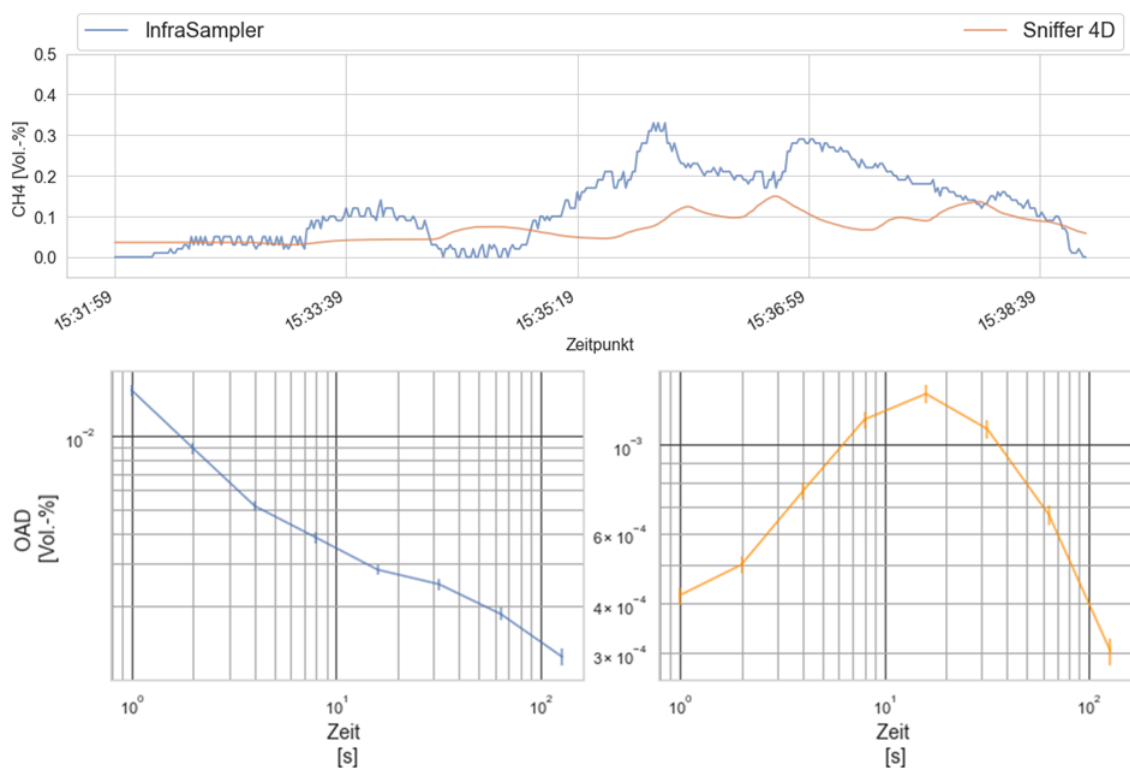


Abbildung 88: Analyse der Overlapping-Allan-Deviation von CH₄-Daten der Flugmissionen.

Empfindlichkeit der Kohlenstoffdioxid-Nachweise

Die erhaltenen CO₂-Zeitreihen vom InfraSampler und Silverbox wurden analysiert, um die Empfindlichkeit der Kohlenstoffdioxiderkennung zu untersuchen. Die Silverbox wurde an den Gaseinlass des InfraSamplers angeschlossen, um einen direkten Datenvergleich zu ermöglichen. In niedrigen Konzentrationsbereichen zeigten der FlowEvo und der SCD41 der Silverbox eine deutlich bessere Stabilität bei kurzen Integrationszeiten als der InfraSampler und der MZ-H19. Bei allen Sensoren nahm die Stabilität mit zunehmender Integrationszeit zu. In höheren Konzentrationsbereichen (> 1000 ppm CO₂) reagierte der InfraSampler empfindlicher auf positive Konzentrationsgradienten, was sich in hohen OAD-Werten bei kurzen Integrationszeiten widerspiegelt. In einigen Fällen ist die kombinierte Nutzung mehrerer Sensortypen

für denselben Parameter sinnvoll, um sowohl schnelle Änderungen als auch langfristige Stabilität optimal zu erfassen. Diese Aussage konnte auch für verschiedene Messbereiche, in denen der SprintIR-6S mit dem K30 FR und dem SCD30 verglichen wurde, festgestellt werden (Kapitel 6.1.2.3).

Empfindlichkeit der Sauerstoff-Nachweise

Die erhaltenen O₂-Zeitreihen wurden analysiert, um die Empfindlichkeit der Sauerstofferkennung zu untersuchen. Es wurde kein Vergleich verschiedener Systeme durchgeführt, sondern nur die Auswertung des im InfraSampler verbauten Sensors (ME2-O2). Der Sensor zeigte eine sehr gute Stabilität bei kurzen Integrationszeiten und eine weitere Verbesserung der Stabilität und Genauigkeit mit zunehmender Integrationszeit. Allan-Abweichungen im Bereich von 41 – 42 ppm weisen auf ein sehr geringes Rauschen der aufgenommenen Sensordaten in der Umgebungsluft hin, die im Volumenprozentbereich gemessen wurden.

Empfindlichkeit der Methan-Nachweise

Die erhaltenen CH₄-Zeitreihen vom InfraSampler und Sniffer 4D wurden analysiert, um die Empfindlichkeit der Methanerkennung zu untersuchen. Obwohl die Messungen zeitgleich stattfanden, ist zu beachten, dass der Probenahmepunkt des InfraSampler unterhalb der Rotoren in einer 1,7 m horizontalen Entfernung durch eine Probenahmelanze erfolgte, während der Sniffer 4D über den Rotoren ohne Lanze montiert war (Abbildung 49). Diese Messungen wurden mit einer simulierten Methanfahne durchgeführt und können durch Schwankungen der Methankonzentration beeinflusst werden. Mit zunehmendem τ sinken die OAD-Werte, was auf eine steigende Stabilität bei längeren Messintervallen hindeutet. Allan-Abweichungen im Bereich von 150 – 158 ppm (InfraSampler) und 4,1 – 4,3 ppm (Sniffer 4D) wurden festgestellt. Andere Studien zeigen Bereiche von 15 – 30 ppb für drohnenbasierte Methanmessungen, die aufgrund der verwendeten Sensorik stark variieren können (Martinez, Miller, und Yalin 2020). Höhere OAD-Werte bei kurzen Zeitintervallen würden auf Instabilitäten und Rauschen hinweisen, da jedoch eine Konzentrationszunahme gemessen wurde, spiegeln die höheren OAD-Werte den Anstieg der Konzentration wider. Dies zeigt, dass der Sniffer 4D eine niedrigere Sensitivität als der InfraSampler aufweist, was auf die Messung über den Rotoren, statt durch die Probenahmelanze zurückzuführen ist. Außerdem zeigte der Sniffer 4D über alle Versuchszeiträume einen positiven Offset von etwa 0,03 Vol.-%. Während in anderen Studien von Burgués Calderón; Martinez u. a.; Lampert u. a. besonders niedrige Sensitivitätslevel in ppm- oder ppb-Bereichen angestrebt wurden, mussten in dieser Arbeit Sensoren im Volumenprozentbereich verwendet werden, da es sich im industriellen Anwendungsfall um Messungen direkt an Emissionspunkten oder während hohen Emissionsraten handelte.

Empfindlichkeit der Feinstaub-Nachweise

Die erhaltenen PM-Zeitreihen von 12 Monaten vom IMB (SEN54) und den Referenzmethoden der Luftmessstationen im IPH wurden analysiert, um die Empfindlichkeit der Feinstauberkennung zu untersuchen (Kapitel 5.2). Diese standortbezogenen Daten ermöglichen keine Vergleiche mit mobilen Einsätzen. Es wurden PM_{2,5} und PM₁₀ ausgewertet, obwohl PM₁ und PM₄ technisch möglich sind, bildeten diese keine Grundlage für weitere Auswertungen, aufgrund fehlender Vergleichsmöglichkeiten. Mit zunehmendem τ sinken die OAD-Werte, was auf eine steigende Stabilität bei längeren Messintervallen hinweist. Allan-Abweichungen im Bereich von 0,71 – 0,73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB) und 1,47 – 1,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Luftmessstation) für PM_{2,5} sowie 1,91 – 2,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMB) und 2,28 – 2,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Luftmessstation) für PM₁₀ wurden festgestellt. Aufgrund der gesammelten Daten wurde der Feinstaubsensor SEN54 auch im Infra-Sampler verbaut.

Die gesammelten Daten deuten darauf hin, dass die im InfraSampler verbauten Sensoren während Flugmissionen keine Empfindlichkeitsverluste aufweisen. Die Sensoren werden durch die temperierte Messkammer, die vorgeschaltete Kondensationseinheit und das vibrationsresistente Gehäuse erfolgreich vor äußeren Einflüssen geschützt, sodass keine spürbaren Leistungsverlechterungen im Vergleich zum Bodeneinsatz erkennbar sind.

7.1.3 Identifizierte Störgrößen

Eine wichtige Herausforderung bei der Verwendung von Sensoren besteht darin, Störgrößen zu identifizieren und zu minimieren, die die Genauigkeit und Empfindlichkeit der Sensoren beeinträchtigen können. Störgrößen können aus verschiedenen Quellen stammen, wie z.B. elektromagnetische Interferenzen, thermische Effekte, mechanische Beanspruchung oder chemische Interferenzen. Einige Störgrößen können durch die Wahl geeigneter Materialien und Designs der Sensoren minimiert werden, während andere durch Signalverarbeitung und Datenanalyse kompensiert werden können.

In diesem Kapitel werden verschiedene Arten von Störgrößen untersucht, die bei den verwendeten Sensoren auftreten können, und es werden Strategien zur Identifizierung und Minimierung dieser Störgrößen vorgestellt. Dabei werden sowohl traditionelle als auch moderne Ansätze zur Störgrößenreduzierung diskutiert, einschließlich der Anwendung von Kalibrierungsmethoden und der Verwendung von Machine-Learning-Techniken. Letztendlich ist das Ziel dieses Kapitels, dem Leser ein Verständnis für die Bedeutung der Identifizierung und Minimierung von Störgrößen bei dem Einsatz von alternativer Sensorik zu vermitteln.

7.1.3.1 Elektrochemische Sensoren

Elektrochemische Sensoren sind entscheidend für die selektive Detektion von Gasen, doch ihre Messgenauigkeit kann durch diverse Störgrößen beeinträchtigt werden. In dieser Arbeit fallen darunter alle im IMB verbauten Gassensoren und der O₂-Sensor (ME2-O2).

Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sind typische Umwelteinflüsse, welche die Reaktionsrate der elektrochemischen Zellen verändern, was zu ungenauen Ergebnissen führt

(Mijling u. a. 2018). Aus diesem Grund wurde die Messkammer temperiert, um ein möglichst stabiles Umfeld in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur zu erhalten (Abbildung 89). Die Messkammer-Temperatur des InfraSampler beträgt zwischen 17,66 °C bis 22,81 °C. In den stationären Fallstudien (Kapitel 5.2), wurden ebenfalls Systeme mit temperierten Messkammern mit nicht temperierten Messkammern verglichen, welche die gleiche Aussage unterstützt.

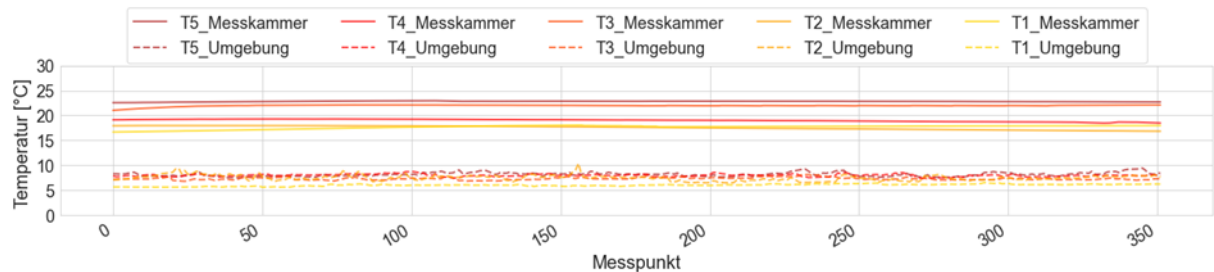


Abbildung 89: Auszug der Messkammer-Temperatur bezogen auf die Umgebungstemperatur. Die Daten sind aus dem Datensatz der Fallstudie für simulierte Gasfahnen.

Die Feuchtigkeitsschwankungen wurden durch die Temperierung vermindert, den größeren Einfluss auf die Entziehung der Feuchte hatte jedoch die vorgeschaltete Kondensationseinheit (Kapitel 3.1.1.2 & 4.3.2), welche eine Kondensation vor der Messkammer ermöglicht, um so keinen Einfluss auf die Sensorik mehr auszuüben. In Abbildung 90 sind klar erkennbare Witterungseinflüsse auf die Messung des Parameters O_3 während der stationären Messkampagne abgebildet (Kapitel 5.2).

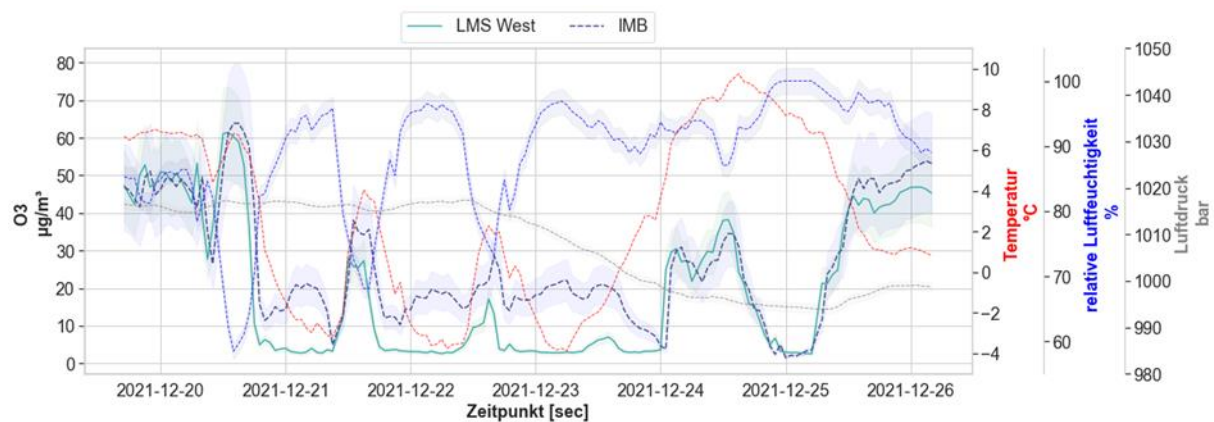


Abbildung 90: Auszug der einjährigen stationären Messkampagne 2021. Im Vergleich stehen die Luftmessstation West (Referenzmethoden) zum IMB (alternative Methoden), bei inkonsistenten Witterungsverhältnissen.

Zum Zeitraum 20.12.2021 bis 24.12.2021 lag dichter Nebel im Untersuchungsgebiet vor. Außerdem kam es zu starken Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur, was zu einer signifikanten Messabweichungen der elektrochemischen Messverfahren im IMB im Vergleich des Chemilumineszenz-Messverfahren (LMS West) führte. Bei stark verändernden Witterungsverhältnissen betrug die durchschnittliche Abweichung der Messwerte für Ozon ca. $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, während ansonsten eine Abweichung von ca. $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ angenommen wurde. Diese Ergebnisse betonen die Notwendigkeit einer Methode, um variable Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Messung zu vermeiden.

Neben den witterungsbedingten Umgebungseinflüssen auf die Sensoren, müssen auch Querempfindlichkeiten zu in der Luft vorhandenen Gasen oder chemischen Substanzen die Sensoren vergiften oder ihre Empfindlichkeit verringern, beachtet werden. Ein wesentliches Beispiel wird in Kapitel 6.2.2.5 beschrieben, in dem starke Querempfindlichkeiten des SO₂-Sensors außerhalb seines Messbereichs gegenüber NO₂ nachgewiesen wurden. Diese Gegebenheit erfordert mehrere Parameter gleichzeitig zu messen, um die Sensorwerte korrekt zuzuordnen und die Anzahl falsch positiver Ergebnisse zu reduzieren. So können auch die gemessenen VOC-Daten (Kapitel 6.2.2.6) nicht auf einzelne Stoffe zurückgeführt werden, da keine Informationen über die Empfindlichkeit des Sensors in verschiedenen Mischungsverhältnissen existieren.

Elektromagnetische Interferenzen aus der Umgebung z.B. durch das UAV, können ebenfalls die Signalintegrität stören. In dieser Arbeit wurde dieser Einfluss aufgrund unterschiedlicher baulicher Maßnahmen des InfraSampler-Systems verringert. Dazu gehören:

- Kurze Kabelauslegung, um Wege für elektromagnetische Kopplung zu verringern.
- Orthogonale Ausrichtung der Schaltkreise zu potenziellen Störquellen wie Motoren.
- Vermeidung von Bündelungen von Strom- und Signalkabeln.

7.1.3.2 Optoelektronische Sensoren

Optoelektronische Sensoren nutzen Licht zur Messung und Analyse von Substanzen, unterliegen jedoch ebenso den Effekten durch eine Vielzahl von Störgrößen. In dieser Arbeit fallen darunter der im IMB verbaute Feinstaubsensor (SEN5x), die CO₂-Sensoren (SprintIR-6S, SCD-30, FlowEVO und MZ-H19), der CH₄-Sensor (SJH-5), sowie der O₂-Sensor (LuminOx) und der Feinstaubsensor (SEN54).

Änderungen in der Lichtintensität, verursacht durch Schwankungen der Stromversorgung oder externe Lichtquellen, können die Messgenauigkeit beeinträchtigen. Um diese Störvariablen zu vermeiden, wurden alle Sensoren eingehaust, wodurch äußere Lichtquellen keinen Einfluss haben. Schwankungen in der Stromversorgung treten nur bei einer Entladung der Akkumulatoren auf, deren Kapazität, während der Mess- und Probenahmezeiten berücksichtigt wurde, sodass das System rechtzeitig abgeschaltet wird, bevor die Energie vollständig erschöpft ist. Verschmutzungen oder Beschädigungen der optischen Komponenten wie Linsen und Spiegel führen ebenfalls zu Streuverlusten und Signalverzerrungen. Diese lassen sich durch regelmäßige Kalibrierung anhand eines Drifts oder Offsets im Messsignal erkennen. Vorsorglich muss beim Einbau der Sensoren auf die korrekte Einbaurichtung geachtet werden, um die Möglichkeiten von Ablagerungen zu vermindern.

Auch Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen können die Empfindlichkeit der optoelektronischen Detektoren beeinflussen. In Abbildung 91 sind klar erkennbare Einflüsse auf die Messung des Parameter Feinstaub PM_{2,5} während der stationären Messkampagne abgebildet (Kapitel 5.2). Dabe handelt es sich beim IMB um einen OPC, welcher besonders empfindlich gegenüber hohen Luftfeuchtigkeiten ist.

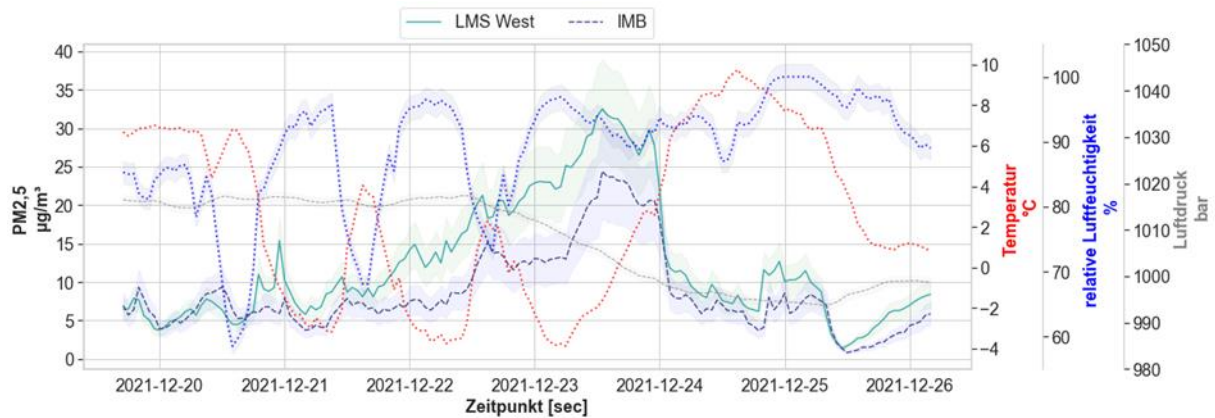


Abbildung 91: Auszug der einjährigen stationären Messkampagne 2021. Im Vergleich stehen die Luftmessstation West (Referenzmethoden) zum IMB (alternative Methoden), bei inkonsistenten Witterungsverhältnissen.

Zum Zeitraum 20.12.2021 bis 24.12.2021 lag dichter Nebel im Untersuchungsgebiet vor. Außerdem kam es zu starken Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur, was trotz der temperierten Messkammer, zu einer signifikanten Messabweichung der optischen Messverfahren im IMB zum Verhältnis der gravimetrischen Messverfahren (LMS West) führte. Versuche mit dem Sensor außerhalb der Messkammer ergaben ein hohes Rauschen und waren fehleranfällig aufgrund von Feuchtigkeit im System.

7.1.3.3 Photoakustische Sensoren

Es wurde ein photoakustischer CO₂-Sensor (SCD41) in der Fallstudie (Kapitel 5.3) verwendet. Das Messprinzip basiert auf der Messung von Schallwellen, die durch die Absorption von Licht in einer Probe erzeugt werden. Umweltbedingte akustische Störungen wie Vibrationen und Lärm beeinträchtigen die Detektion der photoakustischen Signale, während Schwankungen der Lichtquelle zu variablen Signalstärken führen können. Zusätzlich beeinflussen Temperaturschwankungen die Schallgeschwindigkeit und somit die Messgenauigkeit. Eine angemessene Schallisolation und die Stabilisierung der Lichtquelle sind daher von entscheidender Bedeutung, um präzise Messergebnisse zu erzielen. Aufgrund der kontinuierlichen Vibrationen und des Schalls, die das UAV während der Flugmissionen abgibt, erweist sich dieser Sensor als ungeeignet für diese Messanwendung. In Abbildung 92 ist zu erkennen, dass der Sensor (orange) eine geringe Empfindlichkeit bei Konzentrationsanstiegen aufweist und gleichzeitig starkes Rauschen zeigt. Dieses Rauschen wird durch das UAV verursacht, da unter Laborbedingungen keine vergleichbaren Ergebnisse festgestellt wurden (Karbach, Bobrowski, und Hoffmann 2022).

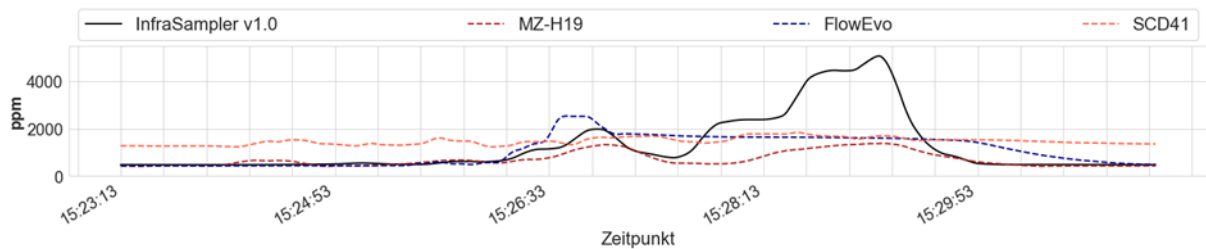


Abbildung 92: Kohlenstoffdioxidmessung von Versuch 5 der Fallstudie „Quantifizierung simulierter Gasfahnen“.

Die aufgeführten Punkte zeigen, dass hardwareseitige Anpassungen viele Störgrößen verhindern oder verringern. Offenliegende Sensoren, die diffuse Messungen durchführen, sind deutlich anfälliger für diese Störgrößen und übertragen den Arbeitsaufwand auf die nachfolgende Dateninterpretation. Eine sorgfältige Kontrolle der Messumgebung und regelmäßige Wartung sind erforderlich, um präzise und zuverlässige Ergebnisse sicherzustellen.

7.1.4 Turbulenzabhängigkeit

Die Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit von Sensordaten, die durch UAVs in der Umweltüberwachung erfasst werden, sind stark von den atmosphärischen Bedingungen, insbesondere von der Turbulenz, abhängig. Dieses Kapitel untersucht den Einfluss der Flughöhe, der drohneninduzierten Turbulenz sowie der Windgeschwindigkeit und -richtung auf die Flugergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die in dieser Arbeit genannten Anforderungen.

Kleinere UAVs sind aufgrund ihrer geringen Größe und dynamischen sowie umweltbedingten Faktoren viel anfälliger für Turbulenzen als die in dieser Studie verwendeten UAVs (M200 V2 und M300 RTK). Da für die Messanwendungen niedrige Geschwindigkeiten von ≤ 1 m/s von den UAVs in dieser Arbeit eingehalten wurden, stellt das kein Unterscheidungsmerkmal zu kleineren UAVs dar. Auch auf umweltbezogenen Gesichtspunkten unterscheiden sich die beiden Anwendungsfälle nicht, da sie in beiden Fällen in der stark verwirbelten, turbulenten Atmosphäre in Bodennähe (bis 100 m AG) fliegen müssen. Die Fallstudien (Kapitel 5), die bei unterschiedlichen Windbedingungen durchgeführt wurden, zeigen, dass die manuelle Fernsteuerung nicht schnell genug ist, um auf Turbulenzeffekte zu reagieren. Hier ist die autonome on-Board Turbulenzkontrolle unerlässlich, um den Fernpiloten zu unterstützen. Diese Turbulenzeinflüsse haben nicht nur einen direkten Einfluss auf die Messungen oder Probenahme, sondern können auch in Gebäudenähe, wie bei Schornsteinen, zu einem Absturz führen. Um weitere Aussagen über Turbulenzen in Messnähe treffen zu können, sollte neben der Überwachung des Windes in der Umgebung durch z.B. Schallanemometer auch eine direkte Messung auf dem UAV erfolgen.

Dank der Probenahmelanze ist es möglich, Proben der Umgebungsluft zu nehmen, die wenig von den drohneninduzierten Strömungen beeinflusst sind. In dieser Arbeit konnten mit einer 1,7 m langen Probenahmelanze Proben genommen werden, wobei die Lanzenlänge aufgrund der notwendigen Rotorenströmung berechnet wurde, die benötigt wird, um die Drohne in der Schwebelage zu halten. Für die Probenahme wird die Schwebelage bevorzugt, um

anschließend an den nächsten Probenahmepunkt zu fliegen und dort während des Probenahmezeitraums wieder in der unbewegten Schwebeposition zu bleiben.

Ein interessanter Aspekt ist die Vermutung, dass der durch die Rotoren erzeugte Wind eine vertikale Vermischung der Gaskonzentrationen verursachen könnte, was weiterer Untersuchungen bedarf. Die Turbulenz, die durch die Propeller der Drohne erzeugt wird, beeinflusst maßgeblich die Luftströmungen und damit die Ausbreitung von Schadstoffen. Es besteht Bedarf an detaillierten Experimenten, um zu verstehen, wie diese Turbulenzen die Leistung der Sensoren beeinflussen und wie sie durch geeignete Flugmuster und Höhenoptimierung minimiert werden können. Bei Luftereignissen in der Industrie (z.B. Leckagen) werden diese Einflüsse jedoch so gering sein, dass sie für Messungen keine Rolle spielen, da eine solche Verdünnung der Analyten zu einer Beendigung des Luftereignisses führen würde.

Die Windbedingungen spielen eine zentrale Rolle in der Messgenauigkeit drohnenbasierter Sensoren. Hohe Windgeschwindigkeiten begünstigen eine breite Streuung der Gaskonzentrationen, was zu homogeneren Ergebnissen führt, während niedrige Windgeschwindigkeiten die Lokalisierung von Quellen begünstigt. In dieser Studie stellte sich die Windgeschwindigkeit als der maßgeblichste Umweltfaktor für die Variabilität der Messergebnisse heraus, wobei Temperatur und Luftfeuchtigkeit weniger signifikante Schwankungen aufwiesen. Die durchschnittliche Temperatur in der Feldstudie der simulierten Gasfahne wies eine Schwankung von 1,2 °C bzw. 17,95 % auf, während die relative Luftfeuchtigkeit eine Schwankung von 29,84 % bzw. 1,24 % und der Wind über alle Versuche hinweg Schwankungen bis 50 % des Maximalwertes aufwies. Die Windgeschwindigkeit im Industriepark Höchst von 2022 bis 2024 (Abbildung 93) wurde wie bei den Feldstudien anhand der Beaufort-Skala (1 Bft – 6 Bft) klassifiziert (Kapitel 6.3).

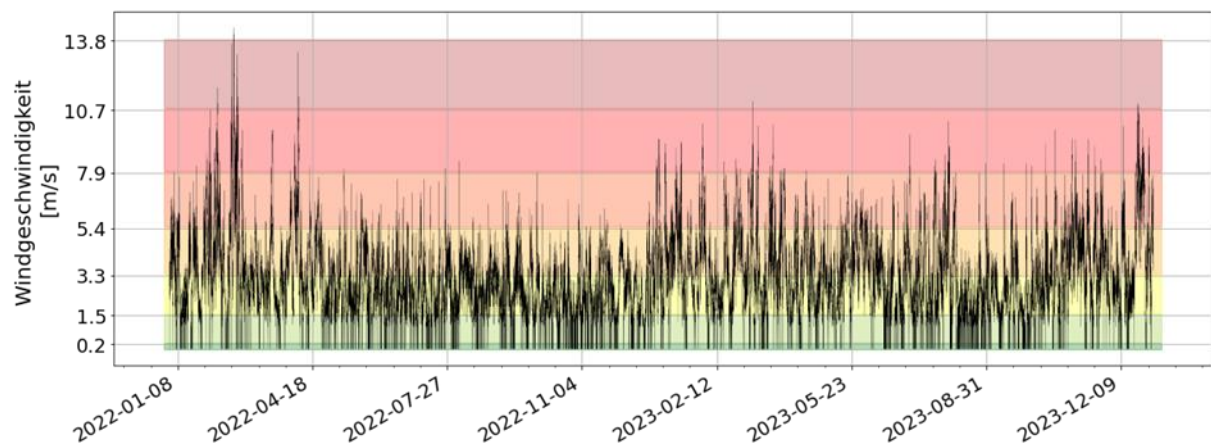


Abbildung 93: Windgeschwindigkeit vom 01.01.2022 bis zum 01.01.2024.

Es gibt Unterschiede in der Windgeschwindigkeitsverteilung zwischen Tag und Nacht. Tagsüber führt die erhöhte Sonneneinstrahlung zur Erwärmung des Bodens und der unteren Luftschichten, was wiederum die Windgeschwindigkeit steigert. Diese Zunahme der Windgeschwindigkeit am Tag geht einher mit einer Zunahme der thermischen Turbulenz. Daher ist es vorteilhaft, UAV-Missionen am Vormittag durchzuführen. Anhand der Daten kann die maximale Anzahl an möglichen Flügen innerhalb der Betriebsgrenzen des UAV ($v_w \leq 12 \text{ m/s}$) für den Zeitraum der zwei Jahre ermittelt werden. In 99,97 % der Fälle können

UAV-Missionen im Bereich von ≤ 6 Bft, was einem starken Wind entspricht, stattfinden, wobei 59,69 % als Flüge mit guten Messbedingungen ($v_w \leq 3,3$ m/s) gelten und das UAV während der Messung stabil in der Luft steht. In 6,89 % der Fälle herrschte absolute Windstille ($v_w \leq 0,02$ m/s, 1 Bft).

Diese Studie betont die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen unter verschiedenen Umweltbedingungen und Flugparametern, um die Robustheit und Genauigkeit drohnenbasierter Sensormessungen zu verbessern. Zukünftige Forschungen sollten sich auf die Entwicklung fortschrittlicher Datenverarbeitungssysteme konzentrieren, um die große Datenmenge effizient zu handhaben und fundierte Entscheidungen in Echtzeit zu ermöglichen.

7.1.5 Vergleich mit ähnlichen wissenschaftlichen Studien

Um die Erkenntnisse, die aus den genannten Feldversuchen gewonnen und hier präsentiert wurden, in das wissenschaftliche Umfeld einzuordnen, sind diese mit Resultaten ähnlicher Studien verglichen worden. Aufgrund der erstmaligen Untersuchung und Charakterisierung der Gasfahne einer industriellen Anlage mit dem vorgestellten Geräteaufbau im Rahmen dieser Doktorarbeit, können einige der Ergebnisse nur mit den Resultaten von stationären Untersuchungen und anderen mobilen Messgeräten verglichen werden. Die in diesem Unterabschnitt erwähnten Publikationen stellen nur einen Ausschnitt aus der Literatur dar, die sich mit den vielseitigen Aspekten der Erkennung von industriellen Emissionen unter Zuhilfenahme von drohnenbasierten Systemen beschäftigt.

Es wurden viele Messungen innerhalb von Deponien und Abluftfahnen weltweit durchgeführt, und einige untersuchten im speziellen industrielle Abluftfahnen. Die meisten Studien dieser Art wurden entweder mit mehreren ortsfesten Messstationen innerhalb und außerhalb (windabwärts) des Begutachtungsgebietes durchgeführt (Helm u. a. 2021; Weiden-Reinmüller 2013). Alternativ oder ergänzend fanden mobile Messungen mittels UAV oder Luftballons statt (Araujo u. a. 2020; Gu, R. Michanowicz, und Jia 2018; Liu 2022; Rutkauskas u. a. 2019). Diese unterschieden sich jedoch grundsätzlich im Aufbau der in dieser Arbeit vorgestellten Module.

Der InfraSampler v2.0 misst in einem 1 Hz-Rhythmus, während der InfraSampler v1.0 aufgrund der Sensorik nur eine Frequenz von 0,3 Hz erreicht. Um die Systeme vergleichen zu können, wurden die Messdaten des InfraSampler v1.0 im Nachhinein interpoliert. Es wurde eine natürliche lineare Interpolation verwendet, da dadurch keine Trends abgeleitet werden und keine Artefakte (z. B. Spitzen, Erhebungen oder Täler) erzeugt werden, die in den Rohdaten nicht vorhanden sind (Burgués u. a. 2022). Die Messstrategie wurden bei jeder Flugmission aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (Anzahl von Schornsteinen, Rohrleitungen, Ex-Bereiche etc.) angepasst. Die Geschwindigkeit des UAV wurde auf ca. 0,5 m/s eingestellt, um die Transmissionsmessung in einer angemessenen Zeit (ca. 25 min) abzuschließen und gleichzeitig den Sensoren genügend Zeit zu geben, auf die Umgebungskonzentration zu reagieren. Die Flughöhe musste kontinuierlich angepasst werden, um entweder in der Gasfahne zu bleiben oder baulichen Gegebenheiten auszuweichen. Es wurde nur eine weitere Studie, welche sich mit dem Gebiet der drohnenbasierten olfaktometrischen Messung von Industrieanlagen beschäftigt, gefunden. Dabei handelt es sich ebenfalls um Feldexperimente an einer industriellen

Anlage, wie auch die in dieser Arbeit vorgestellten Studie (Burgués u. a. 2022). Die Ergebnisse zeigen einen guten Nachweis von Geruchsstoffen bis zu einem kalibrierten Bereich von 100 – 7000 GE/m³, während mit dem InfraSampler Messungen bis 14000 GE/m³ stattfanden. Auch wenn die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind, konnten eindeutige Emissionsquellen an unterschiedlichen Bereichen der Anlagen identifiziert werden. Der Großteil der aktuellen Forschung basiert in diesem Bereich auf terrestrischen Robotern, welche sich auf die Erkennung einzelner Geruchsstoffe spezialisieren (Monroy und Gonzalez-Jimenez 2019).

Die Anforderung, die InfraSampler-Systeme über einen längeren Zeitraum hinweg zu kalibrieren, bedeutet, dass nicht nur die anfängliche Kalibrierungsphase berücksichtigt werden muss, sondern auch,

- die zeitliche Validierung von Kalibrierungsmodellen (Stabilitäts- und Robustheitsstudien),
- die regelmäßige Neukalibrierung
- und die Übertragung von Kalibrierungsmodellen auf andere Anlagen.

Alle diese Schritte bedürfen weiterer Untersuchungen und sollten für die künftige Nutzung des vorgeschlagenen Systems durch Anlagenbetreiber gründlich dokumentiert werden.

Das große Potenzial, dass die InfraSampler-Prototypen gezeigt haben, ermutigt zu seiner Weiterentwicklung bis zum Erreichen eines vorkommerziellen Stadiums und zur Ausweitung seiner Anwendung auf andere Sektoren, in denen Geruchsemissionen einen starken Einfluss haben (Kläranlagen, Deponien, landwirtschaftliche Betriebe usw.). Die hohen Kosten und die Unsicherheit der einzelnen dynamischen Olfaktometrie-Bestimmungen begrenzten die Anzahl und Qualität der Kalibrierungspunkte. Eine Kalibrierung mit wenigen Datenpunkten führt zu einer unzureichenden Darstellung der Komplexität des Problems. Insbesondere wird die kurz- und langfristige Variabilität der Emissionen, die durch wechselnde Betriebsbedingungen, meteorologische Faktoren, saisonale Trends und Sensordrift verursacht wird, noch nicht ausreichend berücksichtigt. Zusätzlich erfordert das Training nicht-linearer Modelle aufgrund der bekannten Nichtlinearitäten bei der Intensität der Geruchswahrnehmung eine dichtere Erfassung der Anlagenbedingungen. Die Kalibrierung eines Instruments mit einer nicht fehlerfreien Referenztechnik erschwert die Anwendung von Standardregressionsmodellen, die davon ausgehen, dass die unabhängigen Variablen exakt gemessen wurden. Darunter fallen ebenso, durch Turbulenzen erzeugte Mischvorgänge.

Frühere Studien beschäftigten sich mit den Effekten von Turbulenzen in urbanen Straßenschluchten und ihre Auswirkungen auf UAVs (Klipp und Measure 2011; Kuuluvainen u. a. 2018). Die Messungen in Höhen von 1,5 – 50 m AG zwischen Gebäuden lassen sich gut mit den Gegebenheiten eines Industrieparks vergleichen. Anhand der Flugmissionen in den Fallstudien (Kapitel 5), welche bei unterschiedlichen Windbedingungen stattfanden, hat sich abgeleitet, dass die manuelle Fernsteuerung nicht schnell genug ist, um auf Turbulenzeffekte zu reagieren. Hier ist die autonome On-Board-Turbulenzkontrolle unerlässlich, um als Hilfestellung für den Fernpiloten zu dienen. Dies konnte insbesondere in Kapitel 5.1 während den Flugmissionen beobachtet werden und wird auch von anderen Arbeiten wie Klipp und Measure bestätigt. Die Auswirkungen des Windes auf das Probenahmesystem und die Sensorsignale

wurden analysiert, wobei sich herausstellte, dass die Auswirkungen bei punktförmigen Quellen größer sind als bei flächigen Quellen (Burgués u. a. 2022).

In weiteren Arbeiten gibt es Vorgaben, dass ein 25 cm horizontaler Abstand zu den Rotorgrenzen eingehalten werden muss, oder die Verwendung einer Probenahmelanze, welche 50 cm vertikal über den Rotoren steht (Cheng und Yuan 2022; Lampert u. a. 2020). Diese Vorgaben stimmen mit den errechneten Lanzenlängen, basierend auf den verwendeten UAV und den Windbedingungen für die InfraSampler-Systeme überein. In dieser Arbeit wurde auf Simulationen zur Luftverteilung verzichtet, jedoch konnten Aussagen anderer Studien, welche auf Simulationen basieren, geprüft werden. Eine Messung während des Aufstiegs oder Abstiegs eines UAV muss mit größeren Turbulenzen rechnen, da hierbei durch die Rotorenbewegung Luftmassen aufeinandertreffen. Solche Simulationen wurden von Lampert u. a. durchgeführt, bei denen das Messverhalten beim Aufsteigen und Absteigen des UAV kontrolliert wurde. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass im Gegensatz zum Schweben oder Aufsteigen des UAV die zusätzlichen vertikalen Geschwindigkeiten einen größeren Einfluss auf die Messungen während des Absinkens haben. Um das Höhenintervall von beprobter Luft genauer einzugrenzen, wären Messungen im Schwebeflug oder im langsamen Steigflug in Kombination mit einem Einlassrohr der oben genannten Abmessungen für eine kontinuierliche Probenahme vorzuziehen. Bei dem vorgestellten Probenahmesystem mit kleinem Volumen wird das in den Rohren enthaltene Luftvolumen jedoch nicht kontinuierlich ausgetauscht, was zu weiteren Unsicherheiten führt. McCray verwendete eine Multirotor-Drohne und eine verlängerte Lanze unter der Drohne, um NO_x in einem Tagebau zu messen. Jedoch konnte Alvarado durch Beobachtung des Luftstroms, der während des aerodynamischen Experiments von den Propellern vermischt wurde, feststellen, dass der Einfluss des Abwindes die Integrität der durch Gassensoren gesammelten Luftproben beeinträchtigt. In ähnlicher Weise präsentierten die Studien von Neumann u. a., Chang, u. a. und Brady u. a. keine Analyse des Einflusses der Propeller über und unter den Drohnen, was notwendig wäre, um zu zeigen, dass repräsentative Gas-/Staub- oder atmosphärische Parameter gesammelt wurden. In Kapitel 5.3 konnte ein klarer Unterschied in der Erkennung von einer CH₄-Fahne erkannt werden, in Abhängigkeit ob über oder unter den Rotoren gemessen wurden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Untersuchung und den Ergebnissen von Alvarado, zeigten Haas u. a., dass die Platzierung der Sensoren unter dem Körper der Drohne eine repräsentative Probe liefern würde. Windkanaltests von Smith u. a. zeigten eine "unbeeinträchtigte Luftstromregion" vor der IRIS+, was auch durch aerodynamische Experimente von Alvarado bestätigt wurde. Die Autoren gaben eine Übereinstimmung von 82 % zwischen dem in der Luft befindlichen Staubsensor und einem händischen Sensor an. Sie führten jedoch 18 % Fehler auf nicht gleichmäßigen Luftstrom und Probleme mit dem Innenluftsystem zurück. Dieser Fehler würde unter nicht idealen Bedingungen bei Feldtests voraussichtlich zunehmen. Durch die Verwendung einer Probenahmesonde in vertikaler oder horizontaler Position, die außerhalb der Luftmischungsgrenzen reicht, wird das Luftvolumen nicht beeinträchtigt. Alvarado testete die Verwendung einer Probenahmesonde unter der Drohne in vertikaler und diagonaler Position. Ihre Ergebnisse zeigten, dass eine Probenahmesonde unter der Drohne gestörte Luftproben sammelt. Villa u. a. präsentierten eine Analyse des Auf- und Abwindes, der durch den verwendeten Multirotor erzeugt wurde, und entwarfen eine Probenahmesonde in horizontaler Position. Der Autor benötigte jedoch manuelle Anpassungen, um die Drohne in Richtung des Windes zu halten, da ihre Systeme keinen

automatischen Windrichtungsausrichtungsalgorithmus oder Sensor enthalten. Hohe Windgeschwindigkeits- und Richtungsvariationen (bis zu 62 °) sowie nicht-laminarer Luftstrom bei Feldtests waren wichtige Faktoren bei der Betrachtung einer horizontalen oder vertikalen Probenahmesonde für das Design der InfraSampler-Systeme. Die Analyse von der während der Tests von Alvarado gesammelten Daten der Probenahmesonde zeigte, dass das Bestimmtheitsmaß und Leistungsstatistiken der horizontalen multivarianten Regression höher waren ($R^2 = 0,77$) als die der vertikalen Position ($R^2 = 0,55$).

Im Gegensatz zu den vorgestellten Ergebnissen dieser Untersuchung erwähnte Chang, u. a. nicht die Verwendung einer Verlängerung des Einlasses zu den Gas- und Staubsensoren, um den Einfluss des Auf- oder Abwindes zu vermeiden. Die Autoren gaben auch keine Spezifikationen für das Sensorsystem, das Gesamtgewicht und die Abmessungen der Drohne an.

Die Flugmuster mussten je nach Hauptziel des Experiments angepasst werden. Der Fokus auf die Grenzbereiche der Rauchfahne und die Definition der Gaskonzentrationszone erforderte ein radiales, konzentrisches Kreis- oder Zickzack-Muster oder die Probenahme in der Schwebelage (Kapitel 4.2). Die Erkenntnisse zum Muster erweitern, was Smith u. a. während Labor- und Feldstudien berichteten. Villa u. a. und Chang, u. a. entnahmen Proben in Spaltenmustern oder durch Schweben. Im Gegensatz dazu führten Brady u. a. ihre Tests nach einem Stoßmuster und ebenfalls durch Schweben durch. Die Autoren berichteten über die beste Leistung eines Rauchmelders, indem sie mit einer Mindestwindgeschwindigkeit von 2 m/s in die Rauchfahne flogen, ohne zu schweben oder über die Rauchfahne zu fliegen, wobei der Sensor unter dem UAV ohne Probenahmesonde angebracht war. Die Ergebnisse dieser Untersuchung waren in dem Moment unterschiedlich, als eine Probenahmelanze verwendet wurde, um Messwerte aus ungestörter Luft durch das UAS zu erhalten. Dadurch war das Schweben möglich, ohne die entnommene Luft zu stören, und es war nicht notwendig, in die Rauchfahne zu fliegen, solange das UAS windabwärts von der Quelle positioniert war (Kapitel 4.3.3). Autoren wie Letheren u. a., Gonzalez, P. Neumann u. a. und Rossi und Brunelli entwickelten jedoch Rauchfahnenverfolgungsalgorithmen, um die Rauchfahne zu charakterisieren und auch die Quelle zu finden, was mit Ursachenermittlung und Risikomanagementfragen verbunden ist. Die Gasfahnenverfolgung könnte für weitere Arbeiten dieser Untersuchung nützlich sein, um die Batterielaufzeit während der Flüge und die Positionierung der Emissionsquellen zu optimieren. Aufgrund der Manövrierfähigkeit eines Multirotor-UAVs werden Variationen der Muster vom Benutzer und der Umgebung definiert, in der sie stattfinden.

7.2 Praxisrelevanz der entwickelten Messstrategien

Da die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messstrategien während vielfältigen Feldmessungen erprobt werden konnten und daher sich auch die Analysemethoden auf umfangreiche Datensätze anwenden ließen, soll hier nun kurz diskutiert werden, welche Praxistauglichkeit sie besitzen.

In dieser Studie wurde eine drohnenbasierte Messung oder Probenahme, die die Gaskonzentration in Echtzeit messen kann und ermöglicht eine Rückrechnung durchzuführen, um eine repräsentative Gas- bzw. Geruchsprobe zu nehmen, vorgestellt. Der entwickelte Prototyp

funktionierte im Feld über mehrere Messtage und unter leicht unterschiedlichen Betriebs- und Wetterbedingungen zuverlässig. Die geringfügige Verschlechterung der Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zum Referenzstandard (Probenahme an festgelegten Probenahmestellen) wird durch die im Vergleich niedrigen Messkosten, die Tragbarkeit des Geräts und die Unmittelbarkeit der Ergebnisse mehr als ausgeglichen, so dass viele Messungen vor Ort durchgeführt werden können.

Dies ist ein wichtiger praktischer Vorteil für Betriebe, die nicht mehr sorgfältig Messkampagnen insbesondere olfaktometrische Messkampagnen planen und mehrere Tage warten müssen, um die Ergebnisse zu erhalten und auszuwerten. Der InfraSampler-Prototyp ermöglicht es dagegen, routinemäßig so viele Probenahmen wie nötig an fast jedem Ort in den Anlagen durchzuführen, die Ergebnisse vergleichsweise schnell zu erhalten und sie in einer Dichtekarte anzuzeigen. Dies verbessert die Fähigkeit der Ursachenermittlung und somit potenzielle Emissionen zu erkennen und zu entschärfen, bevor sie außerhalb des Betriebsgeländes negative Auswirkungen haben.

Die derzeitige Version des InfraSampler-Systems ist nicht robust gegenüber rauen Wetterbedingungen. Das System wird bei Regen, Schnee, Hagel oder bei frischem bis starkem Wind (≥ 5 Bft) keine repräsentativen Messergebnisse liefern. Jedoch konnte das System nach der Witterungsauswertung von 2022 bis 2024 in ca. 60 % der Zeiten unter guten Messbedingungen verwendet werden. Eine umfassendere Validierung ist erforderlich, um die Robustheit des Systems in Bezug auf widrige Wetterbedingungen zu charakterisieren. Größere Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen im Reingasstrom stellen durch die vorgeschaltete Kondensationseinheit kein Problem dar. Obwohl die Systemkomponenten für den Bereich von -20 bis 60 °C geeignet sind, wird davon ausgegangen, dass sich die Vorhersagegenauigkeit in anderen Jahreszeiten aufgrund von Temperaturquerempfindlichkeiten und Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung der Emissionen unterscheiden wird. Um die Leistung des Systems in einem erweiterten Temperatur- und Feuchtigkeitsbereich zu charakterisieren, müssten wir Messkampagnen in anderen Jahreszeiten, insbesondere im Frühling und Sommer, durchführen, was im Rahmen dieses Projekts nicht möglich war. Die Empfindlichkeitsdrift erfordern eine regelmäßige Neukalibrierungen des Systems, um eine stabile Leistung zu gewährleisten.

Drohnenbasierte Messeinheiten haben verschiedene Vorteile gegenüber anderen Messsystemen. Grundsätzlich sind sie einzigartig in ihrer Flexibilität. Man kann nicht nur innerhalb von Minuten den Standort wechseln, Messungen während des Fluges sind ebenso möglich. Da die Stromversorgung über den Akkumulator gewährleistet ist, welcher eine Laufzeit größer als die UAV-Kapazität gewährleistet, sind ohne größeren Aufwand auch Messungen in abgelegenen Gebieten durchführbar. Im Gegensatz zu Fahrzeugen emittiert das UAV keine Abgase, welche bei einer stationären Messung berücksichtigt werden müssen. Während der Messflüge stellt sich das Problem der Eigenkontamination daher nur aufgrund von drohneninduzierter Strömung, deren Auswirkungen durch die Probenahmelanze sehr reduziert werden. Insbesondere die Betriebsmessungen haben gezeigt, dass nur maximal zwei Personen benötigt werden, um eine Probenahme oder Messung mit dem UAV-System durchführen zu können. Der Vorbereitungsaufwand ist für den InfraSampler gering, wenn die gesamte Messapparatur, die meiste Zeit einsetzbar bereitsteht. Dadurch sind auch spontane Messeinsätze bei einem besonderen

Luftereignissen (z. B. Leckage, Geruchsbeschwerden, Anströmung stark belasteter Luftmassen) möglich. Zusätzlich ist es unkompliziert eine Vergleichsmessung der Instrumente, die in den InfraSampler-Systemen installiert sind, mit den Geräten einer anderen Messstation zu realisieren. Da sie direkt an einer der vorhandenen Luftmessstationen aufgestellt werden können. Sie haben nicht nur den Vorteil, dass sie nicht nur die Gegebenheiten an einem bestimmten Standort beschreiben können, sondern entlang der gesamten Messstrecke. Möchte man beispielsweise die Luftqualität einer Gegend (z. B. rund um einen Industriestandort) kartieren, dann ist es günstig, wenn man in kurzer Zeit Messungen an vielen Standorten durchführt, da dann die zeitliche Änderung der Emissionsquelle und der meteorologischen Gegebenheiten keine große Verzerrung der Messergebnisse zur Folge hat. Hierfür ist allerdings die Verwendung zeitlich hochauflösender Messgeräte notwendig. Andernfalls sind schnell fluktuierende oder kleinskalige Phänomene nicht erfassbar. Gerade bei der Untersuchung von Prozessen, die während des Transports eines Luftpakets stattfinden, ist es günstig, diesem Luftpaket während der Messung folgen zu können. Eine derartige quasi-Lagrange'sche Messung ist tatsächlich nur mit mobilen Laboren am Boden oder Zeppelin und Drohnen in der Höhe möglich. Normale Flugzeuge bewegen sich sehr schnell und können sich nur auf einem Zickzackkurs annähernd gemeinsam mit einem Luftpaket fortbewegen. Ortsfeste Messstationen sind kurzfristig räumlich überhaupt nicht flexibel. Hat man eine direkte Anzeige der aktuellen Messdaten, dann ist es bei mobilen Messungen auch möglich, die Messstrategie an die tatsächlichen Umgebungsbedingungen anzupassen. Erstreckt sich beispielsweise die Abluftfahne eines Luftereignisses viel weiter als vermutet, dann lässt sich die Messroute einfacher ausdehnen, solange man sich in der genehmigten Flugzone befindet.

Einige Nachteile haben drohnenbasierte Messeinheiten jedoch im Vergleich zu ortsfesten Messstationen vor allem durch ihre Größe. Im Prinzip lassen sich ortsfeste Messstationen beliebig groß anlegen, so dass viele Messgeräte zeitgleich dort betrieben werden können. Das InfraSampler-System hat nur ein begrenztes Volumen, daher kann auch nur eine endliche Anzahl von Sensoren installiert werden. Hier ist eine zusätzliche Beschränkung durch das zulässige Gesamtgewicht des InfraSampler (1,45 kg) gegeben. Diese Limitationen sind allerdings durch einen modularen Aufbau und den Einsatz von größeren UAV reduzierbar. Ein weiterer Nachteil ist beispielsweise die Kontamination der Messdaten durch lokale Emissionen. Der Standort einer ortsfesten Messstation wird in der Regel so ausgewählt, dass die Bedingungen möglichst ideal für das zu untersuchende Phänomen sind. Selbst wenn man mit aufwendigen Verfahren lokale Störeinflüsse aus den Daten eliminiert, kann man nie ausschließen, dass dennoch ein Einfluss solcher auf die Messdaten vorliegt. Außerdem ist es sehr zeitaufwendig beispielsweise eine Videoanalyse einer Messung durchzuführen. Des Weiteren wird mit einer mobilen Messung trotz hoher zeitlicher und räumlicher Flexibilität immer noch nur eine räumlich begrenzte Momentaufnahme des Zustands der Troposphäre aufgezeichnet. Stellt man eine Karte der Luftqualität für ein bestimmtes Gebiet basierend auf mobilen Messungen dar, dann muss hier berücksichtigt werden, dass es sich trotzdem sowohl zeitlich als auch räumlich um eine Extrapolation der Daten handelt. Eine Kombination der drohnenbasierten Messdaten mit denen mehrerer ortsfester Messstationen ist daher für viele Messsituationen sinnvoll.

Im Rahmen der unterschiedlichen Fallstudien (Kapitel 5) hat sich gezeigt, dass es insbesondere zur Untersuchung der Abluftfahne eines Betriebes von Vorteil ist, mehrere unterschiedliche

Messstrategien anzuwenden. Die Kombination aus Radial-, Querschnittsmessungen und stationären Messungen erlaubt es, einen sehr detaillierten Einblick in die Charakteristika der advehierten industriellen Emissionen zu gewinnen. Radialmessungen allein können keine Auskunft über das Querschnittsprofil der Abluftfahne geben, wohingegen Querschnittsmessungen nur limitierte Aussagen über die radiale Erstreckung der Abluftfahne zulassen. Stationäre Messungen an Standorten ermöglichen repräsentative Probenahmen mit vernachlässigbarer lokaler Kontamination, sodass der Beitrag der Emission zur Gesamtbelastung einer Luftmasse bestimmbar ist, sofern sowohl industriell beeinflusste als auch unbeeinflusste Luftmassen beprobt wird. Ein aufwendiges Bereinigen der Messdaten mittels Videoanalyse ist hinterher bei geeigneter Standortwahl nicht notwendig. Die Aussagen über die Eigenschaften der Abluftfahne werden dadurch etwas eingeschränkt, dass die Luftqualitätsvorhersagen einen gewissen Unsicherheitsbereich haben. Zwar ließ sich relativ gut die ungefähre Advektionsrichtung der urbanen Emissionen im Voraus bestimmen, jedoch ist gerade für Radialmessflüge innerhalb der Abluftfahne eine Genauigkeit von wenigen Grad notwendig. Liegt bei einer Radialmessung die Flugbahn nicht während des gesamten Messzeitraums innerhalb der Abluftfahne, obwohl man dies annimmt, dann interpretiert man die Messdaten zwangsläufig falsch. Insgesamt haben sich die entwickelten Messstrategien als innerhalb ihrer Grenzen praxistauglich erwiesen.

7.2.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel werden herkömmliche Probenahmen an industriellen Schornsteinen und Emissionsmessungen am Reingasstrom mittels angewandter Drohnenmesstechnik gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung wird aus ökonomischer Sicht betrachtet und trifft zusätzlich am Ende eine Aussage über die Effizienz beider Verfahren.

Die Anschaffungskosten (Tabelle 25) für das UAS beruhen auf Durchschnittswerten und können je nach Händler leicht schwanken. Wobei die InfraSampler-Systeme mit ≤ 10.000 € in einem viel günstigerem Preisspektrum liegen als die kommerziell erhältlichen Messsysteme mit > 30.000 €. Die Komponenten Fallschirm und Flugabbruchsystem (FTS) müssen aufgrund der Betriebsgenehmigung verwendet werden und fallen in Flugmissionen der „Offenen Kategorie“ weg. Die GNSS-Referenzstation wird ebenfalls ausschließlich für die Industrieparkumgebung verwendet bzw. Umgebungen mit möglichen Störkomponenten wie Stahlbauten.

Tabelle 25: Anschaffungskosten für ein den Vorgaben entsprechendem UAS.

Komponente	Anzahl	Kosten [€]	Gesamtkosten [€]
M300 RTK	1	8.300	8.300
TB60 Akku	6	700	4.200
BS60 Ladestation	1	1.000	1.000
D-RTK 2 GNSS - Referenzstation	1	2.500	2.500
D-RTK 2 Base Station -Tripod	1	200	200
M300 Serie - Fallschirm	1	1.400	1.400
M300 Serie - FTS	1	1.200	1.200
InfraSampler-System	1	10.000	10.000
		Summe	28.800 €

In Tabelle 26 und Tabelle 27 werden die jeweilig benötigten Zeitstunden mit entsprechenden Auftragskosten für vier Beprobungen pro Woche aufgestellt. Für die stündlichen Personalkosten wird ein Pauschalbetrag von 130 € angenommen.

Die herkömmliche olfaktometrische Probenahme dauert 30 Minuten pro Probe. Dabei ist nicht die Zeit eingerechnet, die der Probenehmer benötigt, um an den Probenahmepunkt zu gelangen. Während der Probenahme findet keine Fotodokumentationen statt. Das Messequipment (Kapitel 3.1.7.1) wird bis zum Probenahmepunkt transportiert und punktuell die Proben entnommen. Es ergeben sich Gesamtkosten für 6 benötigte Stunden in Höhe von 1.820 €.

Tabelle 26: Herkömmliche olfaktometrische Probenahme

Kostenaufstellung zur Olfaktometriebestimmung einer Probe (4 Proben/ Woche)				
	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamtpreis
Probenahme, -vorbereitung	4	Stunde	130	520
Analysenkosten	2	Stunde	650	1.300
Σ (gesamt)	6	Stunde		1.820 €

Die drohnenbasierte Probenahme kann sehr schnell durchgeführt werden, da die Probenahme ca. 5 Minuten dauern. Wie auch bei der herkömmlichen Probenahme ist auch hier nicht die Zeiteingerechnet, die das UAS benötigt, um an den Probenahmepunkt zu gelangen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Zeit signifikant kürzer ist als bei der herkömmlichen Probenahme. Durch die Drohnenkamera kann die gesamte Probenahme aufgezeichnet werden. Somit kann das gleiche Ergebnis in deutlich schnellerer Umsetzung erzielt werden. Die Gesamtkosten für 2,3 benötigte Stunden liegen bei 1.339 € und eine Effizienzsteigerung von 26 %, die durch eine schnellere praktische Ausführung von Emissionsmessungen am Probenahmepunkt begünstigt wird.

Tabelle 27: Drohnenbasierte olfaktometrische Probenahme

Kostenaufstellung zur Olfaktometriebestimmung einer Probe (4 Proben/ Woche)				
	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamtpreis
Probenahme, -vorbereitung	0,3	Stunde	130	39
Analysenkosten	2	Stunde	650	1.300
Σ (gesamt)	2,3	Stunde		1.339 €
Effizienzsteigerung zur herkömmlichen Probenahme				26 %

Die Amortisationszeit für UAS kann stark variieren und liegt je nach Branche typischerweise zwischen 6 Monaten und 3 Jahren. So werden in der Landwirtschaft solche Investitionen oft aufgrund der Halbierung der Arbeitskosten und der Reduzierung der physischen Belastung der Arbeiter innerhalb eines Jahres amortisiert. Die Kosten für den Pestizideinsatz wurden durch den Einsatz von Drohnen im Vergleich zu herkömmlichen Methoden deutlich gesenkt (Umeda,

Yoshikawa, und Seo 2022). In der Bauindustrie reduzierten Unternehmen die Amortisationszeit durch den Einsatz von UAV zur Inspektion und Vermessung auf weniger als zwei Jahre, dadurch dass sie die Kosten für traditionelle Vermessungsmethoden und Inspektionen erheblich senkten (A. Kumar u. a. 2022).

Abbildung 94 zeigt eine detaillierte grafische Darstellung der finanziellen Aspekte einer Investition in ein UAS für die Probenahme und Transmissionsmessung, wobei die Kosten, Einnahmen und der Gewinn über einen Zeitraum von 24 Monaten betrachtet werden.

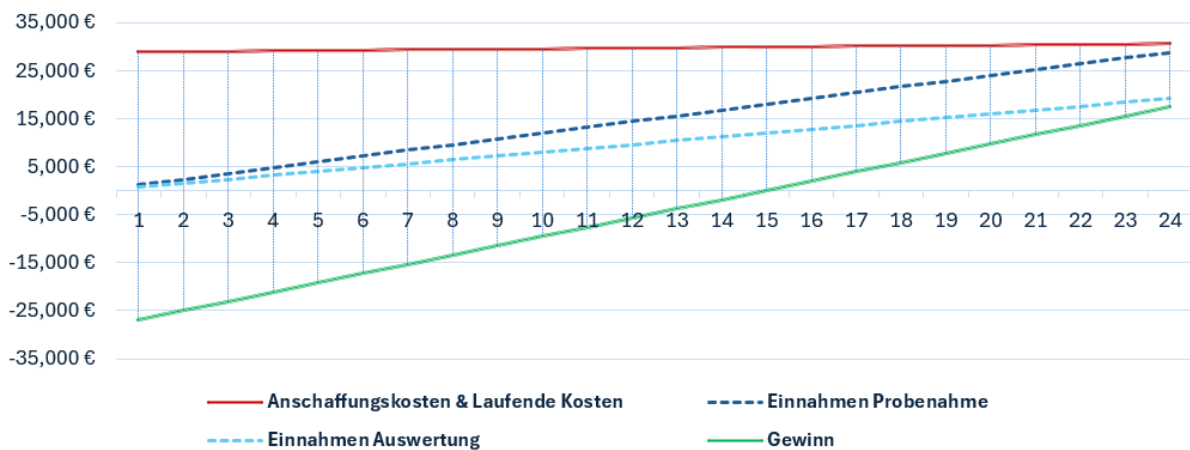


Abbildung 94: Amortisation einer UAS-Investition für Probenahme und Transmissionsmessung.

Die rote Linie stellt die anfänglichen Anschaffungskosten sowie die laufenden Betriebskosten dar, die mit der Nutzung der Drohne verbunden sind. Zu Beginn der Investition sind diese Kosten hoch, da die Anschaffungskosten von 28.800 € sofort anfallen. Im Laufe der Zeit steigen die Kosten weiter, da kontinuierliche Ausgaben für Wartung, Versicherung und andere betriebliche Aufwendungen anfallen. Hierbei wurde von 300 € laufende Kosten ausgegangen. Die gestrichelten Linien zeigen die direkten Einnahmen, die durch die Nutzung der Drohne generiert werden. Dies können Einnahmen aus Dienstleistungen wie Probenahme, Transmissionsmessung, Luftbilddaufnahmen, Kartierung oder Überwachung sein. Weitere Angebote können die Integration von Datenanalysen oder Beratungsdiensten umfassen. Zu Beginn der Investition liegt der Gewinn deutlich im negativen Bereich, was auf die hohen anfänglichen Investitionskosten zurückzuführen ist.

Die Daten im Diagramm zeigen, dass die Amortisation nach etwa 13 – 14 Monaten erreicht wird. Das entspricht den Zeiträumen aus anderen Studien (Umeda u. a. und Kumar u. a.). Für die Bestimmung der vier wöchentlichen UAS-Einsätze wurde die Anzahl der durchschnittlichen Probenahmeaufträge für olfaktometrische Analysen der letzten acht Jahre ausgewertet. Wobei die Jahre 2020 und 2021 nicht mit in die Berechnung eingeflossen sind, da die Pandemie-Restriktionen keine olfaktometrischen Analysen ermöglichten.

7.2.2 Regularien und Restriktionen

Die Mehrzahl der veröffentlichten Studien über den Einsatz von UAS für wissenschaftliche Forschungszwecke oder andere öffentliche Aufgaben geht nicht auf die Gesetze zum Einsatz unbemannter Flugzeuge im Luftraum über und um den Studienort ein. Diese Gemeinsamkeit entspricht den Konventionen wissenschaftlicher Fachzeitschriften, täuscht aber über die Bedeutung der Berücksichtigung von Vorschriften bei der Planung eines Einsatzes, an dem UAS beteiligt sein könnten. Die meisten Gerichtsbarkeiten in Europa z.B. EASA, die den Flug von bemannten Flugzeugen in ihrem Luftraum regeln, schränken auch den Einsatz von unbemannten Flugzeugen in starker Weise ein. Zu den Beweggründen für diese Beschränkungen gehören die Sicherheit der Menschen am Boden und in der Luft sowie die Sicherheit vor dem Missbrauch von UAS. Diese Vorschriften entwickeln sich als Reaktion auf neue Technologien und potenzielle Unfälle, aber die allgemeinen Konzepte, die den neuen Vorschriften zugrunde liegen, bleiben in der Regel trotz der sich verändernden politischen und technologischen Landschaft stabil. Folgend werden die geltenden Vorgaben des Flugbereiches IPH und deren Einschränkungen vorgestellt und kritisch betrachtet, da sie einen direkten Einfluss auf die praktische Anwendung haben.

Die Verwendung eines UAV im industriellen Umfeld erfordert eine Betriebsgenehmigung in der „speziellen Kategorie“. Dafür muss der Betreiber das Specific Operations Risk Assessment (SORA) bestimmen, welche sich aus dem Boden- und Luftrisiko zusammensetzt.

Bodenrisiko

Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen fanden alle in der visuellen Sichtlinie (VLOS) des Fernpiloten statt. Das Fluggebiet (Industriepark Höchst) muss mit dem Bodenrisikopuffer (ca. 40 m) und dem Luftrisikopuffer (ca. 63 m) angegeben werden. Da der Industriepark als besiedeltes Gebiet zählt, wurde ein Initiales Bodenrisiko von 6 angelegt. Um dieses zu Verringern können unterschiedliche Mitigationen eingesetzt werden, dazu zählen z.B. Fallschirme, strategische Mitigationen wie definierte Betriebszeiten und validierte Notfallpläne. Somit konnte das Bodenrisiko auf 2 gesenkt werden.

Luftrisiko

Da der Industriepark Höchst in der Nähe des Flughafen Frankfurt am Main liegt, befindet er sich noch in dessen Kontrollzone. Zusätzlich gibt es in der Nähe Geozonen aufgrund von Helikopterlandeflächen. Damit wurde auch hier das initiale Luftrisiko sehr hoch eingestuft (ARC-D). Da das UAV allerdings nur innerhalb des Industrieparkgeländes fliegt und hierbei ohne Erlaubnis des Frankfurter Flughafens nur bis zu einer Höhe von 50 m fliegen darf konnte das Luftrisiko im Betriebsbereich auf ein niedriges Niveau eingestuft werden (ARC-B). Zusätzlich muss das UAS über ein FTS verfügen, um bei einem „Fly-Away“ keine Gefahr für andere Luftverkehrsteilnehmer darzustellen.

Durch die Mitigationen wird final ein SAIL-Wert von 2 bestimmt, welcher eine Betriebsgenehmigung ermöglicht.

Die geforderten Mitigations-Maßnahmen führen zu einem größeren Einsatzaufwand von Drohnenflügen in industriellen Flächen als zuerst angenommen. Obwohl die Maßnahmen aufgrund des Sicherheitsrisikos durchgeführt werden, haben sie einen direkten Einfluss auf die Messmöglichkeiten. So wird die Nutzlast und damit die Flugdauer des UAV direkt verringert, da immer ein Fallschirm und FTS mitgeführt werden muss. Außerdem muss jedesmal eine zusätzliche Erlaubnis des Frankfurter Flughafens eingeholt werden damit über die 50 m Höhe hinaus geflogen werden darf. Diese Begrenzung ergibt sich direkt aus der vorliegenden Kontrollzone, obwohl nicht mit einer Kollision von UAS und anderen Flugteilnehmern zu rechnen ist, da die Gebäudehöhe im Industriepark höchst bis zu einer Höhe von 167 m reicht. Die Einstufung in ein „besiedeltes Gebiet“ besteht auf dem Verhältnis zwischen Beschäftigten und der Industrieparkfläche. Die Schutzausrüstung (Helmpflicht) und der Aufenthalt der Beschäftigten (innerhalb von Gebäuden) wird dabei nicht berücksichtigt. Auch die 1:1-Regelung, welche besagt, dass der Radius um die Flughöhe des UAV nur von beteiligten Personen betreten werden darf, ist unrealistisch. Wenn das UAV beispielsweise gerade an direkt einem Schornstein in 100 m Höhe hochfliegt, wird bei einem Absturzereignis besagtes UAV ($v_{UAV} \leq 1 \text{ m/s}$) in einem ballistischen Bereich von ca. 5,3 m Radius landen.

Die starken Restriktionen des Luftfahrtbundesamtes (LBA) sind begründet und notwendig, um einen sicheren Betrieb von UAV sicherzustellen. Allerdings müssen die Regelungen im professionellen Bereich angepasst werden, um den Einsatz von UAV zu gewährleisten und nicht durch unpraktikable Vorgaben zu erschweren.

8 Ausblick

Die vorliegende Arbeit demonstriert die Machbarkeit eines drohnenbasierten Ansatzes zur Durchführung diskontinuierlicher Probenahmen an industriellen Schornsteinen. Der Einsatz eines modularen Analysesystems, kombiniert mit einem UAV, ermöglicht eine präzise und nahezu Echtzeit-Erfassung von unterschiedlichen Gaskonzentrationen und mikro-meteorologischen Parametern. Dies führt zu einer besseren Charakterisierung von punktuellen Emissionen und deren Grenzen, insbesondere in schwer zugänglichen Bereichen. Durch die Integration von Sensordaten und Telemetrieinformationen in Echtzeit konnte eine effektive Methodik zur Schätzung der atmosphärischen Verdünnung, während einer Probenahme entwickelt werden. Die Robustheit und Effektivität des neu entwickelten InfraSampler-Systems wurde während der Feldeinsätze bestätigt, wobei es gelang, olfaktometrische Emissionen erfolgreich zu charakterisieren. Trotz der erzielten Erfolge wurden Herausforderungen bei der Erfassung von Daten verdünnter Gasfahnen und der Minimierung äußerer Einflüsse auf die Probenahme identifiziert. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit stationären Messstationen und weiteren drohnenbasierten Modulen bestätigen die Zuverlässigkeit der entwickelten Methoden, sowie der Notwendigkeit von temperierten Messkammern.

Insgesamt haben sich die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messstrategien und Analysemethoden als praxistauglich erwiesen, sowohl für die Untersuchung industrieller Gasfahnen als auch für die Kartierung der Konzentrationsverteilung von Gasen in verschiedenen Regionen. Diese Methoden bieten ein breites Anwendungsspektrum und wurden in dieser Arbeit eingehend optimiert. Weitere Forschungen sind erforderlich, um Gleichungen und Kodierungen in das Hauptprogramm zu integrieren, um eine nahezu Echtzeit-Visualisierung während der Fahnencharakterisierung zu erreichen. Ein wichtiger nächster Schritt wäre die Modifikation des modularen Systems zur Integration von Gassensoren, um die Überwachung von giftigen Gasen wie Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_x) und Schwefeloxiden (SO_x) zu ermöglichen, die erwiesenerweise an Industriestandorten vorkommen, sowie die Rückführung der erzeugten Messdaten auf vorhandene Betriebsprozesse.

Zukünftige Entwicklungen sollten daher auf die Verbesserung der Sensitivität und Genauigkeit der eingesetzten Technologien abzielen, indem fortschrittlichere Sensoren, Mikrocontroller und vorgeschaltete Filtersysteme verwendet werden. Darüber hinaus eröffnet die Untersuchung der Ursachenzusammenhänge zwischen Immissions- und Emissionsbetrachtungen ein interessantes Forschungsfeld, welches durch UAV-gestützte Transmissionsmessungen weiter erforscht werden sollte. Technologische Fortschritte versprechen zudem planmäßige, autonome UAV-Einsätze mit längeren Flugzeiten für regelmäßiges Monitoring. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Entwicklung eines Leitfadens zur UAV-basierten Probenahme, basierend auf bestehenden Normen und Richtlinien, um eine Alternative zu offiziellen Messverfahren zu bieten.

Literaturverzeichnis

- Ahmadi, Parisa, Shattri Mansor, Babak Farjad, und Ebrahim Ghaderpour. 2022. „Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Remote Sensing for Early-Stage Detection of Ganoderma“. *Remote Sensing* 14(5): 1239. doi:10.3390/rs14051239.
- Alsamhi, Saeed H., Ou Ma, Mohammad Samar Ansari, und Faris A. Almalki. 2019. „Survey on Collaborative Smart Drones and Internet of Things for Improving Smartness of Smart Cities“. *IEEE Access* 7: 128125–52. doi:10.1109/ACCESS.2019.2934998.
- Alvarado, Miguel. 2018. „Design and development of a methodology to monitor PM10 dust particles produced by industrial activities using UAV's“. doi:10.14264/uql.2018.574.
- Andersen, Truls, Bert Scheeren, Wouter Peters, und Huilin Chen. 2018. „A UAV-Based Active AirCore System for Measurements of Greenhouse Gases“. *Atmospheric Measurement Techniques* 11(5): 2683–99. doi:10.5194/amt-11-2683-2018.
- Araujo, João Otávio, João Valente, Lammert Kooistra, Sandra Munniks, und Ruud J. B. Peters. 2020. „Experimental Flight Patterns Evaluation for a UAV-Based Air Pollutant Sensor“. *Micromachines* 11(8): 768. doi:10.3390/mi11080768.
- Baehr, Hans Dieter, und Stephan Kabelac. 2016. *Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-49568-1.
- Bangura, Moses. 2017. „Aerodynamics and Control of Quadrotors“. Australian National University. <https://openresearch-repository.anu.edu.au/bitstream/1885/112382/1/Bangura%20Thesis%202017.pdf> (12. Mai 2023).
- Berardi, Andrea. 2016. *Community-Based Eco-Drones for Environmental Management and Governance*. doi:10.13140/RG.2.2.19723.08484.
- Brady, James M., M. Dale Stokes, Jim Bonnardel, und Timothy H. Bertram. 2016. „Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements“. *Environmental Science & Technology* 50(3): 1376–83. doi:10.1021/acs.est.5b05320.
- Bühler, Karl, und Gerhard Kachel. 2010. „Optimale Körperformen mit minimalem Strömungswiderstand“. : 70–72.
- Burgués Calderón, Javier. 2019. „Signal Processing and Machine Learning for Gas Sensors: Gas Source Localization with a Nano-Drone“. <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/141843> (12. Mai 2023).
- Burgués, Javier, Silvia Doñate, María Deseada Esclapez, Lidia Saúco, und Santiago Marco. 2022. „Characterization of Odour Emissions in a Wastewater Treatment Plant Using a Drone-Based Chemical Sensor System“. *Science of The Total Environment* 846: 157290. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157290.

- Chang, Chih-Chung, Chih-Yuan Chang, Jia-Lin Wang, Ming-Ren Lin, Chang-Feng Ou-Yang, Hsiang-Hsu Pan, und Yen-Chen Chen. 2018. „A Study of Atmospheric Mixing of Trace Gases by Aerial Sampling with a Multi-Rotor Drone“. *Atmospheric Environment* 184: 254–61. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.04.032.
- Chang, Chih-Chung, Jia-Lin Wang, Chih-Yuan Chang, Mao-Chang Liang, und Ming-Ren Lin. 2016. „Development of a Multicopter-Carried Whole Air Sampling Apparatus and Its Applications in Environmental Studies“. *Chemosphere* 144: 484–92. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.08.028.
- Chen, Longfei, Xiaoyan Ma, Guangze Li, und Liuyong Chang. 2024. *Condensation Particle Counting Technology and Its Applications*. CRC Press.
- Cheng, Wen-Hsi, und Chung-Shin Yuan. 2022. „Identification of Emission Source Using a Micro Sampler Carried by a Drone“. *Drones* 6(5): 116. doi:10.3390/drones6050116.
- Chiliński, Michał T., Krzysztof M. Markowicz, und Marek Kubicki. 2018. „UAS as a Support for Atmospheric Aerosols Research: Case Study“. *Pure and Applied Geophysics* 175(9): 3325–42. doi:10.1007/s00024-018-1767-3.
- Chodorek, Agnieszka, Robert Ryszard Chodorek, und Alexander Yastrebov. 2022. „The Prototype Monitoring System for Pollution Sensing and Online Visualization with the Use of a UAV and a WebRTC-Based Platform“. *Sensors* 22(4): 1578. doi:10.3390/s22041578.
- Chojnacka, Katarzyna. 2024. „Sustainable chemistry in adaptive agriculture: A review“. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 46: 1–9. doi:10.1016/j.cogsc.2024.100898.
- Cozma, Alexandru, Adrian-Cosmin Firculescu, Dan Tudose, und Laura Ruse. 2022. „Autonomous Multi-Rotor Aerial Platform for Air Pollution Monitoring“. *Sensors* 22(3): 860. doi:10.3390/s22030860.
- Daugėla, Ignas, Jurate Suziedelyte Visockiene, und Jurate Kumpiene. 2020. „DETECTION AND ANALYSIS OF METHANE EMISSIONS FROM A LANDFILL USING UNMANNED AERIAL DRONE SYSTEMS AND SEMICONDUCTOR SENSORS“. *Detritus* (10): 127–38. doi:10.31025/2611-4135/2020.13942.
- Decoster, Didier, und Joseph Harari. 2013. *Optoelectronic Sensors*. John Wiley & Sons.
- Duangsuwan, Sarun, Phoowadon Prapruetdee, Mallika Subongkod, und Katanyoo Klubsuwan. 2022. „3D AQI Mapping Data Assessment of Low-Altitude Drone Real-Time Air Pollution Monitoring“. *Drones* 6(8): 191. doi:10.3390/drones6080191.
- Elston, Jack, Brian Argrow, Maciej Stachura, Doug Weibel, Dale Lawrence, und David Pope. 2015. „Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling“. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 32(1): 97–115. doi:10.1175/JTECH-D-13-00236.1.

- Evans, Benjamin H. 1957. *Natural air flow around buildings*. College Station: Texas Engineering Experiment Station. <https://catalog.hathitrust.org/Record/102256491> (20. März 2024).
- Ferziger, Joel H., Milovan Perić, und Robert L. Street. 2020. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-662-46544-8.
- Gonzalez, Luis Felipe. 2009. „Optimal Mission Path Planning (MPP) For An Air Sampling Unmanned Aerial System“.
- Gu, Qijun, Drew R. Michanowicz, und Chunrong Jia. 2018. „Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling“. *Sensors (Basel, Switzerland)* 18(12): 4363. doi:10.3390/s18124363.
- Haas, Patrick Y., Christophe Balistreri, Piero Pontelandolfo, Gilles Triscone, Hasret Pekoz, und Antonio Pignatiello. 2014. „Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurement in urban areas“. In *32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA AVIATION Forum, American Institute of Aeronautics and Astronautics*. doi:10.2514/6.2014-2272.
- Hansmann, Klaus, und Marc Röckinghausen. 2023. *Bundes-Immissionsschutzgesetz*. 40. Aufl. Nomos Verlagsgesellschaft.
- Helm, Juliane, Henrik Hartmann, Martin Göbel, Boaz Hilman, David Herrera Ramírez, und Jan Muhr. 2021. „Low-Cost Chamber Design for Simultaneous CO₂ and O₂ Flux Measurements between Tree Stems and the Atmosphere“ hrsg. Kathy Steppe. *Tree Physiology* 41(9): 1767–80. doi:10.1093/treephys/tpab022.
- Hering, Ekbert, und Gert Schönfelder. 2012. *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Springer-Verlag.
- Hildmann, Hanno, Ernő Kovacs, Fabrice Saffre, und A. F. Isakovic. 2019. „Nature-Inspired Drone Swarming for Real-Time Aerial Data-Collection Under Dynamic Operational Constraints“. *Drones* 3(3): 71. doi:10.3390/drones3030071.
- Horwitz, W. 1990. „Nomenclature for Sampling in Analytical Chemistry (Recommendations 1990)“. *Pure and Applied Chemistry* 62(6): 1193–1208. doi:10.1351/pac199062061193.
- Hu, Zhi-Hua, Tian-Ci Liu, und Xi-Dan Tian. 2023. „A Drone Routing Problem for Ship Emission Detection Considering Simultaneous Movements“. *Atmosphere* 14(2): 373. doi:10.3390/atmos14020373.
- Janicke, Ulf, Lutz Janicke, Wolfgang Bächlin, Thomas Flassak, Wolfgang Theurer, und Alfred Trukenmüller. 2017. *Berichte zur Umweltphysik - Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft*. 88662 Überlingen: Ingenieurbüro Janicke. <https://www.janicke.de/data/bzu/bzu-009-01.pdf> (23. Juli 2024).

- Johnson, Wayne. 2013. *Rotorcraft Aeromechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139235655.
- Jońca, Justyna, Marcin Pawnuk, Yaroslav Bezyk, Adalbert Arsen, und Izabela Sówka. 2022. „Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution—A Comprehensive Review“. *Sustainability* 14(18): 11516. doi:10.3390/su141811516.
- Karbach, Niklas, Nicole Bobrowski, und Thorsten Hoffmann. 2022. „Observing Volcanoes with Drones: Studies of Volcanic Plume Chemistry with Ultralight Sensor Systems“. *Scientific Reports* 12(1): 17890. doi:10.1038/s41598-022-21935-5.
- Khan, Amina, Sumeet Gupta, und Sachin Kumar Gupta. 2022. „Emerging UAV Technology for Disaster Detection, Mitigation, Response, and Preparedness“. *Journal of Field Robotics* 39(6): 905–55. doi:10.1002/rob.22075.
- Klipp, Cheryl L., und Edward Measure. 2011. *Urban Turbulence and Wind Gusts for Micro Air Vehicle Bio-Inspired Designs*: Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center. doi:10.21236/ADA549371.
- Knapp, K. G., M. L. Jensen, B. B. Balsley, J. A. Bognar, S. J. Oltmans, T. W. Smith, und J. W. Birks. 1998. „Vertical Profiling Using a Complementary Kite and Tethered Balloon Platform at Ferryland Downs, Newfoundland, Canada: Observation of a Dry, Ozone-Rich Plume in the Free Troposphere“. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 103(D11): 13389–97. doi:10.1029/97JD01831.
- Kuhlmann, Hendrik. 2007. *Strömungsmechanik*. Pearson Deutschland GmbH.
- Kumar, Arvind, Meenu Rani, Aishwarya, und Pavan Kumar. 2022. „Drone Technology in Sustainable Agriculture: The Future of Farming Is Precision Agriculture and Mapping“. In *Agriculture, Livestock Production and Aquaculture: Advances for Smallholder Farming Systems Volume 2*, hrsg. Arvind Kumar, Pavan Kumar, S. S. Singh, Bambang Hendro Trisasongko, und Meenu Rani. Cham: Springer International Publishing, 3–12. doi:10.1007/978-3-030-93262-6_1.
- Kumar, Sarvan. 2023. „Chapter 12 - Balloon-Based Remote Sensing of the Atmosphere“. In *Atmospheric Remote Sensing, Earth Observation*, hrsg. Abhay Kumar Singh und Shani Tiwari. Elsevier, 211–26. doi:10.1016/B978-0-323-99262-6.00020-1.
- Kuuluvainen, Heino, Mikko Poikkimäki, Anssi Järvinen, Joel Kuula, Matti Irjala, Miikka Dal Maso, Jorma Keskinen, u. a. 2018. „Vertical Profiles of Lung Deposited Surface Area Concentration of Particulate Matter Measured with a Drone in a Street Canyon“. *Environmental Pollution* 241: 96–105. doi:10.1016/j.envpol.2018.04.100.
- Lampert, Astrid, Falk Pätzold, Magnus O. Asmussen, Lennart Lobitz, Thomas Krüger, Thomas Rausch, Torsten Sachs, u. a. 2020. „Studying Boundary Layer Methane Isotopy and Vertical Mixing Processes at a Rewetted Peatland Site Using an Unmanned Aircraft System“. *Atmospheric Measurement Techniques* 13(4): 1937–52. doi:10.5194/amt-13-1937-2020.

- Lan, Hangzhen, Jose Ruiz-Jimenez, Yevgeny Leleev, Giorgia Demaria, Matti Jussila, Kari Hartonen, und Marja-Liisa Riekkola. 2021. „Quantitative analysis and spatial and temporal distribution of volatile organic compounds in atmospheric air by utilizing drone with miniaturized samplers“. *Chemosphere* 282: 131024. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131024.
- Letheren, Ben, Glen Montes, Tommaso Villa, und Felipe Gonzalez. 2016. „Design and Flight Testing of a Bio-Inspired Plume Tracking Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles“. In *2016 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA: IEEE, 1–9. doi:10.1109/AERO.2016.7500614.
- Liu, Yunsong. 2022. „Characterizing methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) emissions through mobile platforms from local to national scale“. These de doctorat. université Paris-Saclay. <https://www.theses.fr/2022UPASJ021> (12. Mai 2023).
- Martinez, Benjamin, Thomas W. Miller, und Azer P. Yalin. 2020. „Cavity Ring-Down Methane Sensor for Small Unmanned Aerial Systems“. *Sensors* 20(2): 454. doi:10.3390/s20020454.
- McCray, Robert B. 2016. „Utilization of Small Unmanned Aircraft System for Direct Sampling of Nitrogen Oxides Produced by Full-Scale Surface Mine Blasting“. doi:10.13023/ETD.2016.330.
- McKendry, I. G., D. G. Steyn, S. O’Kane, P. Zawar-Reza, und D. Heuff. 1998. „Lower Tropospheric Ozone Measurements by Light Aircraft Equipped with Chemiluminescent Sonde“. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15(1): 136–43. doi:10.1175/1520-0426(1998)015<0136:LTOMBL>2.0.CO;2.
- Menter, F.R. 1994. „Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications | AIAA Journal“. 8(32): 1598. doi:10.2514.
- Meroney, Robert. 1982. „Turbulent diffusion near buildings.“ *Engineering meteorology*: 481–525.
- Mijling, Bas, Qijun Jiang, Dave de Jonge, und Stefano Bocconi. 2018. „Field Calibration of Electrochemical NO₂ Sensors in a Citizen Science Context“. *Atmospheric Measurement Techniques* 11(3): 1297–1312. doi:10.5194/amt-11-1297-2018.
- Mlambo, Reason, Iain H. Woodhouse, France Gerard, und Karen Anderson. 2017. „Structure from Motion (SfM) Photogrammetry with Drone Data: A Low Cost Method for Monitoring Greenhouse Gas Emissions from Forests in Developing Countries“. *Forests* 8(3): 68. doi:10.3390/f8030068.
- Monroy, Javier, und Javier Gonzalez-Jimenez. 2019. „Towards Odor-Sensitive Mobile Robots“. In *Rapid Automation: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, IGI Global, 1491–1510. doi:10.4018/978-1-5225-8060-7.ch070.
- de Moor, J. M., J. Stix, G. Avard, C. Muller, E. Corrales, J. A. Diaz, A. Alan, u. a. 2019. „Insights on Hydrothermal-Magmatic Interactions and Eruptive Processes at Poás Volcano

- (Costa Rica) From High-Frequency Gas Monitoring and Drone Measurements“. *Geophysical Research Letters* 46(3): 1293–1302. doi:10.1029/2018GL080301.
- Mulgund, Sandeep S., und Robert F. Stengel. 1996. „Optimal Nonlinear Estimation for Aircraft Flight Control in Wind Shear“. *Automatica* 32(1): 3–13. doi:10.1016/0005-1098(95)00102-6.
- Neumann, Patrick P., Victor Hernandez Bennetts, Achim J. Lilienthal, Matthias Bartholmai, und Jochen H. Schiller. 2013. „Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-based algorithms“. *Advanced Robotics* 27(9): 725–38. doi:10.1080/01691864.2013.779052.
- Neumann, Patrick, Sahar Asadi, Jochen H. Schiller, Achim J. Lilienthal, und Matthias Bartholmai. 2011. „An Artificial Potential Field Based Sampling Strategy for a Gas-Sensitive Micro-Drone“. In , 34–38. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:oru:diva-24125> (12. Mai 2023).
- Park, Jinseok, Seongju Jang, Hyungjoon Kim, Rokgi Hong, und Inhong Song. 2020. „Application of Drone Images to Investigate Biomass Management Practices and Estimation of CH₄ Emissions from Paddy Fields“. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 62(3): 39–49. doi:10.5389/KSAE.2020.62.3.039.
- Persson, Linnea, und Bo Wahlberg. „Model Predictive Control for Autonomous Ship Landing in a Search and Rescue Scenario“. In *AIAA Scitech 2019 Forum*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2019-1169.
- Rabus, Dominik G., Cinzia Sada, und Karsten Rebner. 2018. *Optofluidics: Process Analytical Technology*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Rahaman, Sheikh Aminur, Tania Urmee, und David A. Parlevliet. 2022. „Investigate the Impact of Environmental and Operating Conditions of Infrared (IR) Imaging on Infrared Thermography of PV Modules to Identify Defects“. *Solar Energy* 245: 231–53. doi:10.1016/j.solener.2022.09.003.
- Rakha, Tarek, Amanda Liberty, Alice Gorodetsky, Burak Kakillioglu, und Senem Velipasalar. 2018. „Heat Mapping Drones: An Autonomous Computer-Vision-Based Procedure for Building Envelope Inspection Using Unmanned Aerial Systems (UAS)“. *Technology/Architecture + Design* 2(1): 30–44. doi:10.1080/24751448.2018.1420963.
- Rigas, Emmanouil S., Panayiotis Kolios, Michalis Mavrovouniotis, und Georgios Ellinas. 2022. „Scheduling a Fleet of Drones for Monitoring Missions With Spatial, Temporal, and Energy Constraints“. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23(9): 15133–45. doi:10.1109/TITS.2021.3137359.
- Rossi, Maurizio, und Davide Brunelli. 2016. „Autonomous Gas Detection and Mapping With Unmanned Aerial Vehicles“. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 65(4): 765–75. doi:10.1109/TIM.2015.2506319.
- Rüdiger, Julian, Jan-Lukas Tirpitz, J. Maarten de Moor, Nicole Bobrowski, Alexandra Gutmann, Marco Liuzzo, Martha Ibarra, und Thorsten Hoffmann. 2018. „Implementation of

- Electrochemical, Optical and Denuder-Based Sensors and Sampling Techniques on UAV for Volcanic Gas Measurements: Examples from Masaya, Turrialba and Stromboli Volcanoes". *Atmospheric Measurement Techniques* 11(4): 2441–57. doi:10.5194/amt-11-2441-2018.
- Ruiz-Jimenez, Jose, Nicola Zanca, Hangzhen Lan, Matti Jussila, Kari Hartonen, und Marja-Liisa Riekkola. 2019. „Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems“. *Journal of Chromatography A* 1597: 202–8. doi:10.1016/j.chroma.2019.04.009.
- Rutkauskas, Marius, Martin Asenov, Subramanian Ramamoorthy, und Derryck T. Reid. 2019. „Autonomous Multi-Species Environmental Gas Sensing Using Drone-Based Fourier-Transform Infrared Spectroscopy“. *Optics Express* 27(7): 9578–87. doi:10.1364/OE.27.009578.
- Sanchez-Cuevas, Pedro, Guillermo Heredia, und Anibal Ollero. 2017. „Characterization of the Aerodynamic Ground Effect and Its Influence in Multirotor Control“. *International Journal of Aerospace Engineering* 2017: e1823056. doi:10.1155/2017/1823056.
- Schuyler, Travis J., Sean C. C. Bailey, und Marcelo I. Guzman. 2019. „Monitoring Tropospheric Gases with Small Unmanned Aerial Systems (SUAS) during the Second CLOUDMAP Flight Campaign“. *Atmosphere* 10(8): 434. doi:10.3390/atmos10080434.
- Shannon, Paddy. 2017. *Optischer Sauerstoffsensoren im Vergleich zu konventionellen Sauerstoffsensoren - Die wichtigsten Vorteile und Anwendungen*. SST Sensing.
- Smith, Brendan, Garrett John, Brandon Stark, Lance E. Christensen, und YangQuan Chen. 2016. „Applicability of Unmanned Aerial Systems for Leak Detection“. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, VA, USA: IEEE, 1220–27. doi:10.1109/ICUAS.2016.7502635.
- Soman, Kritik. 2019. „Rooftop Detection using Aerial Drone Imagery“. In *Proceedings of the ACM India Joint International Conference on Data Science and Management of Data, CODS-COMAD '19*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 281–84. doi:10.1145/3297001.3297041.
- Stull, Roland B., hrsg. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-009-3027-8.
- Tanda, Giovanni, Marco Balsi, Paolo Fallavollita, und Valter Chiarabini. 2020. „A UAV-Based Thermal-Imaging Approach for the Monitoring of Urban Landfills“. *Inventions* 5(4): 55. doi:10.3390/inventions5040055.
- Tholl, Dorothea, Oindrila Hossain, Alexander Weinhold, Ursula S. R. Röse, und Qingshan Wei. 2021. „Trends and Applications in Plant Volatile Sampling and Analysis“. *The Plant Journal* 106(2): 314–25. doi:10.1111/tpj.15176.
- Umeda, Shotaro, Naoki Yoshikawa, und Yuna Seo. 2022. „Cost and Workload Assessment of Agricultural Drone Sprayer: A Case Study of Rice Production in Japan“. *Sustainability*: 14–17.

- Vacca, Alessia, und Hiroko Onishi. 2017. „Drones: Military Weapons, Surveillance or Mapping Tools for Environmental Monitoring? The Need for Legal Framework Is Required“. *Transportation Research Procedia* 25: 51–62. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.209.
- Villa, Tommaso Francesco, Felipe Gonzalez, Branka Miljevic, Zoran D. Ristovski, und Lidia Morawska. 2016. „An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives“. *Sensors* 16(7): 1072. doi:10.3390/s16071072.
- Watts, Adam C., Vincent G. Ambrosia, und Everett A. Hinkley. 2012. „Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use“. *Remote Sensing* 4(6): 1671–92. doi:10.3390/rs4061671.
- Weiden-Reinmüller, Sarah-Lena Von Der. 2013. „Entwicklung und Anwendung von mobilen Messstrategien und Analysemethoden zur Untersuchung urbanen Aerosols“. Johannes Gutenberg-Universität Mainz. doi:10.25358/OPENSOURCE-4398.
- Weil, Jeffrey C. 1988. „Plume Rise“. In *Lectures on Air Pollution Modeling*, hrsg. Akula Venkatram und John C. Wyngaard. Boston, MA: American Meteorological Society, 119–66. doi:10.1007/978-1-935704-16-4_4.
- Wolff, Marcus. 2021. *Sensor-Technologien: Band 3: Stoffmenge, Konzentration, Analytik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Wöllenstein, Jürgen. 2011. *Halbleiter-Gassensoren in Dünn- und Dickschichttechnik*. 79110 Freiburg: Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM.
- Wong, Dr KC. „Survey of Regional Developments: Civil Applications“.
- Wong, Jacob Y., und Roy L. Anderson. 2012. *Non-Dispersive Infrared Gas Measurement*. Lulu.com.
- Woo, H. G. C., J. A. Peterka, und J. E. Cermak. 1977. *Wind-tunnel measurements in the wakes of structures*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770012772> (19. März 2024).
- Yoon, Steven, Henry C. Lee, und Thomas H. Pulliam. 2016. „Computational Analysis of Multi-Rotor Flows“. In *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2016-0812.
- Yuan, Chung-Shin, Wen-Hsi Cheng, Shu-Ying Su, und Wei-Hsiang Chen. 2021. „Field Measurement of Spatiotemporal Distributions of Ambient Concentrations of Volatile Organic Compounds around a High-Tech Industrial Park Using a Drone“. *Atmospheric Pollution Research* 12(10): 101187. doi:10.1016/j.apr.2021.101187.
- Zenger, Axel. 1998. *Atmosphärische Ausbreitungsmodellierung*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-58979-9.
- Zhao, Ruojie, Baohui Yin, Nan Zhang, Jing Wang, Chunmei Geng, Xinhua Wang, Bin Han, u. a. 2021. „Aircraft-based observation of gaseous pollutants in the lower troposphere over

the Beijing-Tianjin-Hebei region". *Science of The Total Environment* 773: 144818. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144818.

Zhou, Xiaochi, Johanna Aurell, William Mitchell, Dennis Tabor, und Brian Gullett. 2017. „A small, lightweight multipollutant sensor system for ground-mobile and aerial emission sampling from open area sources - ScienceDirect“. *Atmospheric Environment*(Volume 154): Pages 31-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.029>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafte Anforderungen an das UAS während der Probenahme an einem Schornstein, mit aufzubringenden oder erzeugten Kräften.-	10 -
Abbildung 2:	Wirbelstrukturen bei der Umströmung eines Quaders mit Wiederanlagerung der freien Scherschicht. (Woo, Peterka, und Cermak 1977).....-	15 -
Abbildung 3:	Strömungsfeld im Mittelschnitt um ein quaderförmiges Gebäude. (Meroney 1982).....-	16 -
Abbildung 4:	Ausbreitung der Abgase bei unterschiedlichen Quellhöhen. (Meroney 1982)-	17 -
Abbildung 5:	Schematische Darstellung propellererzeugter Strömung. Mittig ist ein Propeller dargestellt. Die Begrenzungslinien und Pfeile deuten Stromlinien der propellerinduzierten Strömung an.-	17 -
Abbildung 6:	Strömungsvisualisierung einer Drohne mit Bodeneffekt (der untere Bildrand entspricht dem Boden) durch CFD-Simulation (oben) (Sanchez-Cuevas, Heredia, und Ollero 2017) (m. Anm. d. Verfassers). Darstellung der Schubkraftänderung eines Rotors u_{ground} in Abhängigkeit des normierten Abstands vom Boden z/R im Verhältnis zur Schubkraft eines Rotors u_{free} ohne Bodeneffekt (unten links). Visualisierung der bei einer Anordnung von vier Rotoren erzeugten Wirbel in einer CFD-Simulation (unten rechts) (Yoon, Lee, und Pulliam 2016).....-	19 -
Abbildung 7:	Beispiel für die Umströmung eines Rotorblattes.a) zeigt das UAV im Schwebeflug. b) zeigt das UAV beim Aufsteigen und c) zeigt das UAV beim Absinken (Lampert u. a. 2020).-	20 -
Abbildung 8:	Zeitstrahl der Entwicklung aller Messapplikationen während der Forschungsarbeit.....-	21 -
Abbildung 9:	a) Der erste Aufbau des InfraSampler v1.0 b) InfraSampler v1.0 mit Integrierung des Filtersystems, angepasstem Gehäuse und Überarbeitung der Elektronik. c) InfraSampler v.2.0 mit optimierter Sensorik für die Probenahme und Echtzeitmessdatenübertragung.-	23 -
Abbildung 10:	Systematische Drastellung des InfraSampler v2.0. Angegeben sind die seriellen Verbindungen, sowie die Stromversorgung der einzelnen Komponenten.....-	23 -
Abbildung 11:	Schematische Übersicht des Gasweges durch das Modul.....-	24 -
Abbildung 12:	D3K Mikromembranpumpe von TCS Micropumps.(TCS Micropumps, 2023)-	25 -
Abbildung 13:	Probenahme am Kamin einer Biogasaufbereitungsanlage.....-	25 -
Abbildung 14:	Schematische Dartsellung der Luftzirkulation durch einen Rotor.-	26 -
Abbildung 15:	R_{krit} bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten, bezogen auf die Matrice 200 V2 dargestellt.....-	27 -
Abbildung 16:	InfraSampler v1.0 mit arretierter 1,7 m langer Probenahmelanze und zwei PTFE-Schläuchen ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) (links). Mittig ist eine schematische	

	Darstellung mit Foto des horizontalen Lufteinzuges zu sehen. Rechts ist der abgewinkelte Lufteinzug dargestellt.- 28 -
Abbildung 17:	Dargestellt ist a) das Filter- und Kondensationssystem des InfraSampler v1.0. Von links nach rechts sind die Partikelfilter (0,45 μm), die Wasserfalle und die hydrophoben Filter (0,22 μm) zu sehen, b) sind die installierten Impinger des InfraSampler v2.0 dargestellt, an welche ebenfalls noch Filter angeschlossen werden können.- 30 -
Abbildung 18:	Messmechanismus eines Kurzschlussstrom protonenleitenden CO-Sensors. (Figaro, 2014)- 32 -
Abbildung 19:	Schematischer Aufbau eines Metalloxid-Gassensorarrays (links) mit dem zugehörigen Widerstandsverlauf bei Beaufschlagung mit verschiedenen Prüfgasen (rechts). (Fraunhofer IPM, 2011).....- 33 -
Abbildung 20:	Blockschaltbild eines OPC (links) mit dem zugehörigen Arbeitsprinzip (rechts). (Sensirion, 2024)- 34 -
Abbildung 21:	UBIS Alarm & Trend-Monitor. Das firmeninterne Ubis-System gibt die Parameter der Luftmessstationen in 5 min Mittelwerten aus, sowie die Meteorologie im Inudstriepark Höchst.....- 38 -
Abbildung 22:	Geruchsanalyse an einem Olfaktometer (Olfasense, 2023)- 40 -
Abbildung 23:	Skala zur Kategorisierung der hedonischen Geruchseinwirkung. (Maiwald, 2016).....- 41 -
Abbildung 24:	CO ₂ -Kartierung von der Rauchfahne einer Biogasaufbereitungsanlage im IPH in unterschiedlichen Höhen. Der rot markierte Bereich gibt das Fluggebiet des UAS vor.....- 43 -
Abbildung 25:	Schematische Darstellung dreier Querschnittsmessungen (gestrichelter Pfeil) durch die Abluftfahne der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.- 45 -
Abbildung 26:	Schematische Darstellung einer Radialmessung (gestrichelter Doppelpfeil) durch die Abluftfahne der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.- 46 -
Abbildung 27:	Schematische Darstellung einer stationären Probenahme im Schwebeflug (gestrichelter Doppelpfeil) an dem Schornstein der Stripperkolonne. Der Maßstab der Karte ist gegeben über die Länge der rechts unten eingezeichneten Linie, welche etwa einer Distanz von 10 m entspricht.- 47 -
	-
Abbildung 28:	Abkühlrate von Reingasströmen mit $T_1 = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ }^\circ\text{C}$ und $160\text{ }^\circ\text{C}$ auf die gegebene Umgebungstemperatur $T_U = 0 - 30\text{ }^\circ\text{C}$, in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit am Emissionspunkt.- 49 -
Abbildung 29:	Mollier-h,x-Diagramm eingezeichnet ist die Abkühlung der Luft während der Probenahme durch die Lanze vom Zustandspunkt „1“ nach „2“.- 51 -
Abbildung 30:	Obersicht der Simulation von der Umströmung eines Zylinders basierend auf Bühler und Kachel mit Anflugsrichtung von der Luv-Seite.- 53 -

Abbildung 31:	Seitenansicht der Umströmung eines Würfels nach Ferziger u.a. mit Anflugsrichtung von der Luv-Seite. Zu Erkennen sind die Trennzone in der stromaufwärts gelegenen Ecke (F), der Kopf des Bogenwinkels (G), die Wiederanlegelinie (H) und die Rezirkulationszone (I).- 53 -
Abbildung 32:	Reales Integral einer Probenahme mit 171.023.918 ppm (links) und theoretisches Integral einer vollständigen Probenahme mit 485.000.000 ppm (rechts).- 56 -
Abbildung 33:	Einzelschritte bis zum Start einer Flugmission. Die Vorbereitung ist in die Vorbereitung des Fluges und der Messinstrumente aufgeteilt. Dabei besteht die Flugvorbereitung ausschließlich aus dem Einholen der Fluggenehmigungen.- 58 -
Abbildung 34:	Einzelschritte bis zum Start der Probenahme.- 59 -
Abbildung 35:	Co- Fermentationsanlage der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG. (Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG, 2022)- 61 -
Abbildung 36:	Beispielhafter Aufreinigungsprozess von Biogas mit schematischer Darstellung eines Verfahrensfliessbildes. (Infraseriv Höchst, 2010)- 62 -
Abbildung 37:	Schematischer Aufbau des InfraSampler v1.0- 63 -
Abbildung 38:	Reguläre Probenahmestelle „E1“ und „E1-Ersatz“ für Reingase an der Stripperkolonne.- 65 -
Abbildung 39:	Probenahme an dem Schoornstein nach der Stripperkolonne. Die drei Bilder a) bis c) zeigen das UAS während der Probenahme. Erkennbar ist, wie sich der Probenahmebeutel über den Zeitraum von acht Minuten füllt.- 66 -
Abbildung 40:	Industriepark Höchst mit den fünf eingezeichneten Luftmessstationen. 1.Messstation West (akkreditierte Messstelle), 2.Messstation Süd, 3.Messstation Ost, 4.Messstation Nord-Ost, 5.Messstation Nord. (Geodatenmanagement Infraseriv Höchst, 2011)- 68 -
Abbildung 41:	Darstellung des Mikrosystems (links). Ort der Vergleichsmessung in 4 m Höhe an der Ansaugung der Messstation West (rechts).- 69 -
Abbildung 42:	Immissionsüberwachungsmodul, geschlossen und offen. In der Messkammer 1 befindet sich die Sensorik zur Feinstaubmessung und in der Messkammer 2 die Gassensorik.- 70 -
Abbildung 43:	Beispielhafte Darstellung der Messstation Süd (links) im IPH mit den verwendeten Messgeräten (rechts). 1) NOx-Messgerät 2) Kohlenwasserstoff-Messgerät 3) SO ₂ -Messgerät 4) Chlor-Messgerät 5) Prüfgasgenerator 6) Katalysator- 71 -
Abbildung 44:	Darstellung des Datenverlustes über den Gesamtzeitraum von 12 Monaten, aufgeteilt in die unterschiedlichen Messsysteme.- 73 -
Abbildung 45:	Korrelationsmatrix der direkt vergleichbaren Variablen. (links) Messkampagne im Westen des IPH. Vergleich zwischen den Referenzmethoden, IMB und dem Mikrosystem. (rechts) Messkampagne im Süden des IPH. Vergleich zwischen Referenzmethoden und IMB.- 74 -
Abbildung 46:	Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der BAM in Horstwalde. Gelb markiert ist das Versuchsgelände für UAV-Missionen.- 76 -

- Abbildung 47: Versuchsgelände auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM. Die gelb markierte Fläche, bildet das Fluggebiet mit 5200 m² ab (oben). Schematische Darstellung der simulierten Gasfahne mit horizontaler (0°) bis abgewinkelter (80°) Ausrichtung (unten).....- 77 -
- Abbildung 48: Anordnung der Messmodule auf dem UAV M300 RTK. Über den Rotoren ist der Sniffer 4D angebracht, unter den Rotoren wurde der InfraSampler v1.0 befestigt. Kurz vor dem Flugstart wurde das Silverbox hinter dem InfraSampler befestigt und an den zweiten Gaseinlass der Probenahmelanze angeschlossen.....- 79 -
- Abbildung 49: Gasdistribution am Ventilator.....- 80 -
- Abbildung 50: Versuchsaufbau des ersten Experimentes am 23.04.2024 mit horizontal ausgerichteten Ventilator (links) und nach oben gerichtetem Ventilator (rechts). Zu sehen ist das UAS im radialen Anflug. An den Seitengrenzen sind die zehn Gastransmitter (MP1 – MP10) in unterschiedlichen Höhen aufgestellt.....- 81 -
- Abbildung 51: Während einer Querschnittsfahrt gemessene Konzentrationen von O₂ (grüne Punkte) und CO₂ (blaue Punkte) aufgetragen über den Peilwinkel in Grad des jeweiligen Messortes in Bezug auf das Zentrum des Emissionspunktes. Diese Querschnittsmessung (<1 m, 2 m Distanz zum Emissionspunkt der Stripperkolonne) fand am 02.11.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. Die Abluftfahne wurde in süd-westliche Richtung advehiert. Die Datenpunkte, die im grau und blassorange eingefärbten Winkelbereich liegen, wurden der Kategorie 2 (Abluftfahne) zugeordnet. Der blassorange gefärbte Bereich markiert die Daten, die zusätzlich der Kategorie 3 und damit dem Maximum der Abluftfahne zugeordnet werden konnten. Die übrigen Messwerte (nicht gefärbter Winkelbereich) sind der Kategorie 1, Hintergrundluftmassen zuzuordnen.....- 84 -
- Abbildung 52: Während einer Radialfahrt gemessene Konzentrationen von Temperatur (rote Punkte), O₂ (grüne Punkte) und CO₂ (blaue Punkte) aufgetragen über die Entfernung zum Emissionspunkt der Stripperkolonne. Diese Flugmission fand am 12.10.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. Die Abluftfahne wurde in süd-süd-westliche Richtung advehiert. Gezeigt sind nur die Daten des Fluges von dem Emissionspunkt weg. Die Datenpunkte im grau gefärbten Bereich sind der Abluftfahne zugeordnet, die Punkte im gelben Bereich sind direkt am Emissionspunkt und die restlichen Punkte atmosphärischen Hintergrundluftmassen.- 85 -
- Abbildung 53: Während einer Winddrehung stationär gemessene Konzentrationen von Temperatur (rote Linie), O₂ (grüne Linie) und CO₂ (blaue Linie) aufgetragen über die Zeit. Die mittlere Windgeschwindigkeit steigt im Zeitintervall (10:00 Uhr bis 10:30 Uhr) von 0,2 m/s auf 0,4 m/s. Diese Messung fand am 11.11.2021 im Rahmen der Fallstudie der olfaktometrischen Charakterisierung von Abgas statt. In dem Zeitraum, der zwischen den

beiden schwarzen gestrichelten vertikalen Linien liegt (grau und gelb gefärbter Bereich), wurde die geruchsbeladene Abgasfahne beprobt, wobei maximale Luftschadstoffkonzentrationen im gelb markierten Zeitintervall gemessen wurden. In den Zeiten außerhalb der markierten Bereiche handelt es sich um Hintergrundluft. Die vier Windrosen geben die mittlere gemessene Windrichtung am Messort für die vier Zeitabschnitte (Zeitraum während der Probenahme, sowie die Zeiten davor und danach) an. Der rote Punkt zeigt die UAV-Position relativ zum Emissionspunkt (Zentrum der Windrose).....- 86 -

Abbildung 54: Exploration der Messdaten (12.10.2021) vom InfraSampler durch zweifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen sind oben dargestellt. Die Wärmekarte zeigt den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke in Abhängigkeit zur Windrichtung an. Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.....- 89 -

Abbildung 55: Exploration der Messdaten (02.11.2021) vom InfraSampler v.1.0 durch dreifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind zusammen dargestellt (oben). Das 3D-Diagramm und die Wärmekarte zeigen den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke aus dem Kamin in Abhängigkeit der Windrichtung (unten). Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.- 91 -

Abbildung 56: Exploration der Messdaten (11.11.2021) vom InfraSampler v.1.0 durch dreifache Visualisierung. Der zeitliche Verlauf der Probenahme, mit den zugehörigen Einflussgrößen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind zusammen dargestellt (oben). Das 3D-Diagramm und die Wärmekarte zeigen den aufgenommenen Verlauf der Rauchwolke aus dem Kamin in Abhängigkeit der Windrichtung (unten). Der Kartenabschnitt zeigt die Longitude von 8,517297 bis 8,517966 und die Latitude von 50,084850 bis 50,085230.- 93 -

Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration am Kamin vom 11.11.2021.....- 94 -

Abbildung 58: Vergleich der Geruchskonzentration der Probenahmestelle E1-Ersatz und dem Schornstein nach der Stripperkolonne. Aus den beiden E1-Ersatz Proben wurde der Mittelwert gebildet.....- 96 -

Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf der Geruchsstoffkonzentration eines geruchsbelastenden Abgases.....- 97 -

Abbildung 60: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von der Temperatur.- 99 -

Abbildung 61: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von der rel. Luftfeuchtigkeit.- 100 -

Abbildung 62: Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Stickstoffdioxid.....- 100 -

Abbildung 63:	Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Ozon.- 101 -
Abbildung 64:	Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Feinstaub PM _{2,5}- 101 -
Abbildung 65:	Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Feinstaub PM ₁₀- 102 -
Abbildung 66:	Lineare Regression (links) und standardisierte Residuen (rechts) von Kohlenstoffmonoxid.....- 102 -
Abbildung 67:	Stundemittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.....- 103 -
Abbildung 68:	Tagesmittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.....- 106 -
Abbildung 69:	Monatsmittelwerte der Vergleichsmessungen von Referenzmethoden mit der IMB von Dezember 2021 bis Dezember 2022. Die rote Linie gibt den Zeitpunkt der Standortänderung vom Westen in den Süden an.....- 109 -
Abbildung 70:	Stundenmittelwert von Schwefeldioxid am Standort IPH West. Die SO ₂ -Konzentration liegt außerhalb vom Messbereich des IMB-Sensors.....- 111 -
Abbildung 71:	Stundenmittelwert von Schwefeldioxid am Standort IPH Süd. Die SO ₂ -Konzentration liegt am Standort-Süd innerhalb vom Messbereich des IMB-Sensors.- 112 -
Abbildung 72:	Quadratische Regression mit Bestimmtheitsmaß zur Darstellung des Einflusses der Querempfindlichkeit von NO ₂ auf die SO ₂ -Messung nach Standortwechsel.....- 112 -
Abbildung 73:	Stundenmittelwerte vom VOC -Index (rechte Skala), verglichen mit den Parametern, organischer Kohlenstoff (Org. C), Methan (CH ₄) und gesamten Kohlenwasserstoffen (THC) (linke Skala).- 114 -
Abbildung 74:	1. Versuch mit den Kenndaten CH ₄ mit 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) als Referenzmessung der Fahngrenze. Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb des Messbereiches.....- 115 -
Abbildung 75:	Winddaten vom 1. Versuch mit einer Windstärkeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 116 -
Abbildung 76:	2. Versuch mit den Kenndaten CO ₂ 7,5 bar und der Simultanmessung mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO ₂ -Daten der Silverbox wieder.....- 117 -
Abbildung 77:	Winddaten vom 2. Versuch mit einer Windstärkeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 117 -
Abbildung 78:	3. Versuch mit den Kenndaten CO ₂ 5 bar und CH ₄ 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) zur Ermittlung der CH ₄ -Fahngrenzen (unten). Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb

	des Messbereiches. Zusätzliche Simultanmessung von CO ₂ mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO ₂ -Daten der Silverbox wieder (oben).....- 118 -
Abbildung 79:	Winddaten vom 3. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 119 -
Abbildung 80:	4. Versuch mit den Kenndaten CH ₄ mit 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) als Referenzmessung der Fahngrenze. Die Volt-Anzeige der MP, welche über 2,5 V hinausgehen, befanden sich außerhalb des Messbereiches.....- 120 -
Abbildung 81:	Winddaten vom 4. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 121 -
Abbildung 82:	5. Versuch mit den Kenndaten CO ₂ 7,5 bar und der Simultanmessung mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO ₂ -Daten der Silverbox wieder.....- 121 -
Abbildung 83:	Winddaten vom 5. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 122 -
Abbildung 84:	6. Versuch mit den Kenndaten CO ₂ 5 bar und CH ₄ 7,5 bar und den PIR7000 (MP1 – MP10) zur Ermittlung der CH ₄ -Fahngrenzen (unten). Zusätzliche Simultanmessung von CO ₂ mit angeschlossener Silverbox. Die gestrichelten Werte geben die CO ₂ -Daten der Silverbox wieder (oben).....- 123 -
Abbildung 85:	Winddaten vom 6. Versuch mit einer Windstärkeeinteilung nach Beaufort (0 bis 12). Die Windrichtung ist in Grad angegeben, wobei die Gradzahl 90 ° = O, 180 ° = S, 270 ° = W und 360 ° = N entspricht.....- 124 -
Abbildung 86:	Kategorische Darstellung des relativen Stromverbrauches der In-Situ-Probenahme Module.- 126 -
Abbildung 87:	Analyse der Overlapping-Allan-Deviation von CH ₄ -Daten der Flugmissionen.- 128 -
Abbildung 88:	Auszug der Messkammer-Temperatur bezogen auf die Umgebungstemperatur. Die Daten sind aus dem Datensatz der Fallstudie für simulierte Gasfahnen.....- 131 -
Abbildung 89:	Auszug der einjährigen stationären Messkampagne 2021. Im Vergleich stehen die Luftmessstation West (Referenzmethoden) zum IMB (alternative Methoden), bei inkonsistenten Witterungsverhältnissen.- 131 -
Abbildung 90:	Auszug der einjährigen stationären Messkampagne 2021. Im Vergleich stehen die Luftmessstation West (Referenzmethoden) zum IMB (alternative Methoden), bei inkonsistenten Witterungsverhältnissen.- 133 -
Abbildung 91:	Kohlenstoffdioxidmessung von Versuch 5 der Fallstudie „Quantifizierung simulierter Gasfahnen“.- 134 -
Abbildung 92:	Windgeschwindigkeit vom 01.01.2022 bis zum 01.01.2024.....- 135 -
Abbildung 93:	Amortisation einer UAS-Investition für Probenahme und Transmissionsmessung.....- 144 -

Abbildung 94:	Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 40 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_u	- 168 -
Abbildung 95:	Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 100 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_u	- 169 -
Abbildung 96:	Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 160 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_u	- 170 -
Abbildung 97:	Elektrischer Schaltplan des InfraSampler v1.0.	- 177 -
Abbildung 98:	Elektrischer Schaltplan des InfraSampler v2.0.	- 178 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Messinstrumente des InfraSampler, die während der unterschiedlichen Messeinsätze im Rahmen dieser Doktorarbeit verwendet wurden. Diejenigen Sensorik, welche im InfraSampler v1.0 eingesetzt wurden, sind unter der Dreifachbegrenzung angegeben. Bei der Sensorik dar-über, handelt es sich um den InfraSampler v2.0. Zusätzlich sind für jedes Gerät die Messgröße, das Messprinzip und der Messbereich angegeben.....- 30 -
Tabelle 2:	Kategorienskala zur Bewertung der Geruchsintensität. (Maiwald, 2016)- 41 -
Tabelle 3:	Wärmeübergangskoeffizient für Gase. Die Luftgeschwindigkeit v wird lokal gemessen.....- 49 -
Tabelle 4:	Mögliche Einflüsse auf gesammelte mobile Messdaten.....- 54 -
Tabelle 5:	Maßnahmen zur Vermeidung von atmosphärischen Verdünnungen. ...- 55 -
Tabelle 6:	Typische Auslegungsdaten von Kaminen nach Stripperkolonnen.- 63 -
Tabelle 7:	Technische Daten der verbauten Elemente im InfraSampler v1.0- 64 -
Tabelle 8:	Witterungsverhältnisse an den Probenhametagen. WG = Windgeschwindigkeit, WR = Windrichtung, rH = relative Luftfeuchtigkeit, T = Temperatur.....- 66 -
Tabelle 9:	Verwendete Sensoren des Mikrosystems.....- 69 -
Tabelle 10:	Verwendete Sensoren des Immissionsüberwachungmodul.....- 70 -
Tabelle 11:	Gesamtzeit der Messkampagne mit Start- und Endzeitpunkt der Messintervalle, aller Messsysteme.- 72 -
Tabelle 12:	Verwendetes Material für die Fallstudie. Eine Aufteilung erfolgt aufgrund von Geräten zur Simulierung der Gasfahne und Messgeräten.....- 78 -
Tabelle 13:	Versuchsdaten mit Modulpositionierung.- 80 -
Tabelle 14:	Zusammenfassung der Anzahl der Messungen unterschiedlicher Messstrategien, die mit dem InfraSampler-System durchgeführt wurden. Die einzelnen Messstrategien wurden in Kapitel 5 diskutiert. Unter „Sonstiges“ sind die Transmissionsmessungen durch den IPH, sowie die Flugtests auf dem Deponiegelände Limburg-Offheim aufgeführt.....- 82 -
Tabelle 15:	Durchgeführte Messflüge mit dem InfraSampler v1.0 an den verschiedenen Lokalitäten.....- 87 -
Tabelle 16:	Monitoring über des Windverhaltens im Standort IPH an den Messtagen. Farblich in grün hervorgehoben sind die tatsächlichen Messzeiten, in denen ein UAS-Einsatz stattfand. WR = Windrichtung in $^{\circ}$, WG = Windgeschwindigkeit in m/s, MW = Mittelwert, MAA = mittlere absolute Abweichung.....- 87 -
Tabelle 17:	Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.- 88 -
Tabelle 18:	Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.....- 89 -

Tabelle 19:	Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.- 90 -
Tabelle 20:	Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.....- 91 -
Tabelle 21:	Auszug aus den Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.- 92 -
Tabelle 22:	Auszug aus den Messdaten des Luftdrucks und der Flughöhe mit Start- und Endwert auf Bodenhöhe und Mittelwerten.....- 93 -
Tabelle 23:	Vergleich der Jahresmittelwerte der unterschiedlichen Messsysteme. Die angegebenen Grenzwerte wurden aus der gültigen TA Luft übernommen. Aufgrund der Analysengerätebelegung auf den unterschiedlichen Luftmessstationen, kommt es zu fehlenden Messwerten. Das gilt für die Luftmessstation Süd (Feinstäube) und die Luftmessstation West (CO).- 110 -
Tabelle 24:	Deskriptive Zusammenfassung der Messergebnisse über den Gesamtzeitraum von zwölf Monaten.- 113 -
Tabelle 25:	Anschaffungskosten für ein den Vorgaben entsprechendem UAS.....- 142 -
Tabelle 26:	Herkömmliche olfaktometrische Probenahme.....- 143 -
Tabelle 27:	Drohnenbasierte olfaktometrische Probenahme- 143 -
Tabelle 29:	Bestückung der Luftmessstationen im IPH.- 212 -
Tabelle 30:	Meteorologie im IPH.- 213 -
Tabelle 30:	Messverfahren und Verfahrenskenngrößen der Messstation IPH.- 213 -
Tabelle 31:	Messverfahren und Verfahrenskenngrößen des IMB.....- 213 -
Tabelle 32:	Messverfahren und Verfahrenskenngrößen des Mikrosystems.....- 214 -
Tabelle 34:	Statistische Auswertung der Meteorologie (ohne Windrichtung und Luftfeuchte).....- 214 -

Formelverzeichnis

(1) Advektionsgleichung	- 13 -
(2) molekulare Diffusionsgleichung	- 14 -
(3) turbulente Diffusionsgleichung	- 14 -
(4) ortsunabhängige Diffusionsgleichung	- 14 -
(5) zeitunabhängige Advektions-Diffusionsgleichung	- 14 -
(6) Schubberechnung	- 18 -
(7) Schubberechnung mit induzierter Geschwindigkeit	- 18 -
(8) Bodeneffekt	- 18 -
(9) Impulserhaltungssatz	- 26 -
(10) Flächenberechnung Halbkugel	- 26 -
(11) Luftgeschwindigkeit auf der Kugeloberfläche	- 27 -
(12) Strömungsgleichgewicht am Radius	- 27 -
(13) Abkühlrate	- 48 -
(14) Trapezregel	- 56 -

9 Anhang

9.1 Theoretische Abkühlraten

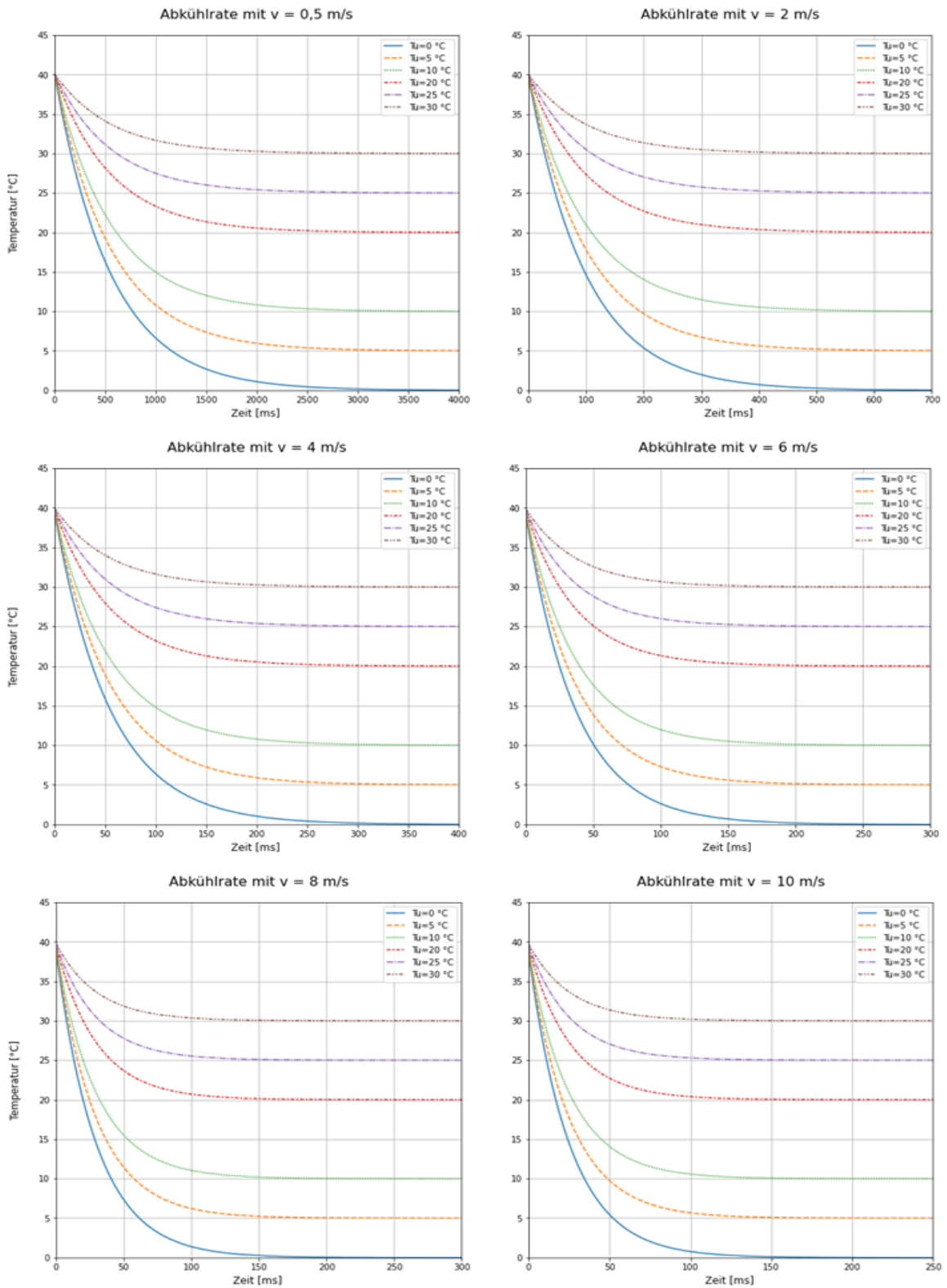


Abbildung 95: Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 40 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_U.

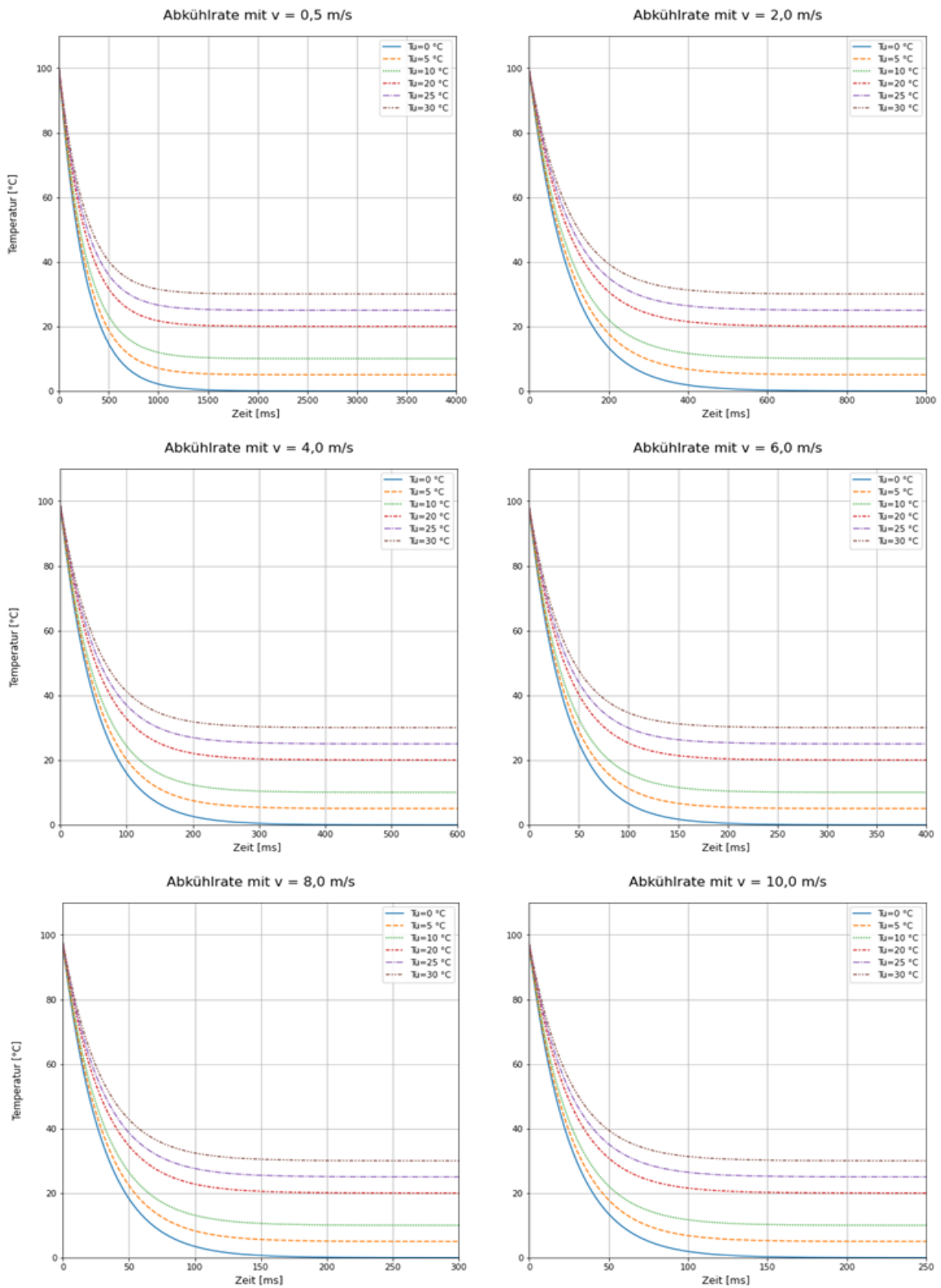


Abbildung 96: Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 100 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_u .

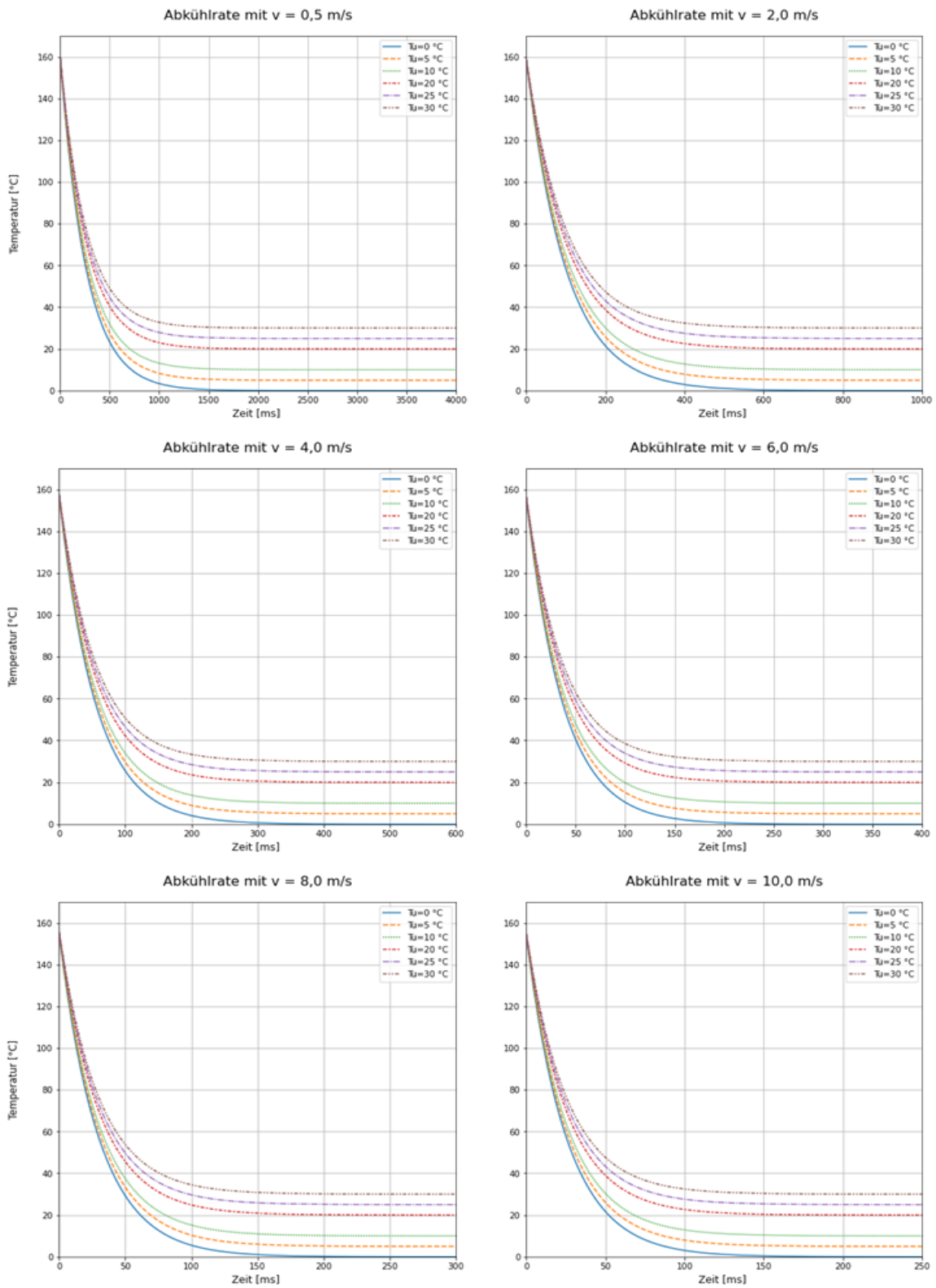
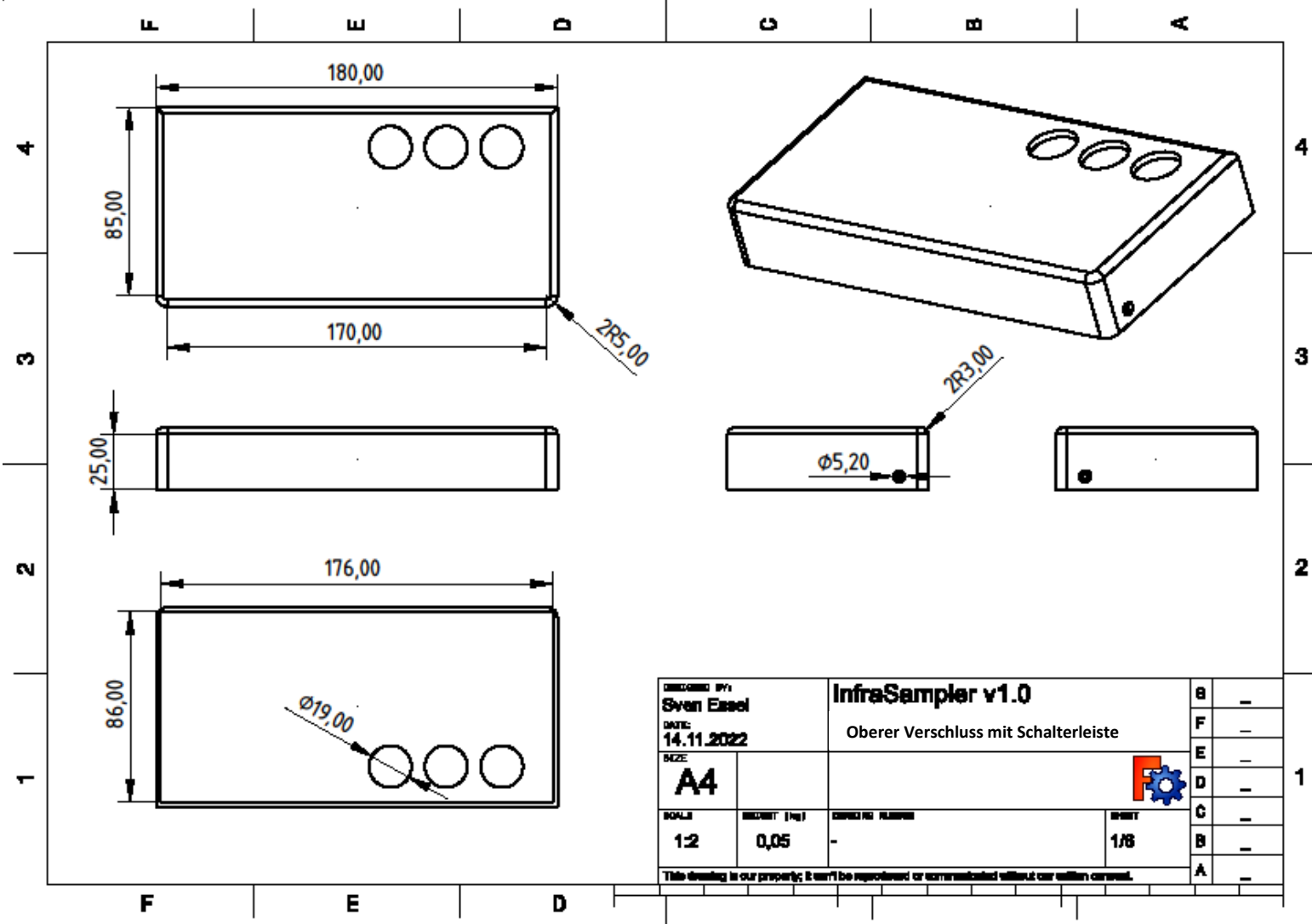
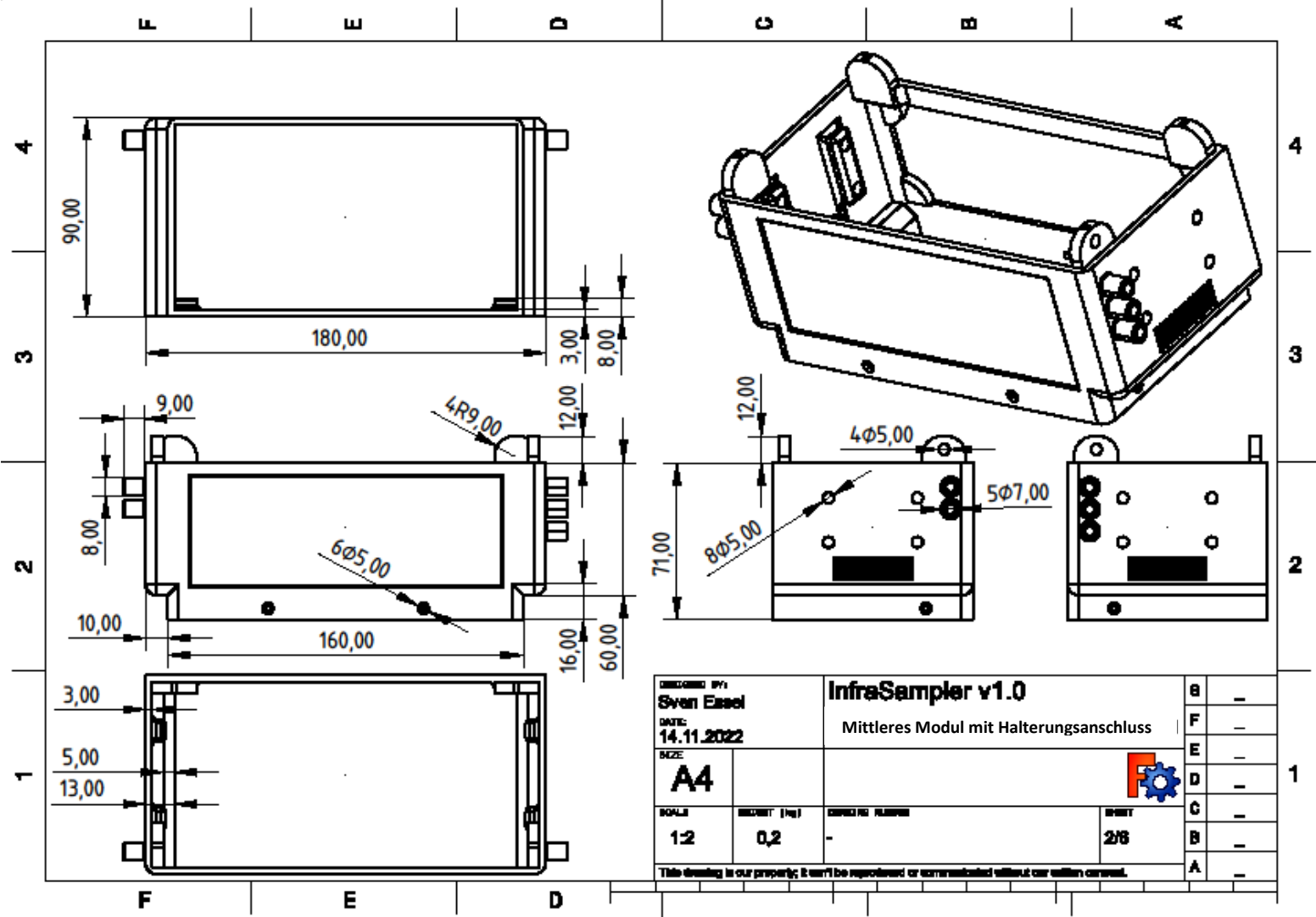


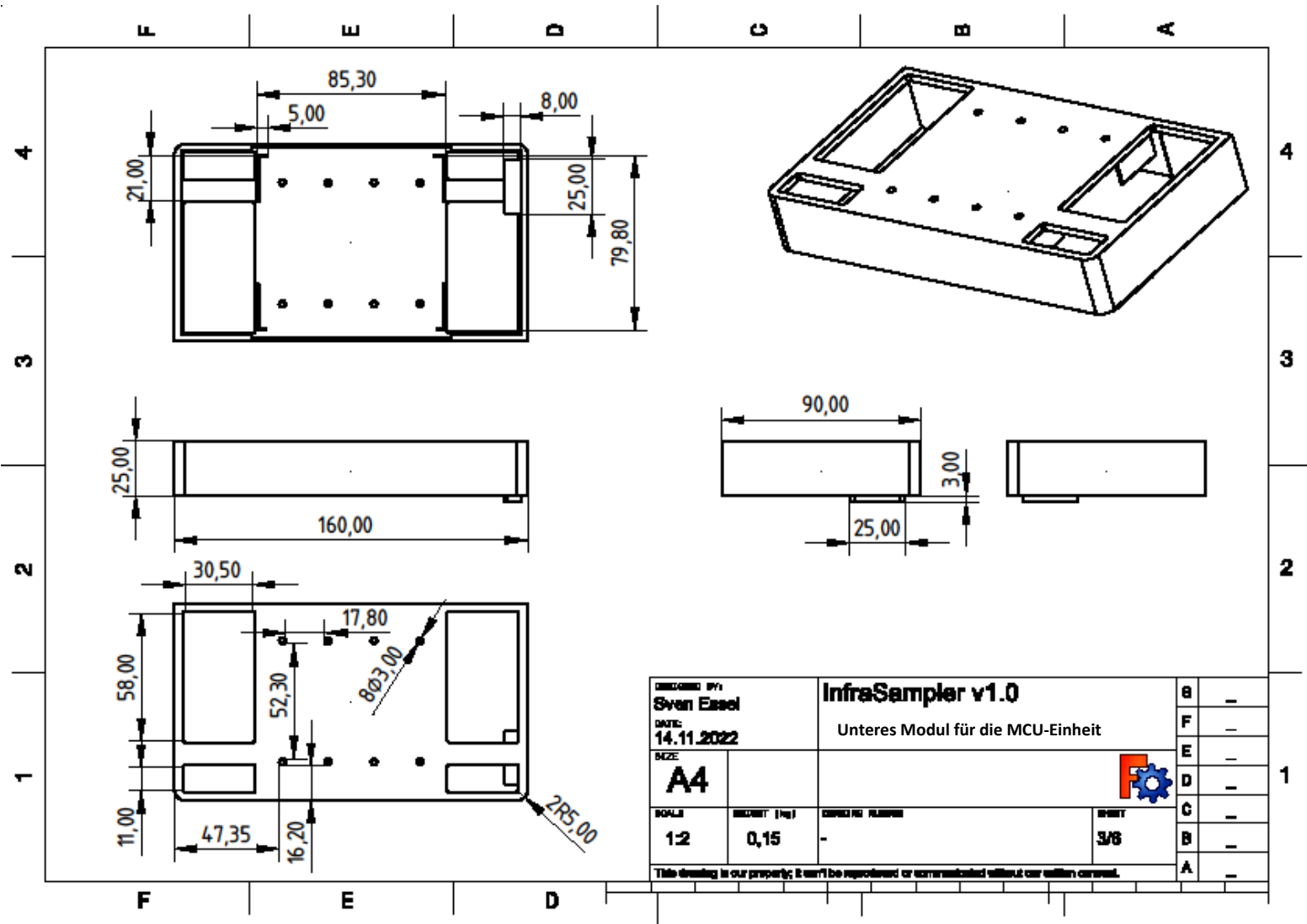
Abbildung 97: Theoretische Abkühlraten von Rauchgas in der Troposphäre mit einer Ausgangstemperatur von 160 °C und variierenden Umgebungstemperaturen T_u .

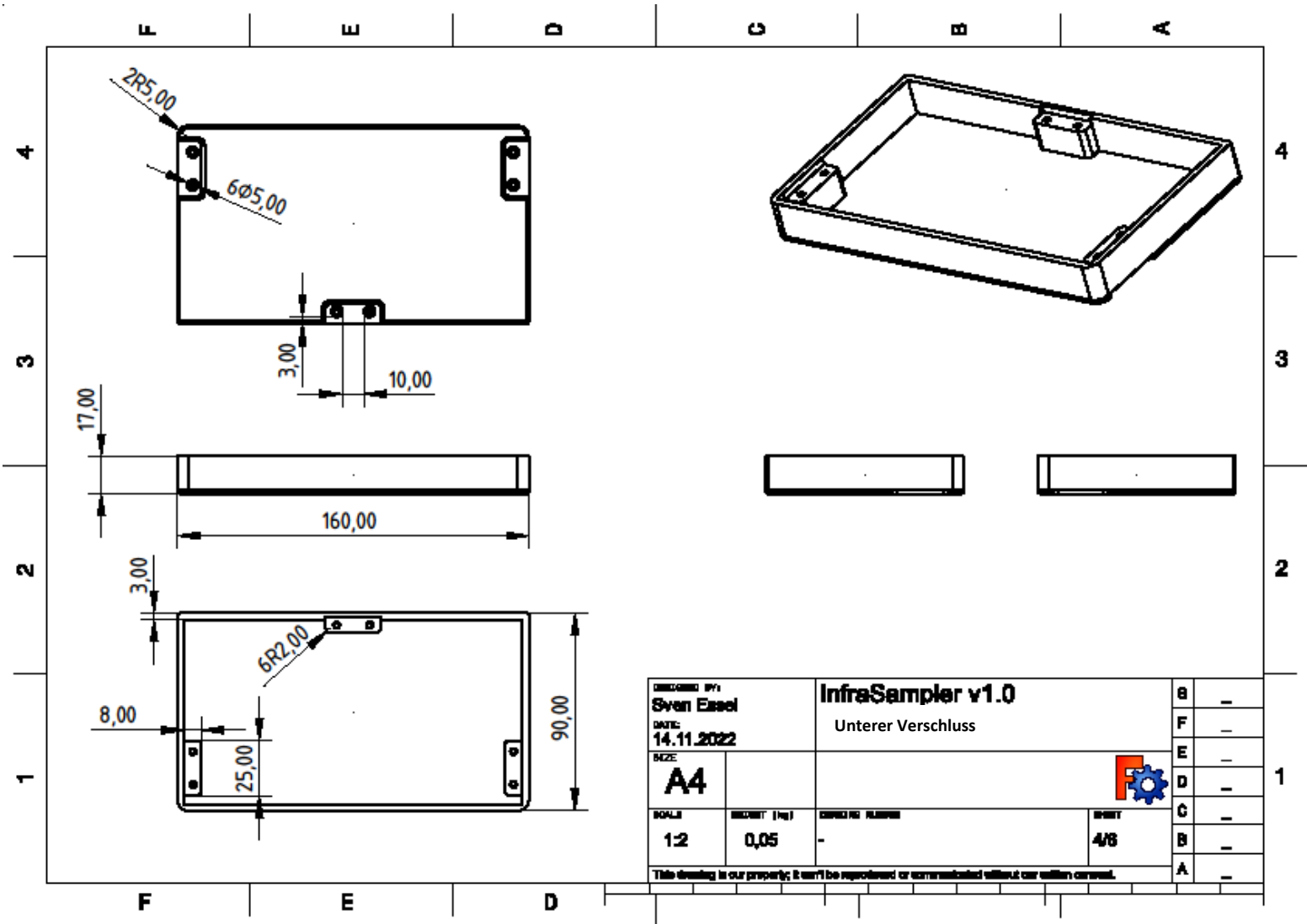
9.2 Technische Zeichnung des Probenahme-Gehäuse (InfraSampler)



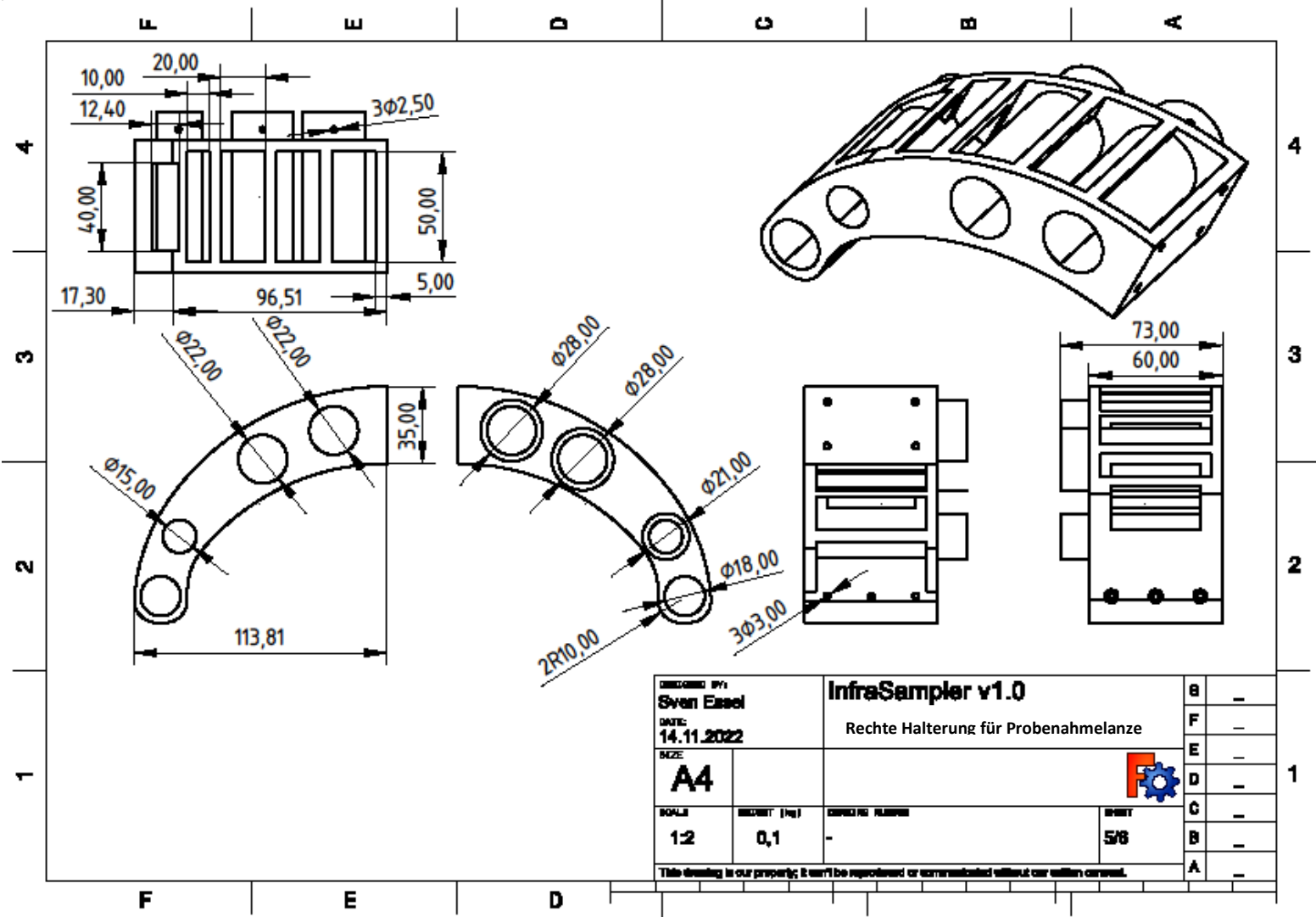


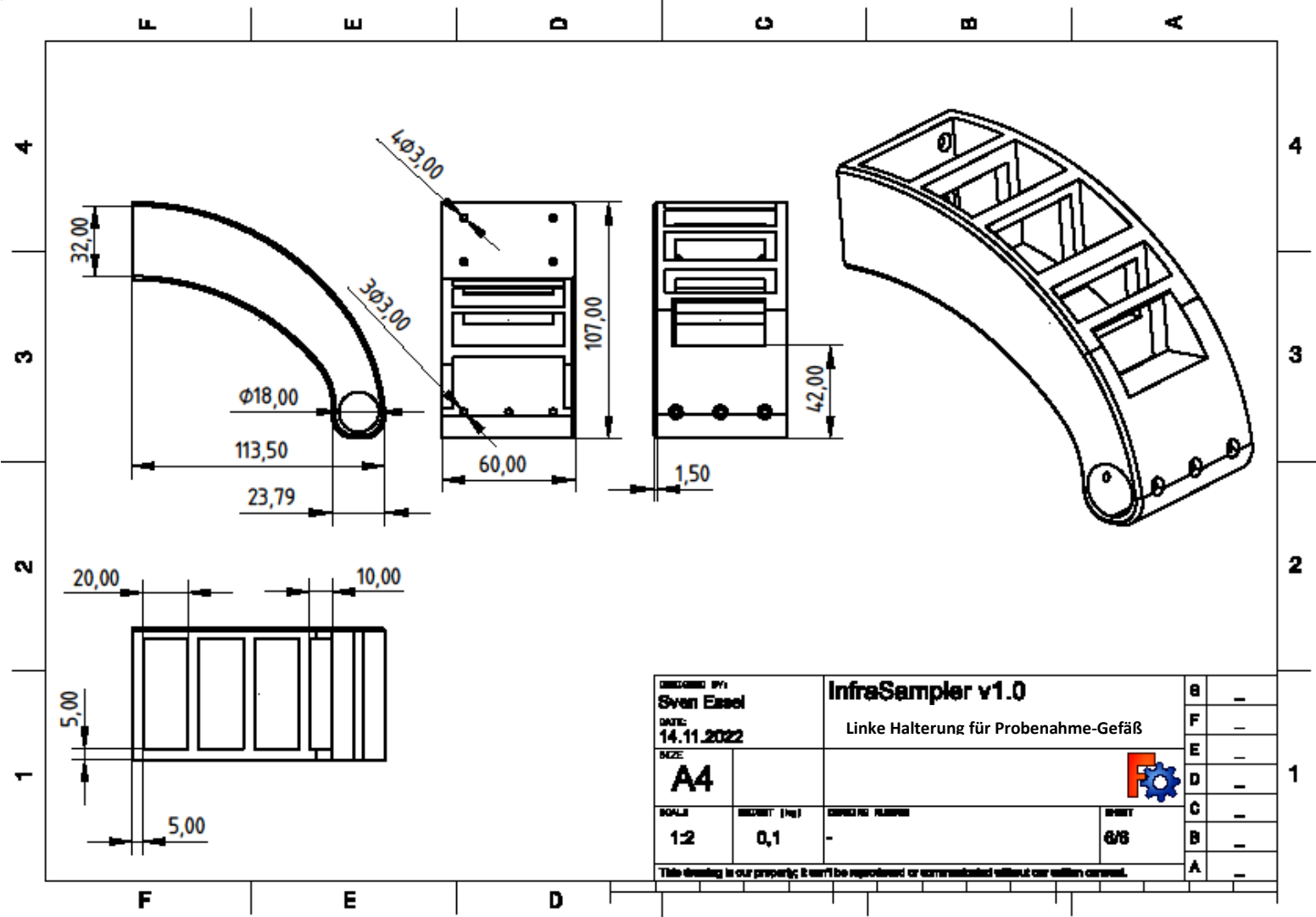
DESIGNED BY: Sven Essel		InfraSampler v1.0		B	-
DATE: 14.11.2022		Mittleres Modul mit Halterungsanschluss		F	-
SIZE: A4				E	-
SCALE: 1:2				DRYNET (14%)	DRYNET NUMBER
0,2				C	-
				B	-
				A	-





DESIGNED BY: Sven Essel		InfraSampler v1.0		B	-
DATE: 14.11.2022		Unterer Verschluss		F	-
SIZE: A4				E	-
SCALE: 1:2				<small>DRIVING NUMBER</small> -	
TOLERANCE (mm): 0,05		SHEET: 4/8		C	-
<small>This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.</small>				B	-
				A	-





9.3 Schaltplan der InfraSampler-Systeme

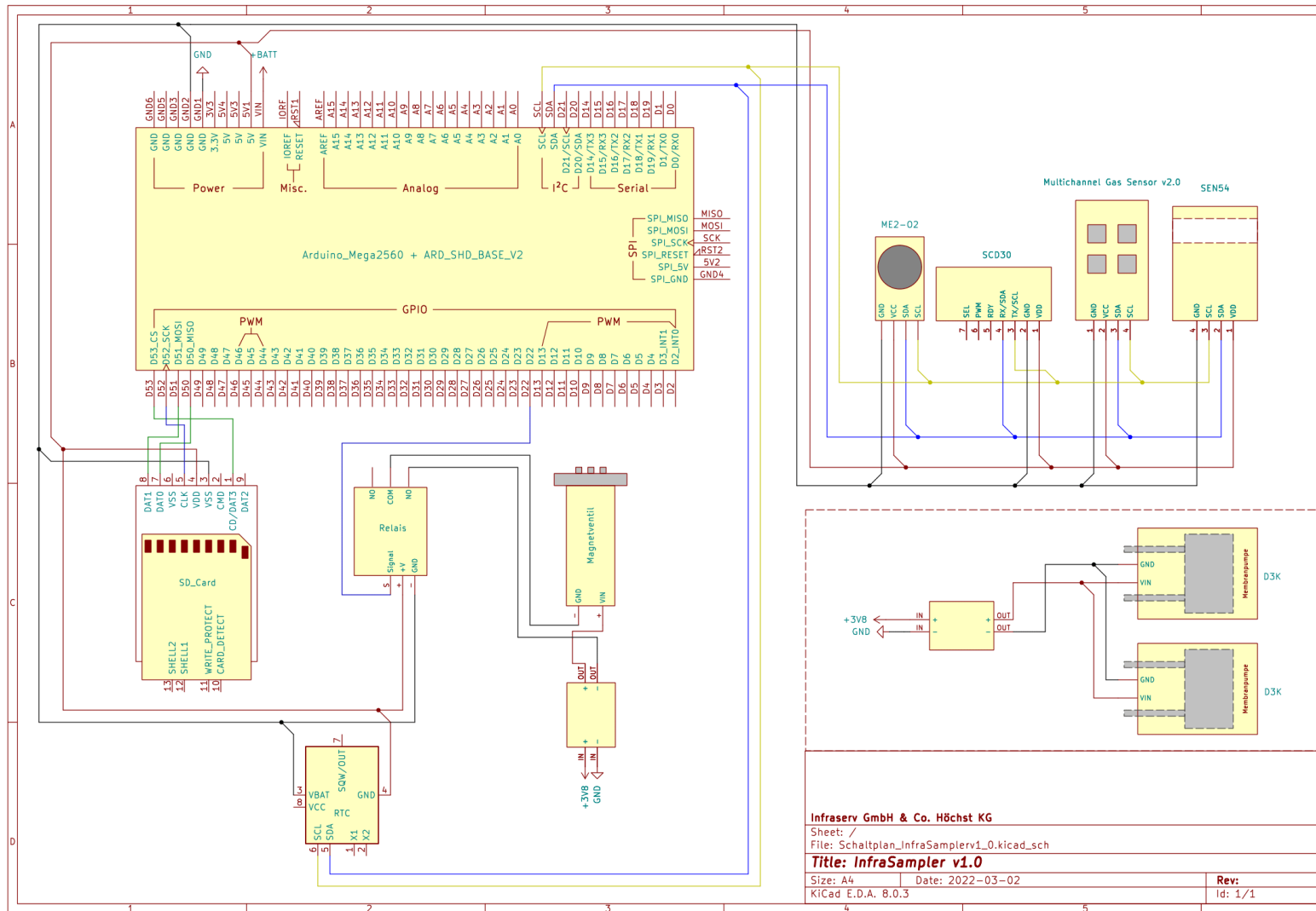


Abbildung 98: Elektrischer Schaltplan des InfraSampler v1.0.

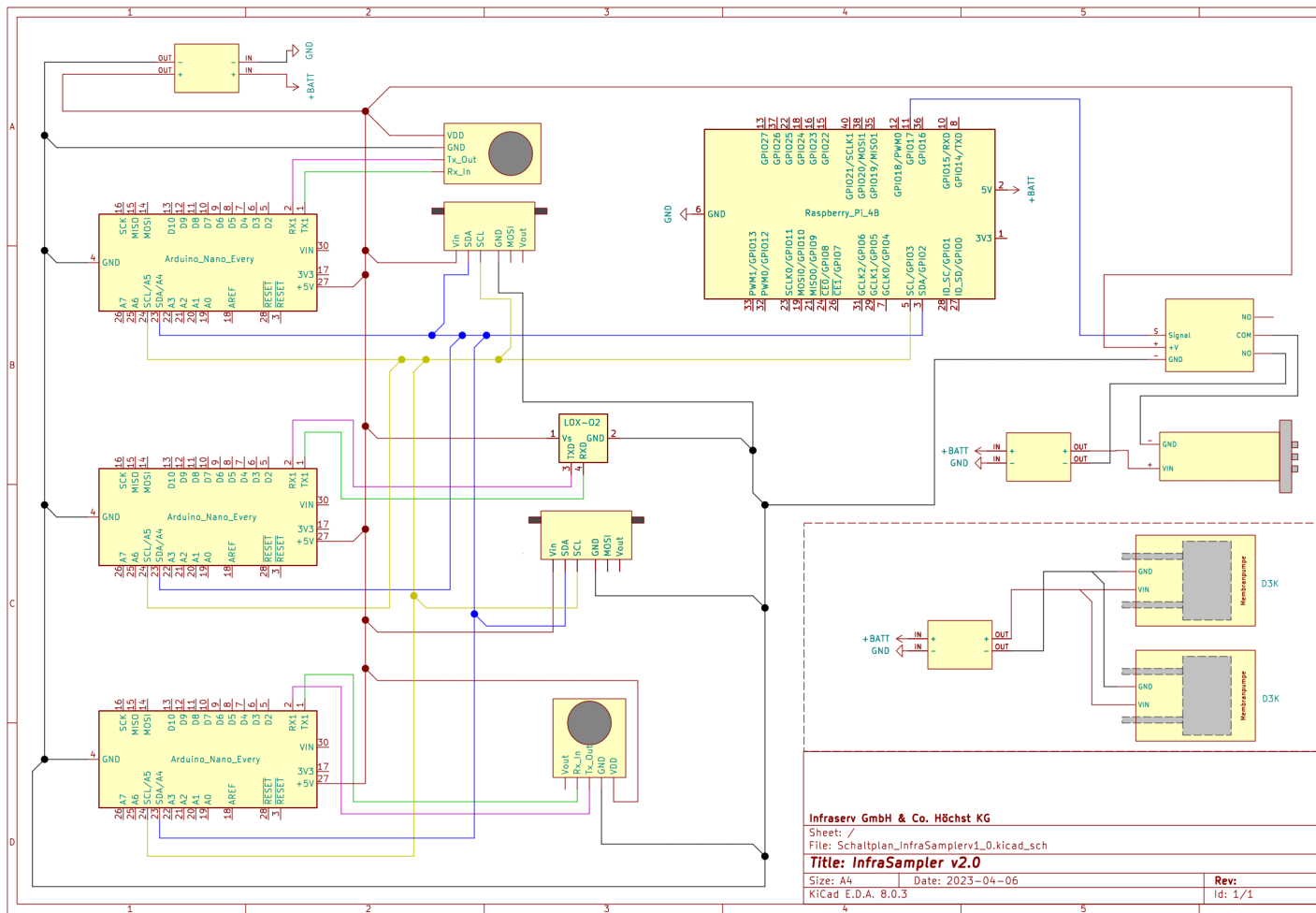


Abbildung 99: Elektrischer Schaltplan des InfraSampler v2.0.

9.4 Programmcode (C++) InfraSampler v1.0

```
1 // Generelle Bibliotheken
2 #include <Arduino.h>
3 #include <Wire.h>
4
5 // ME2-O2-Sensor braucht keine Bibliothek
6
7 // SCD30-CO2-Sensor Bibliothek und Variablen
8 #include "SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h"
9   float co2 =0;
10   float T =0;
11   float rH =0;
12   SCD30 airSensor;
13
14 // SEN54-Feinstaub & VOC Variablen
15   const int16_t SEN54_ADDRESS = 0x69;
16
17 // Multichannel-Sensor Bibliothek und Variablen
18 #include <Multichannel_Gas_GMXXX.h>
19   GAS_GMXXX<TwoWire> gas;
20
21 // SD-Karte Bibliothek
22 #include <SD.h>
23
24 // Echtzeituhr Bibliothek und Variablen
25 #include "RTClib.h"
26 #define DS1307_ADDRESS 0x68
27   RTC_DS1307 rtc;
28
29 // Definition der ersten Zeile
30 #define HEADER "Datum\tZeit\tO2 \%(ME2)\tCO2 ppm(SCD)\tT
31 °C(SCD)\trH \%(SCD)\tPM1.0 µgm2(SEN)\tPM2.5 µgm2(SEN)\tPM4.0
32 µgm2(SEN)\tPM10.0 µgm2(SEN)\tVOC_Index -(SEN)\trH \%(SEN)\tT
33 °C(SEN)\tNO2 ppm(Multi)\tC2H5CH ppm(Multi)\tVOC ppm(Multi)\tCO
34 ppm(Multi)\tMV"
35
36 // Variablen Initialisierung SEN54
37   uint16_t pmlp0, pm2p5, pm4p0, pml0p0;
38   int16_t voc, nox, humidity, temperature;
39   uint8_t data[24], counter;
40
41 // Variablen Initialisierung ME2-O2
42   float Vout =0;
43   const int pinAdc = A0;
44   const float VReferO2 = 3.3;
45
46 // Variablen Initialisierung der SD-Karte
47   int pinCS = 53; //SD-Shield Pin
48   File myFile;
49
50 // Digitaler Pin für das Ventil
51   const int relaisPin = 22;
52
```

```

53 // Definition der „Millis“ für Zeitangaben
54 // speichert die Zeit seit dem letzten Durchgang(Sensorik)
55   unsigned long previousMillis1 = 0 ;
56 // speichert die Zeit seit dem letzten Durchgang(Magnetventil)
57   unsigned long previousMillis2 = 0 ;
58 // Messintervall der Sensorik
59   const unsigned long intervall = 3000 ;
60 // Die Probenahmedauer in der das Relais schaltet
61   const unsigned long interval2 = 360000 ;
62
63 // Variablen für das Magnetventil
64   unsigned long zeitstart = 0;
65   unsigned long zeitende = 0;
66   bool zeitgesetzt = false;
67   bool co2bool = false;
68   bool intervalbool = false;
69   bool ende = 0;
70
71
72 // Funktion zum Auslesen der O2-Spannungswerte
73   float readO2Vout()
74   {
75     long sum = 0;
76     for(int i=0; i<32; i++)
77     {
78       sum += analogRead(pinAdc);
79     }
80
81     sum >>= 5;
82
83     // Berechnung der gemessenen Spannung mit dem Luftdruck
84     float MeasuredVout = sum * (VReferO2 / 1023.0);
85     return MeasuredVout;
86   }
87
88 // Funktion zum Auslesen der O2-Konzentration
89   float readO2Concentration()
90   {
91     // Vout Werte beziehen sich auf 3,3 V
92     float MeasuredVout = readO2Vout();
93
94     //wenn die Ausgangsspannung 2,0 V beträgt
95     float Concentration = (MeasuredVout * 0.21) / 2.0;
96     float Concentration_Percentage=Concentration*100;
97     return Concentration_Percentage;
98   }
99
100 // Initialisierung der Kommunikation und der gesamten Hardware
101 void setup()
102 {
103   Serial.begin(9600);
104   while (!Serial) { ;

```

```

157     myFile = SD.open("SAMPLER.txt", FILE_WRITE);
158
159     if(myFile){
160         Serial.println("Writing to .txt ...");
161         myFile.println(HEADER);
162         myFile.close();
163         //Serial.println("done!");
164     }else{
165         Serial.println("error opening .txt ...");
166     }
167
168     // Initialisierung der Real-Time-Clock
169     if (!rtc.begin()){
170         Serial.println("Couldn't find RTC");
171         Serial.flush();
172         abort();
173     }
174
175     if(!rtc.isrunning()){
176         Serial.println("RTC is not running, let's set the time!");
177         rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
178     }
179     Serial.println(HEADER);
180     delay(1000);
181 }
182
183 // sich wiederholendes Programm
184 void loop()
185 {
186     // Variable und If-Schleife zum starten des Messintervalls
187     unsigned long currentMillisl = millis();
188     if (currentMillisl - previousMillisl >= intervall){
189         previousMillisl = currentMillisl;
190
191         // Öffnen der Messdatei auf der SD-Karte
192         myFile = SD.open("SAMPLER.txt", FILE_WRITE);
193
194         // Einstellung der Zeitangabe
195         DateTime now = rtc.now();
196
197         // Befehl zum Lesen von Messdaten senden (0x03C4)
198         Wire.beginTransmission(SEN54_ADDRESS);
199         Wire.write(0x03);
200         Wire.write(0xC4);
201         Wire.endTransmission();
202
203         // 20 ms warten, damit der Sensor den internen Puffer füllt
204         delay(20);
205
206
207

```

```

260     if(now.minute() < 10) Serial.write('0');
261     Serial.print(now.minute(), DEC);
262     Serial.print(':');
263     if(now.second() < 10) Serial.write('0');
264     Serial.print(now.second(), DEC);
265     Serial.print("\t");
266
267     myFile.print(now.year(), DEC);
268     myFile.print('-');
269     if(now.month() < 10) myFile.print('0');
270     myFile.print(now.month(), DEC);
271     myFile.print('-');
272     if(now.day() < 10) myFile.print('0');
273     myFile.print(now.day(), DEC);
274     myFile.print(" \t");
275     if(now.hour() < 10) myFile.print('0');
276     myFile.print(now.hour(), DEC);
277     myFile.print(':');
278     if(now.minute() < 10) myFile.print('0');
279     myFile.print(now.minute(), DEC);
280     myFile.print(':');
281     if(now.second() < 10) myFile.print('0');
282     myFile.print(now.second(), DEC);
283     myFile.print("\t");
284
285
286     Serial.print(readO2Concentration());
287     Serial.print(" Vol.-%");
288     Serial.print("\t");
289     myFile.print(readO2Concentration());
290     myFile.print("\t");
291
292     // SCD30 Sensor-Auslesung
293     co2 = airSensor.getCO2();
294     T = (airSensor.getTemperature()); //, 1
295     rH = (airSensor.getHumidity());
296
297     Serial.print(co2);
298     Serial.print(" ppm");
299     Serial.print("\t");
300     myFile.print(co2);
301     myFile.print("\t");
302
303     Serial.print(T);
304     Serial.print(" °C");
305     Serial.print("\t");
306     myFile.print(T);
307     myFile.print("\t");
308
309     Serial.print(rH);
310     Serial.print(" %");
311     Serial.print("\t");

```

```

208 // Einordnen der erhaltenen Bits auf die unterschiedlichen
209 Parameter
210 pmlp0 = (uint16_t)data[0] << 8 | data[1];
211 pm2p5 = (uint16_t)data[3] << 8 | data[4];
212 pm4p0 = (uint16_t)data[6] << 8 | data[7];
213 pml0p0 = (uint16_t)data[9] << 8 | data[10];
214 humidity = (uint16_t)data[12] << 8 | data[13];
215 temperature = (uint16_t)data[15] << 8 | data[16];
216 voc = (uint16_t)data[18] << 8 | data[19];
217 nox = (uint16_t)data[21] << 8 | data[22];
218
219 // Messdaten von SEN55 lesen, nach zwei Bytes folgt ein CRC
220 Wire.requestFrom(SEN54_ADDRESS, 24);
221 counter = 0;
222
223 while (Wire.available()) {
224     data[counter++] = Wire.read();
225 }
226
227 // Starten der vorher erstellten O2-Funktion
228 Vout = readO2Vout();
229
230 // Auslesen der Parameterdaten vom Multichannel-Sensor
231 // GM102B NO2 Sensor
232 int valNO2 = gas.getGM102B();
233 if (valNO2 > 999) valNO2 = 999;
234 // GM302B C2H5CH Sensor
235 int valC2H5CH = gas.getGM302B();
236 if (valC2H5CH > 999) valC2H5CH = 999;
237 // GM502B VOC Sensor
238 int valVOC = gas.getGM502B();
239 if (valVOC > 999) valVOC = 999;
240 // GM702B CO Sensor
241 int valCO = gas.getGM702B();
242 if (valCO > 999) valCO = 999;
243
244 // Serielle Darstellung der gelesenen Werte über
245 „Serial.print()“ und Speicherung der Werte auf die SD-Karte
246 über „myFile.print()“
247 if (airSensor.dataAvailable())
248 {
249     Serial.print(now.year(), DEC);
250     Serial.print('-');
251     if(now.month() < 10) Serial.write('0');
252     Serial.print(now.month(), DEC);
253     Serial.print('-');
254     if(now.day() < 10) Serial.write('0');
255     Serial.print(now.day(), DEC);
256     Serial.print(" \t");
257     if(now.hour() < 10) Serial.write('0');
258     Serial.print(now.hour(), DEC);
259     Serial.print(':');

```

```

364     Serial.print (valC2H5CH);
365     Serial.print (" ppm");
366     Serial.print ("\t");
367     myFile.print (valC2H5CH);
368     myFile.print ("\t");
369
370     Serial.print (valVOC);
371     Serial.print (" ppm");
372     Serial.print ("\t");
373     myFile.print (valVOC);
374     myFile.print ("\t");
375
376     Serial.print (valCO);
377     Serial.print (" ppm");
378     Serial.print ("\t");
379     myFile.print (valCO);
380     myFile.print ("\t");
381
382     Serial.print (zeitgesetzt);
383     Serial.print ("\t");
384     myFile.print (zeitgesetzt);
385     myFile.print ("\t");
386
387     Serial.println();
388     myFile.println();
389 }
390
391 myFile.close();
392
393 // Programmcode zur Schaltung der Probenahme
394 unsigned long currentMillis2 = millis();
395 int co2Value = co2;
396
397 if (co2Value>2000){
398     // Relais-Schaltung bei Erkennen von 2000 ppm (Indikator)
399     co2bool = true;
400 }
401 else{
402     co2bool = false;
403 }
404
405 if (currentMillis2 - previousMillis2 >= interval2){
406     intervalbool = true;
407 }
408 else{
409     intervalbool = false;
410 }
411
412 if (intervalbool and zeitgesetzt){
413     // das Relais wird abgeschaltet und bleibt abgeschaltet
414     digitalWrite(relaisPin, LOW);
415     previousMillis2 = 0;

```

```

312     myFile.print(rH);
313     myFile.print("\t");
314
315     Serial.print(String(float(pm1p0) / 10));
316     Serial.print(" ug/m³");
317     Serial.print("\t");
318     myFile.print(String(float(pm1p0) / 10));
319     myFile.print("\t");
320
321     Serial.print(String(float(pm2p5) / 10));
322     Serial.print(" ug/m³");
323     Serial.print("\t");
324     myFile.print(String(float(pm2p5) / 10));
325     myFile.print("\t");
326
327     Serial.print(String(float(pm4p0) / 10));
328     Serial.print(" ug/m³");
329     Serial.print("\t");
330     myFile.print(String(float(pm4p0) / 10));
331     myFile.print("\t");
332
333     Serial.print(String(float(pm10p0) / 10));
334     Serial.print(" ug/m³");
335     Serial.print("\t");
336     myFile.print(String(float(pm10p0) / 10));
337     myFile.print("\t");
338
339     Serial.print(String(float(voc) / 10));
340     Serial.print(" -");
341     Serial.print("\t");
342     myFile.print(String(float(voc) / 10));
343     myFile.print("\t");
344
345     Serial.print(String(float(humidity) / 100));
346     Serial.print(" %");
347     Serial.print("\t");
348     myFile.print(String(float(humidity) / 100));
349     myFile.print("\t");
350
351     Serial.print(String(float(temperature) / 200));
352     Serial.print(" °C");
353     Serial.print("\t");
354     myFile.print(String(float(temperature) / 200));
355     myFile.print("\t");
356
357     Serial.print(valNO2);
358     Serial.print(" ppm");
359     Serial.print("\t");
360     myFile.print(valNO2);
361     myFile.print("\t");
362
363

```

```
416     ende = true;
417     zeitgesetzt = false;
418 }
419
420 if (ende){
421     goto end;
422 }
423
424 if (co2bool and !zeitgesetzt){
425     // Das Relais für das Magnetventil wird bei Erreichen der
426     vorgegebenen Werte eingeschaltet
427     digitalWrite(relaisPin, HIGH);
428     previousMillis2 = currentMillis2;
429     zeitgesetzt = true;
430 }
431
432 end:
433 if(!co2bool){
434     ende = false;
435 }
436 }
437 }
438 }
439
```

9.5 Programmcode (C++) InfraSampler v2.0

Der Programmcode des InfraSampler v2.0 ist in drei Codes aufgeteilt (V3-1 bis V3-3), da drei einzelnen Mikro-MCU verbaut sind, welche mit dem Raspberry Pi 4B kommunizieren.

```
1 // Arduino Nano V3 - 1
2 // Generelle Bibliotheken
3 #include <Wire.h>
4 #include "Arduino.h"
5 #include "cosir.h"
6
7 // Definition der I2C-Adresse, sowie Digital-Pin
8 #define FS2012 A2
9 #define Nano_Address 0x8
10
11 // UART-Kommunikation-Schnittstelle RX, TX
12 COSIR csr(&Serial);
13
14 // Definition der Variablen
15 uint32_t F_CO2 = 0; // CO2 FILTERED
16 uint32_t R_CO2 = 0; // CO2 RAW
17 uint32_t tmp = 0; // zeitlicher Puffer
18 uint8_t field = 0; // welches Feld geparkt wird
19 uint32_t lastPrint = 0; // Die Felder für den letzten Zeitpunkt werden
20 // angeseigt
21
22 const byte numChars = 43;
23 char receivedChars[numChars];
24
25 // temporäres Array zur Verwendung beim Parsen
26 char tempChars[numChars];
27 char buffer[20] = {0};
28 int c = 0;
29 float carbondioxide = 0.0; // Variablen zur Aufnahme der geparkten Daten
30 float flowrate = 0.0;
31 boolean newData = false;
32 unsigned long currentMillis = 0;
33 unsigned long previousReadCarbSenMillis = 0;
34 const long ReadCarbSenInterval = 1000;
35
36 // Festlegen der Bytes zum Senden an den „Main-MCU“
37 union data_u
38 {
39     struct
40     {
41         float carbondioxide;
42         float Flow;
43     };
44     byte bytes[4];
45 };
46
47 data_u data;
48
49
50 // Initialisierung der Kommunikation und der gesamten Hardware
51 void setup() {
52     Serial.begin(9600);
53     csr.init();
54
55     Wire.begin(Nano_Address);
56     pinMode(FS2012, INPUT_PULLUP);
57
58     csr.setOperatingMode(CZR_POLLING);
59 }
60
61
62
63
```

```

1 // Arduino Nano V3 - 2
2 // Generelle Bibliotheken
3 #include <Wire.h>
4 #include <Arduino.h>
5
6 // Definition der I2C-Adresse, sowie Digital-Pin
7 #define FS2012_A2
8 #define Nano_Address 0x9
9
10 // Definition der Variablen
11 const byte numChars = 43;
12 char receivedChars[numChars];
13
14 // temporäres Array zur Verwendung beim Parsen
15 char tempChars[numChars];
16 float oxygen = 0.0; // Variablen zur Aufnahme der geparsten Daten
17 float temperature = 0.0;
18 int pressure = 0;
19 float oxypercent = 0.0;
20 float flowrate = 0.0;
21 boolean newData = false;
22 unsigned long currentMillis = 0;
23 unsigned long previousReadOxySenMillis = 0;
24 const long ReadOxySenInterval = 1000;
25
26 // Festlegen der Bytes zum Senden an den „Main-MCU“
27 union data_u
28 {
29     struct
30     {
31         float oxygen;
32         float temperature;
33         float pressure;
34         float oxypercent;
35         float Flow;
36     };
37     byte bytes[10];
38 };
39
40 data_u data;
41
42 // Initialisierung der Kommunikation und der gesamten Hardware
43 void setup() {
44     Serial.begin(9600);
45
46     Wire.begin(Nano_Address);
47
48     pinMode(FS2012, INPUT_PULLUP);
49     //pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
50 }
51
52 // sich wiederholendes Programm
53 void loop() {
54     currentMillis = millis(); // den letzten Wert von millis() erfassen
55     updateReadOxySen();
56     Wire.onRequest(sendData); // Funktion sendData() ausführen
57 }
58
59
60
61
62
63

```

```

64 // sich wiederholendes Programm
65 void loop() {
66     currentMillis = millis(); // den letzten Wert von millis() erfassen
67     Wire.onRequest(sendData); // Funktion sendData() ausführen
68 }
69 }
70 // Funktion um Daten an den „Main-MCU“ zu senden
71 void sendData()
72 {
73     if (Serial.available())
74     {
75         char c = Serial.read();
76         switch (c)
77         {
78             case 'Z': // gefilterte CO2-Werte
79                 field = 'Z';
80                 break;
81             case 's': // rohe CO2-Werte
82                 field = 's';
83                 break;
84             case '0' ... '9':
85                 tmp *= 10;
86                 tmp += c - '0';
87                 break;
88             case '\n':
89                 if (tmp > 0 && field == 'Z') F_CO2 = tmp;
90                 if (tmp > 0 && field == 's') R_CO2 = tmp;
91                 tmp = 0;
92                 break;
93             default:
94                 break;
95         }
96     }
97     if (millis() - lastPrint > 500)
98     {
99         lastPrint += 500;
100         uint32_t c = csr.CO2();
101         float carbondioxide = c * 0.01;
102
103         // Berechnung der Flussrate
104         float OFF = 0.045;
105         int val = analogRead(FS2012);
106         float U = 0.0049 * val;
107         flowrate = (0.4 * (U - OFF));
108
109         data.carbondioxide = carbondioxide;
110         data.Flow = flowrate;
111
112         Wire.write(data.bytes, sizeof(data));
113     }
114 }
115 }
116 }
117 }
118 }
119 }
120 }

```

```

127
128 // Auslesen des O2-Wertes und Übergabe der Daten a parseData()
129 void updateReadOxySen() {
130     if (currentMillis - previousReadOxySenMillis >= ReadOxySenInterval) {
131
132         // die Zeit ist um, also lesen Sie neu
133         recvWithStartEndMarkersO2();
134         if (newData == true) {
135             strcpy(tempChars, receivedChars);
136             // diese temporäre Kopie schützt die Originaldaten
137             // weil strtok() in parseData() rersetzt die Kommas mit \0
138             parseData();
139             newData = false;
140         }
141         // Sichern der Wechselzeit
142         previousReadOxySenMillis += ReadOxySenInterval;
143     }
144 }
145
146 // Funktion um Daten an den „Main-MCU“ zu senden
147 void sendData() {
148     data.oxygen = oxygen;
149     data.temperature = temperature;
150     data.pressure = pressure;
151     data.oxypercent = oxypercent;
152     data.Flow = flowrate;
153
154     Wire.write(data.bytes, sizeof(data));
155 }
156

```

```

1 // Arduino Nano V3 - 3
2 // Generelle Bibliotheken
3 #include <Wire.h>
4 #include <Arduino.h>
5
6 // Definition der I2C-Adresse, sowie Digital-Pin
7 #define CH4_Address A2
8 #define Nano_Address 0x10
9
10 // Definition der Variablen
11 boolean newData = false;
12 int U = 0;
13 unsigned long currentMillis = 0;
14
15 // Festlegen der Bytes zum Senden an den „Main-MCU“
16 union data_u
17 {
18     struct
19     {
20         float methane;
21     };
22     byte bytes[4];
23 };
24
25     data_u data;
26
27
28 // Initialisierung der Kommunikation und der gesamten Hardware
29 void setup() {
30     Serial.begin(9600);
31
32     Wire.begin(Nano_Address);
33
34     pinMode(CH4_Address, INPUT_PULLUP);
35     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
36 }
37
38 // sich wiederholendes Programm
39 void loop() {
40     currentMillis = millis(); // capture the latest value of millis()
41     Wire.onRequest(sendData);
42 }
43
44
45 // Funktion um Daten an den „Main-MCU“ zu senden
46 void sendData() {
47
48     U = analogRead(CH4_Address);
49
50     if(U < 400)
51     {
52         U = 403;
53     }
54
55     float methane = ((0.0031 * U) - 1.25);
56     data.methane = methane;
57     Wire.write(data.bytes, sizeof(data));
58 }
59

```

9.6 Programmcode (Python) InfraSampler v2.0

Der Python-Code des InfraSampler v2.0 besteht aus dem Programm für den Sensordaten-Empfänger, ein Programm für den Sensordaten-Sender und einem dritten lokalen Programm für die Benutzeroberfläche.

Sensordaten-Empfänger

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Mon Jul 17 08:38:49 2023
4 @author: Sven Essel
5 """
6 import sys
7 import time
8 import json
9 import logging
10 import csv
11 from datetime import datetime
12 import paho.mqtt.client as mqtt
13 from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow, QVBoxLayout, QWidget,
14 QLabel, QPushButton, QHBoxLayout, QFileDialog, QGridLayout, QGroupBox, QFrame
15 from PyQt5.QtCore import QTimer, pyqtSignal, QObject, QThread, QApplication, Qt
16 from PyQt5.QtGui import QColor
17 import pyqtgraph as pg
18 import numpy as np
19
20 # Konfigurationseinstellungen (hier aus Datensicherheit nicht angegeben)
21 IOT_CORE_ENDPOINT = "XXXXX"
22 CA_CERT = "XXXXX"
23 CLIENT_CERT = "XXXXX"
24 CLIENT_KEY = "XXXXX"
25 MQTT_TOPIC_RECEIVE = "XXXXX"
26 MQTT_CLIENT_ID = "XXXXX"
27
28 logger = logging.getLogger(__name__)
29
30 class MQTTThread(QObject):
31     new_data_received = pyqtSignal()
32
33     def __init__(self):
34         super().__init__()
35
36     def run(self):
37         client = mqtt.Client(
38             client_id=MQTT_CLIENT_ID,
39             clean_session=False
40         )
41         client.tls_set(ca_certs=CA_CERT, certfile=CLIENT_CERT, keyfile=CLIENT_KEY)
42         client.on_connect = self.on_connect
43         client.on_message = self.on_message
44
45         client.connect(IOT_CORE_ENDPOINT, port=8883, keepalive=60)
46
47         client.loop_forever()
48
49
```

```

50 def on_connect(self, client, userdata, flags, rc):
51     client.subscribe(MQTT_TOPIC_RECEIVE)
52
53 def on_message(self, client, userdata, msg):
54     payload = msg.payload.decode("utf-8")
55     try:
56         data = json.loads(payload)
57
58         # Kontrolliere, ob der 'timestamp' Schlüssel in den ankommenden Daten existiert
59         if 'timestamp' in data:
60             timestamp_value = data['timestamp']
61         else:
62             timestamp_value = int(time.time())
63
64         for sensor, value in data.items():
65             if sensor in sensor_data:
66                 sensor_data[sensor]['timestamps'].append(timestamp_value)
67                 sensor_data[sensor]['values'].append(value)
68
69         self.new_data_received.emit()
70     except json.JSONDecodeError as e:
71         logger.error(f"Failed to decode data: {payload}, Error: {e}")
72
73 class CustomMainWindow(QMainWindow):
74     def __init__(self):
75         super().__init__()
76         self.setup_ui()
77
78     def setup_ui(self):
79
80         self.setWindowTitle("Sensor Data Plot")
81         self.setWindowState(Qt.WindowMaximized) # Set the initial window state to maximized
82
83         background_stylesheet = f"background-image: url('C:/Users/XXXX/RaspberryPi
84 InfraSampler/Bild1.png'); background-repeat: no-repeat; background-attachment: fixed;
85 background-position: top left;"
86         self.setStyleSheet(background_stylesheet)
87
88         # Button Style
89         button_style = "QPushButton { background-color: #2c3e50; color: white; padding: 8px;
90 border: none;}"
91
92         # Ein Fenster zum Daten plotten kreieren
93         self.sensor_plotter = SensorDataPlotter(sensor_data)
94         self.setCentralWidget(self.sensor_plotter)
95
96         # Buttons der Hauptseite hinzufügen
97         self.save_button = QPushButton("Save Data")
98         self.save_button.setStyleSheet(button_style)

```

```

99     self.close_button = QPushButton("Close")
100     self.close_button.setStyleSheet(button_style)
101
102     # Button verbinden
103     self.save_button.clicked.connect(self.save_data)
104     self.close_button.clicked.connect(self.close)
105
106     # Horizontales Layout erzeugen
107     button_layout = QHBoxLayout()
108     button_layout.addWidget(self.save_button)
109     button_layout.addWidget(self.close_button)
110
111     # Ein „main widget“ kreieren für die Sensordaten-Plotter und Buttons
112     main_widget = QWidget()
113     main_layout = QVBoxLayout(main_widget)
114     main_layout.addWidget(self.sensor_plotter)
115     main_layout.addLayout(button_layout) # Add the button layout to the main layout
116
117     # Festlegen des „main widget“ als „central widget“ von der Hauptseite
118     self.setCentralWidget(main_widget)
119
120     def save_data(self):
121         # Datenpfad zur Speicherung festlegen
122         options = QFileDialog.Options()
123         file_path, _ = QFileDialog.getSaveFileName(self, "Save Data", "", "CSV Files
124 (*.csv);;Text Files (*.txt)", options=options)
125
126         if file_path:
127             # Daten speichern
128             data_to_save = []
129             headers = ["Timestamp"] + list(sensor_data.keys()) # Prepare the header row
130
131             # Daten-Titel hinzufügen
132             data_to_save.append(headers)
133
134             # Transponiere die Werte für eine Tabelle
135             transposed_data = list(zip(*[data["values"] for data in sensor_data.values()]))
136
137             # Kombinieren der „Timestamps“
138             for ts, values in zip(sensor_data["CO2"]["timestamps"], transposed_data):
139                 data_to_save.append([ts] + list(values))
140
141             # Speichere die Daten am ausgesuchten Speicherort
142             with open(file_path, "w", newline="") as csvfile:
143                 csv_writer = csv.writer(csvfile)
144                 csv_writer.writerows(data_to_save)
145
146
147

```

```

148     def closeEvent(self, event):
149         # Stoppen der Update-Zeit für den
150         self.sensor_plotter.update_timer.stop()
151
152         # Beenden der Applikation
153         QApplication.instance().quit()
154
155     class SensorDataPlotter(QWidget):
156     def __init__(self, sensor_data):
157         super().__init__()
158         self.sensor_data = sensor_data
159         self.setup_ui()
160         self.set_default_y_ranges()
161
162     def setup_ui(self):
163         layout = QGridLayout(self) # Use a grid layout for better organization
164
165         self.plot_widgets = []
166         self.labels = [] # List to store label widgets for each plot
167
168         # Definieren Sie die Anzahl der Spalten für das Gitter
169         num_columns = 2
170
171         row = 0
172         col = 0
173
174         for sensor, data in self.sensor_data.items():
175
176             # Erstellen Sie einen Gruppenrahmen, der jedes Diagramm und jeden Titel enthält.
177             group_box = QGroupBox()
178             group_layout = QVBoxLayout(group_box)
179
180             # Legen Sie eine Hintergrundfarbe für den Rahmen fest (replace '#F0F0F0' with your
181             # desired color)
182             group_color = QColor(240, 240, 240, 150) # Hellgrau mit etwas Transparenz
183             group_box.setStyleSheet(f"QGroupBox {{ background-color: {group_color.name()};
184             }}")
185
186             # Erstellen Sie einen Rahmen für das Titellabel
187             title_frame = QFrame()
188             title_frame setFrameStyle(QFrame.WinPanel | QFrame.Raised)
189             title_frame_color = QColor(236, 240, 241) # Etwas heller als die Gruppenfarbe
190             title_frame.setStyleSheet(f"QFrame {{ background-color: {title_frame_color.name()};
191             }}")
192             title_frame_layout = QVBoxLayout(title_frame)
193
194             # Erstellen Sie ein Etikett für den Titel und legen Sie seine Eigenschaften fest
195             title_label = QLabel(sensor)
196             title_label.setStyleSheet("font-weight: bold; font-size: 16px; color: #FFFFFF;")

```

```

197     title_label.setAlignment(Qt.AlignTop | Qt.AlignLeft) # Den Titel ausrichten
198     title_frame_layout.addWidget(title_label)
199
200     # Fügen Sie den Titelrahmen zum Gruppenlayout hinzu.
201     group_layout.addWidget(title_frame)
202
203     plot_widget = pg.PlotWidget()
204     group_layout.addWidget(plot_widget)
205
206     # Das Erscheinungsbild des Plots einrichten
207     plot_widget.setBackground('w') # Set white background color
208     plot_widget.showGrid(x=True, y=True, alpha=0.5) # Light gray grid lines
209     plot_widget.getAxis('left').setLabel(data["label"]) # Set y-axis title
210     plot_widget.getAxis('bottom').setLabel("Time") # Set x-axis title
211
212     # Speichern des Plot-Widgets
213     self.plot_widgets.append(plot_widget)
214
215     # Fügen Sie den Gruppenrahmen zum Hauptlayout hinzu.
216     layout.addWidget(group_box, row, col)
217
218     # Weiter zur nächsten Spalte
219     col += 1
220
221     # Wird die angegebene Anzahl von Spalten erreicht, Wechsel in die nächste Zeile
222     if col == num_columns:
223         col = 0
224         row += 1
225
226     def set_default_y_ranges(self):
227         for idx, (sensor, data) in enumerate(self.sensor_data.items()):
228             plt = self.plot_widgets[idx]
229             if sensor == "CO2":
230                 plt.setYRange(0, 105) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 100 Vol.-%
231             elif sensor == "O2":
232                 plt.setYRange(0, 26) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 25 Vol.-%
233             elif sensor == "CH4":
234                 plt.setYRange(0, 6) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 5 Vol.-%
235             elif sensor == "v1":
236                 plt.setYRange(0, 4) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 3 l/s
237             elif sensor == "v2":
238                 plt.setYRange(0, 4) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 3 l/s
239             elif sensor == "T":
240                 plt.setYRange(0, 165) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 160 °C
241             elif sensor == "p":
242                 plt.setYRange(0, 1055) # Standardbereich der y-Achse festlegen 0 bis 1050 mbar
243
244
245

```

```

246 def update_plot(self):
247
248     for idx, (sensor, data) in enumerate(self.sensor_data.items()):
249         timestamps = data["timestamps"]
250         values = data["values"]
251
252         plt = self.plot_widgets[idx]
253         plt.clear()
254
255         if timestamps and values:
256             # Convert timestamps to datetime objects
257             datetime_timestamps = [datetime.fromisoformat(ts[:-1]) for ts in timestamps]
258             x_values = np.array([dt.timestamp() for dt in datetime_timestamps])
259             # Umrechnung in Sekunden seit Epoche
260
261             plt.plot(x_values, values, pen='green', linewidth=3.0)
262             plt.setLabel('left', text=data["label"])
263             plt.setLabel('bottom', text="Time")
264
265             # y-Achsen- und x-Achsen-Titel festlegen (optional)
266             plt.getAxis('left').setLabel(data["label"]) # Sensor-spezifischer y-Achsen-Titel
267             plt.getAxis('bottom').setLabel("Time") # Gemeinsamer x-Achsen-Titel
268
269             plt.setBackground('w')
270             plt.showGrid(x=False, y=True, alpha=0.5)
271
272             # Legen Sie die maximale Anzahl der sichtbaren Häkchen auf der x-Achse fest
273             max_visible_ticks = 8
274
275             # Berechnen Sie den ungefähren Abstand der Häkchen
276             tick_spacing = max(1, len(x_values) // max_visible_ticks)
277
278             plt.getAxis("bottom").setTicks([[(x, dt.strftime("%H:%M:%S")) for x, dt in
279 zip(x_values[:tick_spacing], datetime_timestamps[:tick_spacing])]])
280
281             plt.setXRange(x_values[0], x_values[-1], padding=0.1)
282
283 if __name__ == "__main__":
284     app = QApplication(sys.argv)
285     # Erstellen Sie das sensor_data dictionary
286     sensor_data = {
287         "CO2": {"timestamps": [], "values": [], "label": "Vol.-%", "title": "CO2"},
288         "V1": {"timestamps": [], "values": [], "label": "ml/min", "title": "V1"},
289         "O2": {"timestamps": [], "values": [], "label": "Vol.-%", "title": "O2"},
290         "V2": {"timestamps": [], "values": [], "label": "ml/min", "title": "V2"},
291         "CH4": {"timestamps": [], "values": [], "label": "Vol.-%", "title": "CH4"},
292         "p": {"timestamps": [], "values": [], "label": "mbar", "title": "p"},
293         "T": {"timestamps": [], "values": [], "label": "°C", "title": "T"},
294     }

```

```

295
296 main_window = CustomMainWindow()
297 main_widget = SensorDataPlotter(sensor_data)
298
299 # Erstellen Sie den MQTT-Thread und starten Sie ihn
300 mqtt_thread = QThread()
301 mqtt_worker = MQTTThread()
302 mqtt_worker.moveToThread(mqtt_thread)
303 mqtt_thread.started.connect(mqtt_worker.run)
304 mqtt_worker.new_data_received.connect(main_widget.update_plot)
305 mqtt_worker.new_data_received.connect(main_window.sensor_plotter.update_plot)
306
307 mqtt_thread.start()
308
309 # Verwenden Sie QTimer, um das Diagramm in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren
310 update_timer = QTimer()
311 update_timer.timeout.connect(main_widget.update_plot)
312 update_timer.start(1000) # Update plot every 5 seconds (adjust interval as needed)
313
314 main_window.show()
315 sys.exit(app.exec_())

```

Sensordaten-Sender

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Wed Mar 29 09:40:08 2023
4
5 @author: Sven Essel
6 """
7
8 import smbus2
9 import time
10 import sys
11 import tkinter as tk
12 import struct
13 from datetime import datetime
14 import threading
15 import RPi.GPIO as GPIO
16
17 import json
18 import logging
19 import time
20 import paho.mqtt.client as mqtt
21
22 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
23 valve_pin = 17
24 GPIO.setup(valve_pin, GPIO.OUT)
25
26 # Konfigurationseinstellungen (hier aus Datensicherheit nicht angegeben)
27 IOT_CORE_ENDPOINT = "XXXX"
28 CA_CERT = "XXXX"
29 CLIENT_CERT = "XXXX"
30 CLIENT_KEY = "XXXX"
31 MQTT_TOPIC = "XXXX"
32 MQTT_CLIENT_ID = "XXXX"
33
34 def cleanup_gpio():
35     GPIO.cleanup()
36     print("GPIO cleanup complete.")
37
38 def send_mqtt_data(co2, o2, ch4, v1, v2, T, p):
39     data = {
40         "timestamp": time.strftime("%Y-%m-%dT%H:%M:%SZ", time.gmtime()),
41         "CO2": co2,
42         "O2": o2,
43         "CH4": ch4,
44         "v1": v1,
45         "v2": v2,
46         "T": T,
47         "p": p,
48     }
49     msg = json.dumps(data)
```

```

50     publish(client, msg)
51
52     # Schreiben der Daten in dieselbe txt-Datei
53     with open("Measurements.txt", 'a') as file:
54         file.write(f"Timestamp: {data['timestamp']}\n")
55         file.write(f"CO2: {data['CO2']} Vol.-%\n")
56         file.write(f"O2: {data['O2']} Vol.-%\n")
57         file.write(f"CH4: {data['CH4']} Vol.-%\n")
58         file.write(f"v1: {data['v1']} ml/min\n")
59         file.write(f"v2: {data['v2']} ml/min\n")
60         file.write(f"T: {data['T']} C\n")
61         file.write(f"p: {data['p']} mbar\n\n")
62
63     def main():
64
65         valve_on = False
66         valve_start_time = None
67
68         Nano1 = 0x8 # I2C-Adresse mit Arduino Nano 1, v, CO2
69         Nano2 = 0x9 # I2C-Adresse mit Arduino Nano 2, v, O2, T, rH
70         Nano3 = 0x10 # I2C-Adresse mit Arduino Nano 3, CH4
71
72         # Erstellung der I2C Verbindung
73         i2cbus = smbus2.SMBus(1)
74
75         adressen =[Nano1, Nano2, Nano3]
76
77         for adresse in adressen:
78             try:
79                 i2cbus.write_quick(adresse)
80                 print(f"Verbindung zu Adresse {hex(adresse)} erfolgreich.")
81             except IOError:
82                 print(f"Fehler: Verbindung zu Adresse {hex(adresse)} konnte nicht hergestellt
83 werden.")
84                 sys.exit(1) # Beende das Skript mit einem Exit-Code von 1
85
86         client = mqtt.Client(
87             client_id=MQTT_CLIENT_ID,
88             clean_session=False
89         )
90         client.tls_set(ca_certs=CA_CERT, certfile=CLIENT_CERT, keyfile=CLIENT_KEY)
91         client.on_connect = on_connect
92         client.on_publish = on_publish
93
94         client.connect(IOT_CORE_ENDPOINT, port=8883, keepalive=60)
95
96         client.loop_start()
97
98

```

```

99     while True:
100         try:
101             # Lese Daten von den Adressen
102             data1 = i2cbus.read_i2c_block_data(Nano1, 0, 8)
103             a = data1[0:4]
104             b = data1[4:]
105             co2_hex = bytearray(a).hex()
106             v1_hex = bytearray(b).hex()
107             co2 = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(co2_hex))[0],2)
108             v1 = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(v1_hex))[0],2)
109
110
111             # Check CO2 Level und operiere Ventil
112             if co2 > 70.0:
113                 # Falls das Ventil aus ist, An machen
114                 if not valve_on:
115                     print("CO2 level above threshold. Turning valve ON.")
116                     GPIO.output(valve_pin, GPIO.HIGH)
117                     valve_on = True
118                     valve_start_time = time.time()
119
120                 # Kontrollieren ob das Ventil 300 s läuft, dann ausschalten
121                 elif time.time() - valve_start_time >= 360:
122                     print("Valve has been ON for 360 seconds. Turning valve OFF.")
123                     GPIO.output(valve_pin, GPIO.LOW)
124                     valve_on = False
125
126             data2 = i2cbus.read_i2c_block_data(Nano2, 0, 20)
127             c = data2[0:4]
128             d = data2[4:8]
129             e = data2[8:12]
130             f = data2[12:16]
131             g = data2[16:]
132             o2_hex = bytearray(f).hex()
133             v2_hex = bytearray(g).hex()
134             T_hex = bytearray(d).hex()
135             p_hex = bytearray(e).hex()
136
137             o2 = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(o2_hex))[0],2)
138             v2 = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(v2_hex))[0],2)
139             T = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(T_hex))[0],2)
140             p = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(p_hex))[0],2)
141
142             data3 = i2cbus.read_i2c_block_data(Nano3, 0, 4)
143             h = data3[0:4]
144             ch4_hex = bytearray(h).hex()
145             ch4 = round(struct.unpack('f', bytes.fromhex(ch4_hex))[0],2)
146
147

```

```

148     # Gib die gelesenen Daten aus
149     print(f"{hex(Nano1)} Daten von CO2: {co2} Vol.-%")
150     print(f"{hex(Nano1)} Daten von v1: {v1} ml/min")
151     print(f"{hex(Nano2)} Daten von O2: {o2} Vol.-%")
152     print(f"{hex(Nano3)} Daten von CH4: {ch4} Vol.-%")
153     print(f"{hex(Nano2)} Daten von v2: {v2} ml/min")
154     print(f"{hex(Nano2)} Daten von T: {T} C")
155     print(f"{hex(Nano2)} Daten von p: {p} mbar \n")
156     send_mqtt_data(co2, o2, ch4, v1, v2, T, p)
157
158     except IOError:
159         print("Fehler beim Lesen der Daten. Verbindung moeglicherweise unterbrochen.")
160
161     time.sleep(0.8)
162
163 if __name__ == "__main__":
164     try:
165         main()
166     except KeyboardInterrupt:
167         # Fange Ctrl+C und säubere GPIO
168         cleanup_gpio()

```

Benutzeroberfläche

```
1  #-*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sep 29 08:50:38 2023
4  @author: Sven Essel
5  """
6
7  import tkinter as tk
8  from PIL import Image, ImageTk
9  import os
10
11 class HauptFenster:
12     def __init__(self, master):
13         self.master = master
14         master.title("InfraSampler v2.0 - Programmstart")
15
16         # Hintergrundbild laden
17         bg_path = "Hintergrund_Logo_Hauptfenster.png"
18         bg_image = Image.open(bg_path)
19
20         # Hintergrundbild skalieren
21         bg_image = bg_image.resize((1000, 600), Image.ANTIALIAS)
22
23         # ImageTk-Objekt erstellen
24         bg_photo = ImageTk.PhotoImage(bg_image)
25
26         # Hintergrundbild einfügen
27         bg_label = tk.Label(master, image=bg_photo)
28         bg_label.place(x=0, y=0, relwidth=1, relheight=1)
29
30         # Hauptfenstergröße setzen
31         master.geometry(f"{bg_image.width}x{bg_image.height}")
32
33         # Button zum Starten des Programms
34         start_button = tk.Button(master, text="Programm starten",
35 command=self.programm_starten)
36         start_button.pack(pady=10)
37         start_button.place(x=460, y=420)
38
39         # Textbereich erstellen
40         text_frame1 = tk.Frame(master, bg='white', highlightthickness=0)
41         text_frame1.place(relx=0.3, rely=0.1, relwidth=0.4, relheight=0.07)
42         text1 = tk.Label(text_frame1, text="Willkommen beim InfraSampler v2.0", bg='white',
43 font=("Arial", 16, "bold"))
44         text1.pack(fill="both", expand=True)
45
46         text_frame2 = tk.Frame(master, bg='white', highlightthickness=0)
47         text_frame2.place(relx=0.15, rely=0.3, relwidth=0.7, relheight=0.2)
48         text2 = tk.Label(text_frame2, text="Der InfraSampler v2.0 ist ein Probenahmemodul fuer
49 Rohgasstroeme an industriellen Kaminen. \nWenn Sie auf den Button 'Programm starten'
50 druecken, wird ein neues Fenster geoeffnet. \nZu sehen sind die Konzentrationen von CO2,
51 O2 und CH4, sowie T, p und die Volumenströme. \nDas Modul zeigt an wann die
52 Probenahme beginnt. \nDie benoetigte CO2-Konzentration kann im Programmcode vor
53 Probenahmestart angepasst werden.", bg='white', font=("Arial", 12))
```

```

54     text2.pack(fill="both", expand=True)
55
56     # Textframe als letztes Element hinzufügen
57     text_frame1.lift()
58     text_frame2.lift()
59
60     # Hintergrundbild auf eine höhere Ebene bringen als die anderen Widgets
61     bg_photo.lift()
62
63     def programm_starten(self):
64         os.system("python Realtime_Reader.py")
65         pass
66
67     class AnmeldeFenster:
68     def __init__(self, master):
69         self.master = master
70         master.title("InfraSampler v2.0 - Anmeldung")
71
72         # Bilderpfad
73         bg_path = "Hintergrund_Logo_Anmeldung.png"
74         profile_path = "Profilbild_Anmeldung.png"
75
76         # Bilder laden
77         bg_image = Image.open(bg_path)
78         profile_image = Image.open(profile_path)
79
80         # Bilder skalieren
81         bg_image = bg_image.resize((1000, 600), Image.ANTIALIAS)
82         profile_image = profile_image.resize((200, 200), Image.ANTIALIAS)
83
84         # ImageTk-Objekte erstellen
85         bg_photo = ImageTk.PhotoImage(bg_image)
86         #logo_photo = ImageTk.PhotoImage(logo_image)
87         profile_photo = ImageTk.PhotoImage(profile_image)
88
89         # Hintergrundbild einfügen
90         bg_label = tk.Label(master, image=bg_photo)
91         bg_label.place(x=0, y=0, relwidth=1, relheight=1)
92
93         # Profilbild einfügen
94         profile_label = tk.Label(master, image=profile_photo)
95         profile_label.pack(pady=10)
96         profile_label.place(x=400, y=50)
97
98         #Anmeldefenstergröße setzen
99         master.geometry(f"{bg_image.width}x{bg_image.height}")
100
101         # Instanzattribute speichern
102         self.bg_photo = bg_photo
103         self.profile_photo = profile_photo
104
105         # Benutzereingabe
106         benutzer_label = tk.Label(master, text="Benutzername")
107         benutzer_label.pack(pady=5)
108         benutzer_label.place(x=460, y=270)
109

```

```

110     self.benutzer_eingabe = tk.Entry(master, width=30)
111     self.benutzer_eingabe.insert(0, "Mustermann") # vordefinierter Benutzername
112     self.benutzer_eingabe.pack()
113     self.benutzer_eingabe.place(x=410, y=300)
114
115     # Passwordeingabe
116     passwort_label = tk.Label(master, text="Passwort")
117     passwort_label.pack(pady=5)
118     passwort_label.place(x=472, y=335)
119
120     self.passwort_eingabe = tk.Entry(master, show="*", width=30)
121     self.passwort_eingabe.insert(0, "Musterpasswort") # vordefiniertes Passwort
122     self.passwort_eingabe.pack()
123     self.passwort_eingabe.place(x=410, y=365)
124
125     # Anmeldebutton
126     anmelde_button = tk.Button(master, text="Anmelden", command=self.anmelden)
127     anmelde_button.pack(pady=10)
128     anmelde_button.place(x=465, y=420)
129
130     def anmelden(self):
131         benutzername = self.benutzer_eingabe.get()
132         passwort = self.passwort_eingabe.get()
133
134         # Überprüfung von Benutzername und Passwort
135         if benutzername == "Mustermann" and passwort == "Musterpasswort":
136             print("Anmeldung erfolgreich!")
137             self.master.destroy() # Anmeldefenster schließen
138
139             # Hauptfenster öffnen
140             root = tk.Tk()
141             hauptfenster = HauptFenster(root)
142             root.mainloop()
143
144         else:
145             print("Anmeldung fehlgeschlagen!")
146             # Neues Fenster erstellen
147             anmeldung_fehlgeschlagen_fenster = tk.Toplevel(self.master)
148             anmeldung_fehlgeschlagen_fenster.title("Anmeldung fehlgeschlagen")
149
150             # Text-Label hinzufügen
151             text = tk.Label(anmeldung_fehlgeschlagen_fenster, text="Anmeldung
152 fehlgeschlagen!")
153             text.pack(padx=10, pady=10)
154
155             # OK-Button hinzufügen
156             ok_button = tk.Button(anmeldung_fehlgeschlagen_fenster, text="OK",
157 command=anmeldung_fehlgeschlagen_fenster.destroy)
158             ok_button.pack(pady=10)
159
160     root = tk.Tk()
161     anmeldefenster = AnmeldeFenster(root)
162     root.mainloop()
163

```

9.7 Flugbuch und Checkliste für UAV

Flugbuch und Checkliste für UAV

Seite 1 von 3

Flugauftrags-Nr.	Pilot	Datum	gesamter Zeitraum Befliegung
2101	Sven Essel	28.10.2021	10:30 Uhr - 11:30 Uhr

Beschreibung Auftrag / Einsatzort / Verwendungszweck
Testflug mit InfraSampler-Prototyp auf dem Gelände der Deponie Limburg-Offheim zur Erfassung des Flugverhaltens des UAV mit der Nutzlast, sowie Funktionsprüfung des InfraSampler.

Checkliste vor dem Start

vorhanden / IO

Ja Nein nn

X		
		X
		X
X		
		X
X		
		X
		X
X		
	X	
		X

Dokumentation / Flugvorbereitung

Allgemeine Aufstiegserlaubnis für das Bundesland der Befliegung

Sonderaufstiegserlaubnis

Aufstiegserlaubnis DFS

Versicherungsscheine der Drohnen

Genehmigung Werksschutz

Genehmigung des Grundstückseigentümers

Genehmigung der Nachbargrundstückseigentümer

Nachbargrundstückseigentümer informiert

Polizei / Ordnungsamt informiert

Ex-Zone im Bereich der Befliegung

Freigabe vorhanden große kleine Nr.: _____

X		
X		

Abstimmung mit Anwesenden über allgemeinen Ablauf und Notfall

Info an Anwesenden über ReturnToHome-Funktion im Notfall

Örtliche Gegebenheiten vor dem Flug

X		
X		
		X
X		
X		

Geofencing kontrolliert (zB DFS Drohnen App)

relevante NOTAMs vorhanden

Flugverbotszone vorhanden

Start- und Landezone identisch

Start- und Landezone abgesichert / gekennzeichnet

Wetterdaten vor dem Flug (z.B. UAV Forecast App)

Temperatur [°C]	Wind [km/h]	Böen [km/h]	Windrichtung	Nieders.Wahr. [%]	Bewölkung [%]	Sichtweite [km]
9,0	7,56	-	N (S) W O	87	Himmel klar	> 10

X		
X		
X		
X		

Wetterlage ausreichend für Flugbetrieb

Sichtflugbedingung ausreichend

Windstärke im zulässigen Bereich (max. M210RTK=43km/h; M2EZ=38km/h)

mental und physisch flugbereit

X		
---	--	--

Sicherer Flug möglich

Unterschrift Pilot: 
Name: Sven Essel

nn=nicht notwendig für diesen Auftrag

Ersteller: Markus Ludwig, Infraseriv GmbH Co. Höchst KG
Formularstand: 26.09.2019

Flugbuch und Checkliste für UAV

Flugauftrags-Nr.	Fluggerät 1	Payload	Zeitraum der Befliegung	Starts
2101	M200 V2	1,45 kg	10:30 Uhr - 11:30 Uhr	8

<p>vorhanden / IO</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Ja</th> <th style="width: 5%;">Nein</th> <th style="width: 5%;">nn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>	Ja	Nein	nn	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<p>Kontrolle der Drohne / Zubehör vor Inbetriebnahme</p> <p>Airframe in Ordnung</p> <p>Rotorenmotoren leichtgängig</p> <p>Rotorblätter in Ordnung</p> <p>Landegestell arretiert</p> <p>RTK-Antennen arretiert</p> <p>Akkus der Drohne in Ordnung</p> <p>Fernbedienungen in Ordnung (Gehäuse/Antennen/Gurtbefestigung/Displaybefestigung)</p> <p>Akkus der Fernbedienungen in Ordnung</p> <p>Displays in Ordnung</p> <p>Akkus der Displays in Ordnung</p> <p>Gehäuse und Akkuabdeckung der RTK-Groundstation in Ordnung</p> <p>Akku der RTK-Groundstation in Ordnung</p> <p>Kontrolle der Parameter vor dem Start</p> <p>Flugmodus eingestellt</p> <p>Kollisionssensoren gemäß Anwendung ein-/ausgestellt</p> <p>Höhenlimit eingestellt</p> <p>GPS-Stärke kontrolliert</p> <p>Kalibrierung durchgeführt</p> <p>Akkuladestand mittels Fernbedienung kontrolliert</p> <p>Funksignalstärke kontrolliert</p> <p>Hovertest nach dem Start</p> <p>Position wird gehalten</p> <p>Steuerbefehle werden richtig ausgeführt</p> <p>Besondere Vorkommnisse während des Fluges</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> </table>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ja	Nein	nn																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																					
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																						

ergänzende Notizen
Das UAV zeigte während des Fluges keine Beeinträchtigungen durch die Nutzlast.

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> </table>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<p>Flug ohne Komplikation</p> <p>Drohne bedenkenlos wieder einsetzbar</p> <p>zweites Fluggerät nötig (Seite 3 entfällt)</p>	<p>Unterschrift Pilot:</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>Name: Sven Essel</p>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							

9.8 Probenahmeprotokoll

Infraserv Höchst
Umweltschutz



Auftrags-Nr. - Berichts-Nr. - Quelle: [REDACTED] <i>Dröge</i>	Projektleiter:
Datum - Probenbez. - Bezahl-Nr.: <i>02.11.21 - Geruch 1</i>	Probennehmer: <i>RS</i>
LIMS-Nr.: <i>211.1539.001</i> Kartierungs-Nr.: <i>10664</i>	Versuchsleiter: <i>[Signature]</i>

Messprotokoll olfaktometrische Emissionsmessung

Allgemeines	Aufgabenstellung: <input checked="" type="checkbox"/> Betriebsmessung <input type="checkbox"/> Belüftliche Messung
	Qualitative Beurteilung erforderlich? <input type="checkbox"/> Geruchstyp <input type="checkbox"/> Vergleich Rohgas / Rangas
	Anlage / Betrieb: [REDACTED]
	Probenahmestelle: [REDACTED] Abmessungen: <i>ca. 10 m</i>

Probenahme, Transport	Geruchsprobenehmer: <input type="checkbox"/> GP-1 <input checked="" type="checkbox"/> GP-2 <input type="checkbox"/> GP-3 <input type="checkbox"/> GSP-3D <input type="checkbox"/> GSF-31
	Probenahmesonde: Material: <input checked="" type="checkbox"/> Glas <input type="checkbox"/> Länge (m): <i>0,1</i> Beheizung (°C): ca. <input checked="" type="checkbox"/> unbeheizt
	Vorverdünnung: <input type="checkbox"/> statisch <input type="checkbox"/> dynamisch Vorverdünnungsfaktor: _____
	Probenahmezeit: Beginn: <i>8,30</i> Ende: <i>9,00</i> Probenankunft im Labor (Uhrzeit): _____
	Temperaturen: Abgastemperatur t ₁ [°C]: <i>85</i> Umgebungstemperatur [°C]: <i>9,0</i>
	Drücke: Luftdruck [hPa]: <i>997,9</i> statischer Druck [hPa]: <i>0,0</i>
	Probenahmebeutel + Sonde vorgespült: <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Abgasfeuchte [g/m ³]: _____
	Kondensation im Probenahmebeutel: <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein

Riechraum	Ort: <input checked="" type="checkbox"/> Labor / G832 (zwangsbeflügelt) <input type="checkbox"/>
	Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung: <input checked="" type="checkbox"/> wegen Lage in Labor [REDACTED] <input type="checkbox"/>
	Riechraum geruchsfrei? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Abhilfemaßnahmen: _____

Olfaktometer	Typ / Seriennummer: <input checked="" type="checkbox"/> TO 8 / EO.8077 <input type="checkbox"/> Kalibrierdatum: <i>02.07.2021</i>
	Neutralluft geruchsfrei? vor Beginn der Messungen?: <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein während der Messungen?: <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein Abhilfemaßnahmen: _____

Prüfgas	Butanol: Konzentration [ppm]: <i>10,31</i> Behälter Nr.: <i>D4003775541</i> haltbar bis: <i>06.02.2025</i>
	Schwefelwasserstoff: Konzentration [ppm]: <i>2,03</i> Behälter Nr.: <i>D040307868161</i> haltbar bis: <i>14.1.2022</i>

Prüfer	Anzahl: <i>4</i> ID: <i>Siehe Anlagen</i>
	Verhaltenskodex ist allen Prüfern bekannt? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
	Alle Prüfer erfüllen die Eignungskriterien? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
	Überprüfung mit Butanol: tagesaktuelle Genauigkeit (A _{rel} ≤ 0,217): <i>0,099</i> tagesaktuelle Wiederholpräzision (r ≤ 0,477): <i>0,3898</i>

Geruchsbeschreibung / Bemerkungen
<i>süßlich, stechend</i>

DA-M.: EH-109_Geruch	Rev.: 16	Dokumenteneigenschaft: 795-721 Emissionsmessung
GEG 3b) 28.-0.2021	Frank: Rth	Gedruckt: Schref / 28.10.2021 Freigegeben: Kto / 28.11.2021 Seite 8 von 8

Auftrags-Nr. – Berichts-Nr. – Quelle:	<i>[Redacted] Droque</i>	Projektleiter:	
Datum – Probenbez. – Beutel-Nr.:	<i>02.10.21 - Geruch 2</i>	Probennehmer:	<i>RS</i>
LIMS-Nr.:	<i>211/1539-002</i>	Kontierungs-Nr.:	<i>10.669</i>
		Versuchsleiter:	<i>[Signature]</i>

Messprotokoll olfaktometrische Emissionsmessung

Allgemeines	Aufgabenstellung:	<input checked="" type="checkbox"/> Betriebsmessung	<input type="checkbox"/> Behördliche Messung
	Qualitative Beurteilung erforderlich?	<input type="checkbox"/> Geruchstyp	<input type="checkbox"/> Vergleich: Rohgas / Reingas
	Anlage / Betrieb:	<i>[Redacted]</i>	
	Probenahmestelle:	<i>[Redacted]</i>	
		Altmessungen:	<i>ca. 10 umm</i>

Probenaufnahme, Transport	Geruchsprobenehmer:	<input type="checkbox"/> GP-1	<input checked="" type="checkbox"/> GP-2	<input type="checkbox"/> GP-3	<input type="checkbox"/> GSP-30	<input type="checkbox"/> GSP-3		
	Probenahmesonde:	Material:	<input checked="" type="checkbox"/> Glas	<input type="checkbox"/>	Länge (m):	<i>0,1</i>	Beheizung [°C]:	ca. <input type="checkbox"/> unheizt
	Vorverdünnung:	<input type="checkbox"/> statisch	<input type="checkbox"/> dynamisch	Vorverdünnungsfaktor:				
	Probenahmezeit:	Beginn:	<i>9:01</i>	Erde:	<i>9:31</i>	Probenankunft im Labor (Uhrzeit):		
	Temperaturen:	Abgastemperatur Ir. / f. [°C]:	<i>2,5</i>	Umgebungstemperatur [°C]:		<i>5,0</i>		
	Drücke:	Luftdruck (hPa):		<i>994,5</i>		statischer Druck (hPa): <i>0,0</i>		
	Probenahmebeutel + Sonde vorgespült:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	Abgasfeuchte [g/m³]:		<i>[Blank]</i>		
	Kondensation im Probenahmebeutel:	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein					
Lichtschutz beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> festes Behältnis (Karton)		<input type="checkbox"/>					
Temperatur beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> klimatisiertes Fahrzeug (< 25°C)		<input type="checkbox"/>					

Riechraum	Ort:	<input checked="" type="checkbox"/> Labor / C832 (zwangslüftet)	<input type="checkbox"/>
	Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung:	<input checked="" type="checkbox"/> wegen Lage in Labor / <i>[Redacted]</i>	<input type="checkbox"/>
	Riechraum geruchsfrei?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

Olfaktometer	Typ / Seriennummer:	<input checked="" type="checkbox"/> TD R / ED.8077	<input type="checkbox"/>	Kalibrierdatum:	<i>02.07.2021</i>
	Neutralluft geruchsfrei?	vor Beginn der Messungen?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen:
		Veränderung während der Messungen?:	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen:

Füllgas	Butanol:	Konzentration (ppm):	<i>10,31</i>	Behälter Nr.:	<i>040007766641</i>	haltbar bis:	<i>06.02.2025</i>
	Schwefelwasserstoff:	Konzentration (ppm):	<i>2,00</i>	Behälter Nr.:	<i>0040007668161</i>	haltbar bis:	<i>14.1.2022</i>

Prüfer	Anzahl:	<i>4</i>	ID:	<i>Silke Falase</i>
	Verhaltenskodex ist allen Prüfern bekannt?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
	Alle Prüfer erfüllen die Eignungskriterien?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
Überprüfung mit Bitanot:		tagesaktuelle Genauigkeit ($A_{rel} \leq 0,217$):	<i>0,099</i>	
		tagesaktuelle Wiederholpräzision ($r \leq 0,477$):	<i>0,3892</i>	

Geruchsbeschreibung / Bemerkungen

soßlich, stechend

Auftrags-Nr. – Berichts-Nr. – Quelle:	Projektleiter: <i>Sven Essel</i>
Datum – Probenbez. – Beutel-Nr.: <i>Probe 1 MM21</i>	Probennehmer: <i>Sven Essel</i>
LIMS-Nr.: _____ Kontierungs-Nr.: _____	Versuchsleiter: <i>Sven Essel</i>

Messprotokoll olfaktometrische Emissionsmessung

Allgemeines	Aufgabenstellung	<input checked="" type="checkbox"/> Betriebsmessung	<input type="checkbox"/> Behördliche Messung
	Qualitative Beurteilung erforderlich?	<input checked="" type="checkbox"/> Geruchstyp	<input type="checkbox"/> Vergleich Rohgas / Reingas
	Anlage / Betrieb:	<i>EL35</i>	
	Probenahmestelle:	<i>Schornstein</i>	
Abmessungen: _____			

Probenahme, Transport	Geruchsprobennehmer:	<input type="checkbox"/> GP-1	<input type="checkbox"/> GP-2	<input type="checkbox"/> GP-3	<input type="checkbox"/> GSP-30	<input type="checkbox"/> GSP-31	<i>eingesetzt</i>	
	Probenahmesonde:	Material: <input type="checkbox"/> Glas	<input checked="" type="checkbox"/> <i>Kohlenfaser</i>	Länge (m): <i>1,2</i>	Beheizung (°C): ca. _____	<input checked="" type="checkbox"/> unbeheizt		
	Vorverdünnung:	<input type="checkbox"/> statisch	<input type="checkbox"/> dynamisch	Vorverdünnungsfaktor: _____				
	Probenahmezeit:	Beginn: <i>10:11</i>	Ende: <i>10:24</i>	Probenantritt im Labor (Uhrzeit): _____				
	Temperaturen:	Abgastemperatur tr. / f. (°C): _____			Umgebungstemperatur (°C): _____			
	Drücke:	Luftdruck (hPa): <i>1025</i>			statischer Druck (hPa): _____			
	Probenahmebeutel + Sonde vorgespült:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein			Abgasleuchte (µm): _____			
	Kondensation im Probenahmebeutel:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein			_____			
	Lichtschutz beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> festes Behältnis (Karton)			<input type="checkbox"/> _____			
	Temperatur beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> klimatisiertes Fahrzeug (< 25°C)			<input type="checkbox"/> _____			

Riachraum	Ort:	<input checked="" type="checkbox"/> Labor / G832 (zwangsbeflügelt)	<input type="checkbox"/> _____
	Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung:	<input checked="" type="checkbox"/> wegen Lage in Labor / G832	<input type="checkbox"/> _____
	Riachraum geruchsfrei?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen: _____

Olfaktometer	Typ / Seriennummer:	<input checked="" type="checkbox"/> TO B / EO.8072	<input type="checkbox"/> _____	Kalibrierdatum: <i>02.07.2021</i>
	Neutralität vor Beginn der Messungen?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen: _____	
	geruchsfrei? Veränderung während der Messungen?:	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen: _____	

Prüfgas	Ethanol:	Konzentration (ppm): <i>10,51</i>	Behälter Nr.: <i>040007755641</i>	haltbar bis: <i>06.02.2025</i>
	Schwefelwasserstoff:	Konzentration (ppm): <i>2,03</i>	Behälter Nr.: <i>0040007658161</i>	haltbar bis: <i>14. 1.2022</i>

Prüfer	Anzahl:	<i>4</i>	ID: <i>Sven Essel</i>
	Verhaltenskodex ist allen Prüfern bekannt?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	_____
	Alle Prüfer erfüllen die Eignungskriterien?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	_____
	Überprüfung mit Ethanol:	tagesaktuelle Genauigkeit (A _{rel} ≤ 0,217):	<i>0,079</i>
tagesaktuelle Wiederholpräzision (r ≤ 0,477):		<i>0,3939</i>	

Geruchsbeschreibung / Bemerkungen	
<i>süßlich, stechend</i>	
<i>11.11.21</i>	

Dok.Nr.: EN-109_Geruch	Rev.: 16	Dokumentationshinweise: DMS-221 Em.sabermessung		
Gültig ab: 28.10.2021	Erstellt: Riet	Geprüft: Schief / 28.10.2021	Freigegeben: R.B. / 28.10.2021	Seite 1 von 1

Auftrags-Nr. – Bericht-Nr. – Quelle:	Projektleiter: <i>Sven Essel</i>
Datum: – Probenbez. – Beutelnr.:	Probennehmer: <i>Sven Essel</i>
LIMS-Nr.:	Versuchsleiter: <i>Sven Essel</i>
Kontroll-Nr.:	

Messprotokoll olfaktometrische Emissionsmessung

Allgemeines	Aufgabenstellung	<input checked="" type="checkbox"/> Betriebsmessung	<input type="checkbox"/> Behördliche Messung
	Qualitative Beurteilung erforderlich?	<input checked="" type="checkbox"/> Geruchstyp:	<input type="checkbox"/> Vergleich Rohgas / Reingas
	Anlage / Betrieb:	<i>EA35</i>	
	Probnahmestelle:	<i>Schwarzen</i>	
Abmessungen:			

Probnahme, Transport	Geruchsprüfnehmer:	<input type="checkbox"/> GP-1	<input type="checkbox"/> GP-2	<input type="checkbox"/> GP-3	<input type="checkbox"/> GSP-30	<input type="checkbox"/> GSP-31	<i>eigener Behälter</i>
	Probnahmesonde:	Material: <input type="checkbox"/> Glas	<input checked="" type="checkbox"/> <i>Karbon/Stahl</i>		Länge (m):	<i>1,7</i>	Beheizung (°C): ca. <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> unbeheizt
	Vorverdünnung:	<input type="checkbox"/> statisch	<input type="checkbox"/> dynamisch		Vorverdünnungsfaktor: <i>/</i>		
	Probnahmezeit:	Beginn:	<i>10:36</i>	Ende:	<i>10:40</i>	Probnahmestunde im Labor (Uhrzeit):	
	Temperaturen:	Abgastemperatur fr. (f. (°C):				Umgebungstemperatur (°C):	
	Drücke:	Luftdruck (hPa):				statischer Druck (hPa):	
	Probnahmebeutel + Sonde vorgespült:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja		<input type="checkbox"/> Nein		Abgasfeuchte (g/m³):	
	Kondensation im Probnahmebeutel:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja		<input type="checkbox"/> Nein			
	Lichtschutz beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> festes Behältnis (Karton)		<input type="checkbox"/>			
	Temperatur beim Transport:	<input checked="" type="checkbox"/> klimatisiertes Fahrzeug (< 25°C)		<input type="checkbox"/>			

Riechraum	Ort:	<input checked="" type="checkbox"/> Labor / G332 (zwingende Öffnet)	<input type="checkbox"/>
	Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung:	<input checked="" type="checkbox"/> wegen Lage in Labor / G332	<input type="checkbox"/>
	Riechraum geruchsfrei?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

Olfaktometer	Typ / Seriennummer:	<input checked="" type="checkbox"/> TO E / EQ.8077	<input type="checkbox"/>	Kalibrierdatum:	<i>02.07.2021</i>
	Neutralluft vor Beginn der Messungen?:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen:	
	geruchsfrei? Veränderung während der Messungen?:	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein	Abhilfemaßnahmen:	

Prüfgas	Butanol:	Konzentration (ppm):	<i>10,31</i>	Behälter Nr.:	<i>04000755641</i>	haltbar bis:	<i>05.02.2025</i>
	Schwefelwasserstoff:	Konzentration (ppm):	<i>2,03</i>	Behälter Nr.:	<i>0040007668161</i>	haltbar bis:	<i>14.11.2022</i>

Prüfer	Anzahl:	<i>4</i>	ID:	<i>siehe Anlage</i>
	Verhaltenskodex ist allen Prüfern bekannt?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
	Alle Prüfer erfüllen die Eignungskriterien?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
	Überprüfung mit Butanol:	tagesaktuelle Genauigkeit ($A_{\pm} \leq 0,217$):	<i>0,0729</i>	tagesaktuelle Wiederholpräzision ($r \leq 0,477$):

Geruchsbeschreibung / Bemerkungen	
<i>schlammig, staubig</i>	
<i>11.11.2021</i>	

Dok.Nr.: EH-109_Geruch	Rev.: 16	Dokumentenzugehörigkeit: IP-5-201 Emissionsmessung
Gültig ab: 28.10.2021	Erstellt: P.ett	Geprüft: Schorf / 28.10.2021
		Folgedaten: MfB / 28.10.2021
Seite 1 von 1		

9.9 Messverfahren und Verfahrenskenngrößen

Tabelle 28: Bestückung der Luftmessstationen im IPH.

Messstation	Messkomponente	Messverfahren	Gerätehersteller/Typ	online an EDV	Messbereich ⁵ [µg/m ³]
West	Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz	Thermo 43 i	+	1330
	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	Chemilumineszenz	Horiba/APNA-370	+ +	625 955
	Methan CnHm (o. Methan)	Flammenionisation	Horiba/APHA-370	+ +	3350 9150
	Ozon	UV-Spektroskopie	Thermo 49 i	+	1000
	Schwebstaub PM-10	Betastrahlenabsorption	SHARP 5030	+	1300
	Schwebstaub PM-2,5	Nephelometrie	Horiba/APDA-372	+	1500
	Chlor	Photometrie	Honeywell/SP-Monitor	+	4425
	Chlorwasserstoff	Laserspektrometrie	neo monitors/LaserGasII	+	760
Nord	Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz	Thermo 43 i	+	1330
	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	Chemilumineszenz	Horiba/APNA-370	+ +	625 955
	Methan CnHm (o. Methan)	Flammenionisation	Horiba/APHA-370	+ +	3350 9150
	Chlor	Photometrie	Honeywell/SP-Monitor	+	4425
	Chlorwasserstoff	Laserspektrometrie	neo monitors/LaserGasII	+	760
Nordost	Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz	Thermo 43 i	+	1330
	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	Chemilumineszenz	Horiba/APNA-370	+ +	625 955
	Methan CnHm (o. Methan)	Flammenionisation	Horiba/APHA-370	+ +	3350 9150
	Chlor	Photometrie	Honeywell/SP-Monitor	+	4425
	Chlorwasserstoff	Laserspektrometrie	neo monitors/LaserGasII	+	760
	Kohlenstoffmonoxid	IR-Photometrie	Horiba/APMA-370	+	11640
	Organische Stoffe	Passivsammler	Dräger ORSA	-	-
Ost	Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz	Thermo 43 i	+	1330
	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	Chemilumineszenz	Horiba/APNA-370	+ +	625 955
	Methan CnHm (o. Methan)	Flammenionisation	Horiba/APHA-370	+ +	3350 9150
	Chlorwasserstoff	Laserspektrometrie	neo monitors/LaserGasII	+	760
	Chlor	Photometrie	Honeywell/SP-Monitor	+	4425
Süd	Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz	Thermo 43 i	+	1330
	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	Chemilumineszenz	Horiba/APNA-370	+ +	625 955
	Methan CnHm (o. Methan)	Flammenionisation	Horiba/APHA-370	+ +	3350 9150
	Chlorwasserstoff	Laserspektrometrie	neo monitors/LaserGasII	+	760
	Chlor	Photometrie	Honeywell/SP-Monitor	+	4425
	Kohlenstoffmonoxid	IR-Photometrie	Horiba/APMA-370	+	11640

⁵ bezogen auf 20°C und 1013 hPa

Tabelle 29: Meteorologie im IPH.

Messstation	Messkomponente	online an EDV	Messbereich	Gerätehersteller
Ost	Schneelast	+	0 - 200 kg/m ²	Sommer
B598	Windrichtung	+	0 - 360° (AZ) / -90 - +90° (EL)	Adolf Thies GmbH
	Windgeschwindigkeit	+	0 - 60 m/s	
West	Temperatur	+	-30 - +70°C	
	Luftdruck	+	946 - 1053 hPa	
	rel. Feuchte	+	10 - 100 %	
	Niederschlag	+	max. 2 mm/min	
	Globalstrahlung	+	0 - 1400 W/m ²	

Tabelle 30: Messverfahren und Verfahrenskenngrößen der Messstation IPH.

Messkomponente	Messverfahren/ Prüfmethode	Verfahrenskenngröße	
		Nachweisgrenze [µg/m ³]	Messunsicherheit [%]
Stickstoffdioxid, Stickstoffmonoxid	Chemilumineszenz DIN EN 14211, LI-SOP-009	5	13 bei 20µg/m ³
Schwefeldioxid	UV-Fluoreszenz DIN EN 14212, LI-SOP-007	3	22 bei 10 µg/m ³
Schwebstaub	Nephelometrie, Radiometrie DIN EN 12341, LI-SOP-048, LI-SOP-056	2	ca. 20 bei 40 µg/m ³
Ozon	UV-Spektroskopie DIN EN 14625, LI-SOP-014	5	15 bei 100 µg/m ³
Gesamt-C, Methan	Flammenionisation LI-SOP-012	6	12 bei 100 µg/m ³
Kohlenstoffmonoxid	NDIR-Spektroskopie DIN EN 14626, LI-SOP-055	0,1 mg/m ³	ca. 5 bei 10 mg/m ³

Tabelle 31: Messverfahren und Verfahrenskenngrößen des IMB.

Messkomponente	Messverfahren/ Prüfmethode	Verfahrenskenngröße	
		Nachweisgrenze [µg/m ³]	Messunsicherheit [%]
Stickstoffdioxid	Metalloxid-Halbleiter	10	< 25
Schwefeldioxid		-	-
Schwebstaub PM2,5	Optischer Partikelzähler (OPC)	2	< 50
Schwebstaub PM10		5	< 50
Ozon	Metalloxid-Halbleiter	10	< 30
Kohlenstoffmonoxid		250	-

Tabelle 32: Messverfahren und Verfahrenskenngrößen des Mikrosystems.

Messkomponente	Messverfahren/ Prüfmethode	Verfahrenskenngröße
		Messunsicherheit [%]
Stickstoffdioxid	Metalloxid-Halbleiter (SnO ₂)	≤ 2
Schwefeldioxid		≤ 30
Schwebstaub PM _{2,5}	Optischer Partikelzähler (OPC)	< 50
Schwebstaub PM ₁₀		< 50
Ozon	Metalloxid-Halbleiter (SnO ₂)	≥ 2
Kohlenstoffmonoxid		< 50
Ammoniak		< 15
Flüchtige organische Kohlenstoffe		-

9.10 Meteorologie des Versuchszeitraumes der stationären Messkampagne

Tabelle 33: Statistische Auswertung der Meteorologie (ohne Windrichtung und Luftfeuchte).

Messdatum : 01.12.2021 - 01.12.2022
 Messzeit : 01:00 h - 24:00 h

Parameter	Einheit	Jahres- mittelwert	max. Monats- mittel	max. Tagesmittel	max. 30 min- MW	max. 30 min-MW	
						Datum	Uhrzeit
Windgeschw.	m/s	3,1	5,0	14,4	14,4	18.02.22	21:30
Temperatur	°C	13,1	24,3	38,4	38,4	04.08.22	16:30
Luftdruck	hPa	1004,3	1011,4	1028,2	1028,2	18.03.22	23:00
Niederschlag	mm	0,1	0,1	11,9	11,9	27.08.22	17:30
Globalstrahlung	W/m ²	130,3	260	995	995	10.07.22	12:30