



# Machbarkeitsstudie drohnen- gestützte Gasmesstechnik

Schriftenreihe, Heft 2/2023



# Machbarkeitsstudie zum Einsatz drohnenge- stützter Gasmesstechnik im Rahmen des Auf- baus eines sächsischen Frühwarnsystems

Prof. Dr. Konradin Weber, M.Sc. Martin Lange, Dipl.-Ing. Christian Fischer, B.Eng. Tim Kramer, M.Eng.  
Tobias Pohl, Detlef Amend

Hochschule Düsseldorf, Labor für Umweltmesstechnik

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>AP 1 – Recherche</b> .....	<b>7</b>
2.1	Bestandsaufnahme UAS-basierter Gasmesssysteme.....	7
2.1.1	AirSensEUR .....	8
2.1.2	Bruker RAID-MNR .....	11
2.1.3	ION Science Tiger .....	13
2.1.4	Dräger X-am 8000 .....	14
2.1.5	FLIR Muve C360.....	15
2.1.6	WITEC optische Sensoren.....	16
2.1.7	US EPA Kolibri.....	18
2.1.8	AQ Mesh.....	19
2.1.9	HSD UMT Multisensorplattform „PMX“ .....	20
2.2	Recherche kommerzieller UAS .....	23
2.2.1	Art des Fluggerätes .....	23
2.2.2	Hubschrauber (Copter) oder Multicopter .....	26
2.2.3	Auswahl der Multicopterkonfiguration .....	27
2.2.4	Auswahl eines geeigneten Systems.....	28
2.3	Datenübertragung.....	33
2.3.1	Vertikale Funkdatenübertragung .....	33
2.3.2	Antenne mit Richtcharakteristik.....	34
2.3.3	Funkfernsteuersysteme .....	35
2.3.4	Empfehlung .....	37
2.4	Wissenssammlung.....	39
2.4.1	Nachtflug .....	39
2.4.2	Fallschirmsystem .....	40
2.4.3	Qualitätssicherung .....	40
<b>3</b>	<b>AP2 – Vorbereitende Arbeiten für Freifeldversuche</b> .....	<b>42</b>
3.1	Ausgangslage.....	42
3.1.1	Herausforderungen bei der Erfassung störfallbedingter Emissionen im Untersuchungsgebiet.....	43
3.1.2	Herausforderungen an die Ausbreitungssimulation .....	44
3.2	Vorbereitung .....	45
3.3	Einsatz des Gesamtsystems im Praxistest.....	46
3.3.1	Ortswahl .....	46
3.3.2	Emissions- und Ausgabemethoden.....	46
3.3.3	Untersuchung des Windfeldes .....	48
3.4	Standardisierte Abläufe im Einsatzfall.....	49
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>53</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der AirSensEur Multisensorplattform (Quelle: (Gerboles, et al. 2018)) .....	9
Abbildung 2: Graphische Visualisierung der Messdaten mithilfe der Graphana Oberfläche (Quelle: (Gerboles, et al. 2018)).....	10
Abbildung 3: AirSensEUR-Gehäuse (Quelle: (Gerboles, et al. 2018)) .....	10
Abbildung 4: Bruker Raid Messsystem .....	11
Abbildung 5: PID-Handmessgerät Tiger der Firma ION-Science .....	14
Abbildung 6: Sensorsteckplätze beim X-am 8000 Mehrkomponentenmessgerät.....	15
Abbildung 7: FLIR Muve C360 Mehrkomponenten Gasmesssystem (Quelle: <a href="https://www.flir.com/products/muve-c360/">https://www.flir.com/products/muve-c360/</a> ).....	16
Abbildung 8: Anzeige der Messdaten während eines Fluges.....	16
Abbildung 9: Übertragungsschema und Kommunikation zwischen Messgerät und MARS Software (Quelle: WITEC Sensorik).....	18
Abbildung 10: Kolibri-Messsystem verbaut unter einem DJI M600 Hexacopter (oben) und mit geöffneter Seitenansicht (unten) .....	19
Abbildung 11: AQMesh mit Antenne zum Datentransfer.....	20
Abbildung 12: Grundplatine des Multisensormoduls mit angeschlossenem CO2-Sensor und einem optischen Partikelzähler .....	21
Abbildung 13: Sensorsystem auf einer DJI Mavic2 Pro montiert.....	21
Abbildung 14: UMT-Sensorsystem mit angeschlossenem VOC-Sensor (Alphasense) auf einer DJI M200 Drohne .....	22
Abbildung 15: Arten von UAS, Quellen: <a href="http://www.dji.com">www.dji.com</a> , <a href="http://bluebird-uav.com">bluebird-uav.com</a> , <a href="http://www.wingcopter.com">www.wingcopter.com</a> , <a href="http://cleanpng.com">cleanpng.com</a> .....	24
Abbildung 16: Projizierte Propellerfläche / Packungsdichte bei unterschiedlicher Propelleranzahl .....	26
Abbildung 17: Schub über Leistung / Drehzahl.....	27
Abbildung 18: DJI M300 RTK mit Payload oberhalb und unterhalb des Multicopters (DJI kein Datum).....	29
Abbildung 19: Watts Prism als Quadrocopter und Octocopter X8 (Premium-Modellbau kein Datum).....	32
Abbildung 20: Freefly Alta X (Freefly kein Datum) .....	33
Abbildung 21: Telemetrie-Bodenstation der HSD im vertikalen Betrieb (HSD UMT, 2014) .....	35
Abbildung 22: 433 MHz Sende- und Empfangseinheit (HSD UMT, 2021) .....	36
Abbildung 23: Telemetriesystem der Firma TBS mit hoher Reichweite (TBS kein Datum).....	36
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Datenverbindung und des Datenflusses des vorgeschlagenen Datenübertragungssystems .....	38
Abbildung 25: Handgroßes Paperwhitedisplay mit Livedatenanzeige von 6 Sensoren (HSD UMT, 2021) .....	39
Abbildung 26: Untersuchung des Windfeldes im Bereich der Probenahme (HSD UMT, 2021) .....	40
Abbildung 27: Vergleich Anzahlverteilung stationär und im Flugbetrieb (HSD UMT, 2021).....	41
Abbildung 28: Nach Ursachen kategorisierte Chemieunfälle (Datengrundlage: <a href="http://wikipedia.de">wikipedia.de</a> ).....	42

Abbildung 29: Langjähriges Mittel (2010-2020) der Windverhältnisse an der Wetterwarte Fichtelberg (rotes X, 1213 m NN, Daten: DWD). Rechts: Rückwärtstrajektorien zeigen das orographisch beeinflusste Windfeld (schwarzes X, Schrödner & Wolke 2019) .....	45
Abbildung 30: Funktionsskizze des Freifeldversuches.....	49
Abbildung 31: Windprofil eines zügigen Multicopteranstieges bis auf 500 m a.g.l [Quelle: <a href="http://www.airdata.com">www.airdata.com</a> ] .....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht einiger kommerziell verfügbarer elektrochemischer, NDIR und PID-Sensoren.....	8
Tabelle 2: Anschließbare Sensor Shield Typen für die AirSenseEUR Plattform und dazugehörige Sensoren .....	9
Tabelle 3: Standardbibliotheken für die detektierbaren Substanzen des Bruker Raid-MNR (Quelle: <a href="http://alphasense.com">alphasense.com</a> , (Dräger Safety AG & Co. KGaA 2021)) .....	12
Tabelle 4: Technische Daten des Tiger Messgerätes .....	14
Tabelle 5: Technische Spezifikationen der Gasmesssysteme der Firma WITEC .....	17
Tabelle 6: Technische Spezifikationen des AQMesh .....	20
Tabelle 7: Bewertungskriterien für die Art des Fluggerätes.....	24
Tabelle 8: Bewertungsmatrix zur Bestimmung der Art des Fluggerätes (GITTA kein Datum) .....	25
Tabelle 9: Technische Daten DJI M300 RTK (DJI kein Datum) .....	30
Tabelle 10: Vor- und Nachteile DJI M300 RTK.....	31
Tabelle 11: Typische Reichweite von Fernsteuersystemen .....	37

## **Abkürzungsverzeichnis**

a.g.l.	above ground level
CWA	Chemical Warfare Agents
IMS	Ionenmobilitätsspektrometrie
JRC	Joint Research Center
LEL	Lower Explosive Limit
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
NDIR	Nichtdispersives Infrarot
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PID	Photoionisationsdetektor
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
TIC	Toxic Industrial Chemicals
UAS	Unmanned Aerial System
VOC	Volatile Organic Compounds

# 1 Einleitung

Um zukünftig entlang der deutsch-tschechischen Grenze im Falle von Störfällen grenznaher Industriebetriebe auf tschechischer Seite rechtzeitig umweltmesstechnische Untersuchungen durchführen zu können, recherchiert, untersucht und bewertet das Labor für Physik und Umweltmesstechnik der Hochschule Düsseldorf die technischen Möglichkeiten der unbemannten Immissionsmessung. Im Rahmen der Auswertung wurden den in der Leistungsbeschreibung genannten Forderungen weitere Merkmale zur Auswahl eines adäquaten Flug- und Messsystems hinzugefügt. Der Fokus lag jedoch stets darauf den Gefahrenabwehrkräften vor Ort ein Instrument und entsprechende Messtechnik empfehlen zu können, mit der diese dann an repräsentativen Orten in Grenznähe möglichst schnell und ausreichend aussagekräftig überprüfen können, ob es zu einer Schadstoffeinwirkung kommen kann bzw. bereits gekommen ist.

Im folgenden Bericht wird im Arbeitspaket 1 im Rahmen der Bestandsaufnahme von UAS-basierten Gasmesssystemen und der Empfehlung für ein Gasmesssystem als auch einer geeigneten Drohne zunächst eine umfangreiche Recherche betrieben. Die Empfehlung erfolgt jedoch nicht ausschließlich durch technische Eigenschaften. Die Piloten des Labors haben in den letzten Jahren nachweislich über 1.400 Flüge mit einer gesamten Flugzeit von über 200 Stunden während der Arbeitszeit absolviert. Neben zahllosen Messflügen im Bereich der Umweltmesstechnik hat man stets versucht an die technischen, physikalischen und gesetzlichen Grenzen der Flugsysteme zu gehen. So wurden Flüge bis 10 km Entfernung, 2.000 m a.g.l. Höhe und mit 100 km/h Geschwindigkeit durchgeführt. Die Erfahrung der Piloten und der Wissenschaftler des Labors fließen gleichermaßen mit in die Bewertung ein. Für ein bestmögliches Ergebnis wurden möglichst viele der untersuchten Technologien im Labor getestet und kommen nach der Fertigstellung des Projektes ebenfalls zum Einsatz.

Als Grundlage der Empfehlung des Fluggerätes und der Messsysteme dienen neben der Leistungsbeschreibung die im Auftaktgespräch genannten Schlagwörter:

- Feuerwehr
- Vertikalprofil
- Qualitative Messung
- Nachtflug

## 2 AP 1 – Recherche

In den folgenden Kapiteln des ersten Arbeitspaketes wird eine Bestandsaufnahme kommerziell und nicht-kommerziell verfügbarer UAS-basierter Gasmesssysteme und kommerzieller UAS dargestellt.

### 2.1 Bestandsaufnahme UAS-basierter Gasmesssysteme

Die Bestandsaufnahme UAS-basierter Gasmesssysteme erfordert zunächst die Bestimmung einer Auswahl relevanter Gase, die mithilfe des UAS im Einsatzfall gemessen werden sollen. Da Störfälle in aller Regel durch Explosionen und oder Brände von bzw. an Anlagenteilen verursacht werden, sind vor allem typische Brandgase bei der UAS-basierten Identifizierung von Schadstoffwolken von Bedeutsamkeit. Bei der Recherche werden vor allem Gasmesssysteme berücksichtigt, die eine Vielzahl der nachfolgend aufgelisteten Komponenten erfassen können, welche bei Bränden in hoher Konzentration (je nach brennbarem Material) freigesetzt werden (Dr. Stroh und Himmelhan 2011): Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), nitrose Gase (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Chlor (Cl<sub>2</sub>), Chlorwasserstoff (HCL), Blausäure (HCN) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>). In den weiteren Unterkapiteln werden in Frage kommende kommerzielle sowie

nicht-kommerzielle Sensorsysteme einzeln dargestellt. Eine Vielzahl dieser Sensorsysteme nutzt elektrochemische, NDIR oder PID Sensoren zur Erfassung der genannten Gase. In der folgenden Tabelle 1 ist eine Übersicht einiger am Markt verfügbarer Sensoren mehrerer Hersteller, sortiert nach den messbaren Gasen, aufgelistet, um einen Eindruck über Messgrenzen und Ansprechzeiten der einzelnen Sensoren zu verschaffen.

**Tabelle 1: Übersicht einiger kommerziell verfügbarer elektrochemischer, NDIR und PID-Sensoren**

Zielgas	Hersteller	Sensor-bezeichnung	Messbereich [ppm]	Ansprechzeit	Betriebs-temperaturbereich [°C]
CO <sub>2</sub>	Alphasense	IRC-A1	0 – 5000 / 0 – 50000	< 40 s ( $T_{90}$ )	-10 – 40
	Dräger	XXS CO <sub>2</sub>	0 – 50000	< 30 s ( $T_{50}$ )	-20 – 40
CO	Alphasense	CO-CE	0 – 10000	< 75 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Alphasense	CO-CX	0 – 2000	< 40 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Dräger	XXS CO	0 – 2000	< 15 s ( $T_{90}$ )	-40 – 50
NO <sub>2</sub>	Alphasense	NO2-AE	0 – 200	< 40 s ( $T_{90}$ )	-20 – 50
	Dräger	XXS NO <sub>2</sub>	0 – 50	< 15 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
SO <sub>2</sub>	Alphasense	SO2-BE	0 – 2000	< 30 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Dräger	XXS SO <sub>2</sub>	0 – 100	< 15 s ( $T_{90}$ )	-40 – 50
Cl <sub>2</sub>	Alphasense	CL <sub>2</sub> -D4	0 – 20	< 35 s ( $T_{90}$ )	-20 – 50
	Dräger	XXS CL <sub>2</sub>	0 – 20	< 30 s ( $T_{90}$ )	-40 – 50
HCL	Alphasense	HCL-A1	0 – 100	< 300 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Alphasense	HCL-B1	0 – 100	< 200 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
HCN	Alphasense	HCN-A1	0 – 100	< 70 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Dräger	XXS HCN	0 – 50	< 10 s ( $T_{50}$ )	-20 – 50
NH <sub>3</sub>	Alphasense	NH3-B1	0 – 200	< 150 s ( $T_{90}$ )	-30 – 50
	Dräger	XXS NH3	0 – 300	< 10 s ( $T_{50}$ )	-40 – 50
VOC	Alphasense	PID-A12	0 – 200	< 3 s ( $T_{90}$ )	-40 – 55
	Dräger	PID-HC (Isobuten)	0 – 2000	< 10 s ( $T_{90}$ )	-20 – 60

### 2.1.1 AirSensEUR

Der AirSensEUR ist eine vom Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit (IES) des Joint Research Centre (JRC) entwickelte open hardware und open software multi-Sensor Plattform, die mit mehreren Sensoren zur Erfassung von Luftschadstoffen bestückt werden kann. Das System besteht aus einer Grundplatine, dem sogenannten „Host“ und kann mit bis zu 15 sogenannten „Sensor Shields“ erweitert werden. Der „Host“ beinhaltet die CPU und steuert die angeschlossenen Sensor Shields. Weiterhin beinhaltet er eine SD-Karte, auf der die Messdaten gespeichert werden. ,Tabelle 1 zeigt schematisch, wie die AirSensEUR Sensorplattform aufgebaut ist. Verschiedene Sensor Shield Typen erlauben das Einbinden unterschiedlicher Sensoren. In Tabelle 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die möglichen Sensor Shield Typen mit den entsprechenden Sensoren aufgelistet. Typ 1 erlaubt es vier elektrochemische Sensoren anzuschließen und beinhaltet weiterhin einen Bosch BMP180 Sensor zur Erfassung der Temperatur, relativen Luftfeuchte und des Luftdrucks. Auf die Sensorsteckplätze dieses Shields lassen sich je nach Wunsch bzw. Messaufgabe variabel verschiedene elektrochemische Sensoren anschließen. Möglich wären beispielsweise Sensoren der Firma Alphasense oder Citytech für die Gase NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, und CO. Es lassen sich ggf. auch Kalibrierfunktionen im Messgerät hinterlegen, wenn diese im Vorhinein durch entsprechende Vergleichsmessungen/Prüfgasbeaufschlagungen ermittelt wurden.

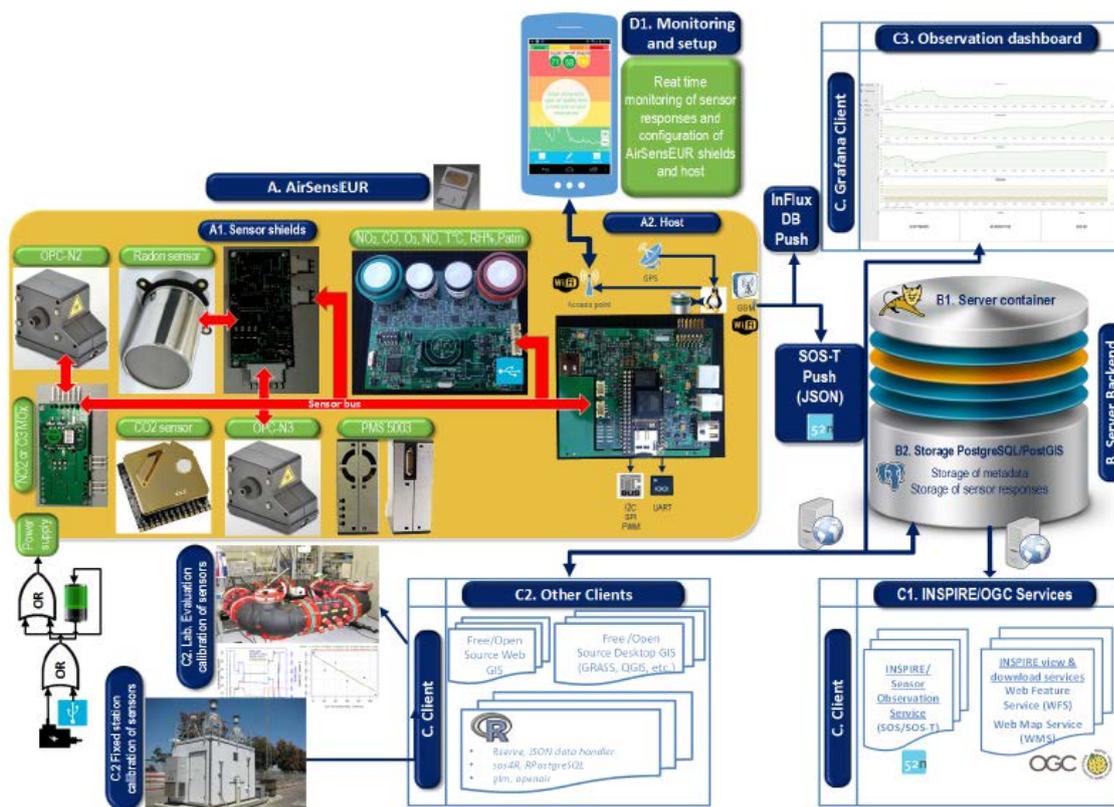
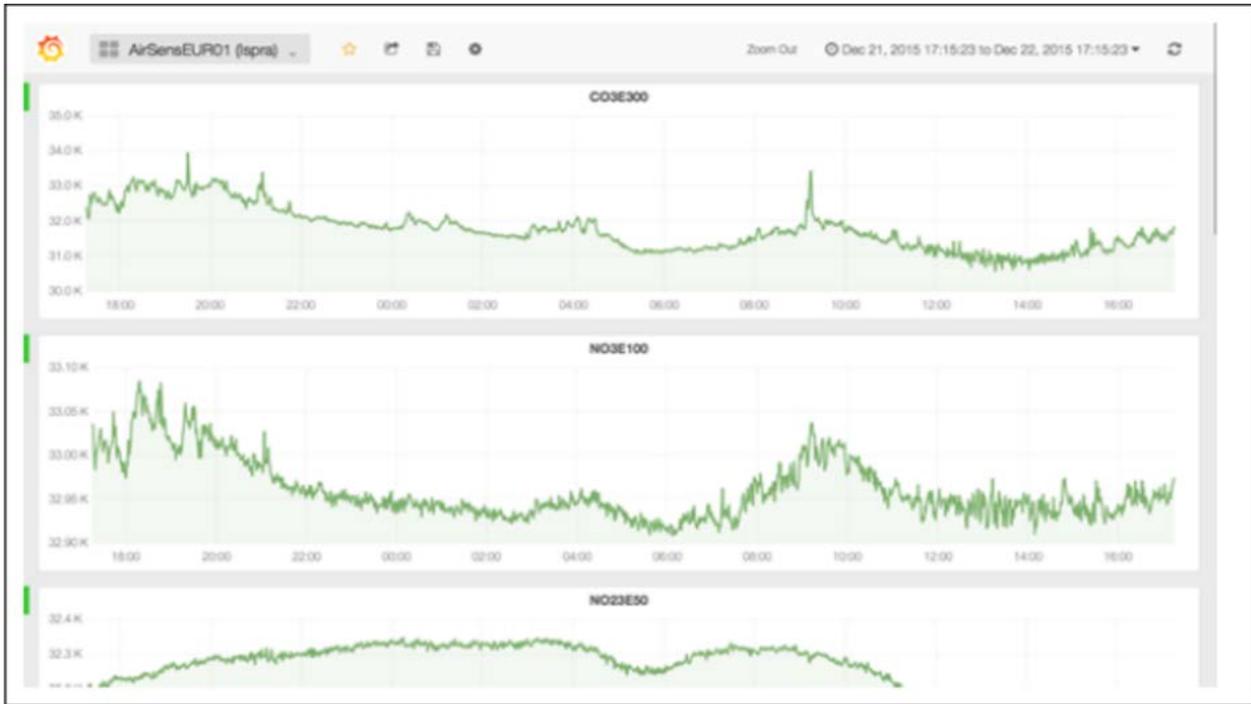


Abbildung 1: Schematische Darstellung der AirSensEUR Multisensorplattform (Quelle: (Gerboles, et al. 2018))

Tabelle 2: Anschließbare Sensor Shield Typen für die AirSensEUR Plattform und dazugehörige Sensoren

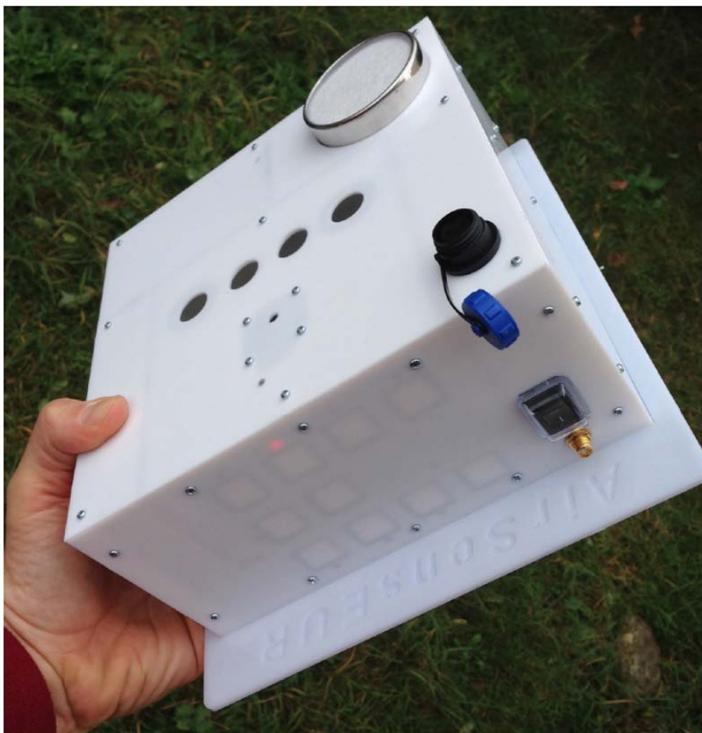
Sensor Shield Typ	Anschließbare Sensoren
Typ 1	Vier elektrochemische Sensoren + Sensor für Temperatur, rel. Luftfeuchte, Luftdruck
Typ 2	Radonsensor + ELT CO <sub>2</sub> -Sensor + Feinstaubsensor (OPC N3 und/oder Plantower PMS 5003)
Typ 3	Metalloxidsensor (NO <sub>2</sub> oder O <sub>3</sub> ) + Feinstaubsensor (OPC N2)

Die Sensorplattform ermöglicht weiterhin eine automatische Übertragung der Messdaten an einen Server entweder per Einbindung des Systems in ein WLAN-Netzwerk oder per GPRS Mobilfunknetz. Für letztere Möglichkeit muss das Gerät mit einer Sim-Karte ausgestattet werden. Die übertragenen Daten lassen sich weiterhin während der Messung graphisch visualisiert anzeigen. Dazu wird die frei verfügbare Visualisierungssoftware Grafana genutzt. Der Nutzer muss dafür zunächst ein sogenanntes Dashboard auf der Grafana Webseite einrichten, auf welches sich anschließend jederzeit zugreifen lässt. Eine beispielhafte Visualisierung dreier Messkomponenten ist in Abbildung 2 dargestellt. Um das Messsystem vor Witterungseinflüssen zu schützen, wurde weiterhin ein Gehäuse entwickelt, welches sich mithilfe eines 3D-Druckers herstellen lässt (s. Abbildung 3).



**Abbildung 2: Graphische Visualisierung der Messdaten mithilfe der Graphana Oberfläche (Quelle: (Gerboles, et al. 2018))**

Da das gesamte Messsystem als open Hardware- und open Softwareprojekt konzipiert ist, stehen dem interessierten Nutzer sämtliche Informationen zur Verfügung, um das Messsystem eigenständig nachbauen zu können.



**Abbildung 3: AirSenseEUR-Gehäuse (Quelle: (Gerboles, et al. 2018))**

### 2.1.2 Bruker RAID-MNR

Das RAID-MNR der Firma Bruker ist ein tragbares Messgerät zur Erfassung einer Reihe chemischer Kampfstoffe (CWA) und toxischer Industriechemikalien (TIC). Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Ionenmobilitätsspektroskopie (IMS) und nutzt zur Ionisation eine nicht-radioaktive Hochenergiephotoionisationsquelle (HEPI). Wie Abbildung 4 zu entnehmen ist, handelt es sich beim RAID um ein Handmessgerät, welches mit einem Gewicht von 2,9 kg für den handgetragenen, mobilen Einsatz am Boden entwickelt worden ist. Das Gewicht würde prinzipiell auch von einem UAS getragen werden können. Das RAID kann eine Vielzahl von Stoffen detektieren, welche im Hauptmenü des Gerätes innerhalb von fünf Stoffbibliotheken hinterlegt werden können. In Tabelle 3 sind die von Bruker vorgegebenen Standardbibliotheken inklusive der darin enthaltenen Messkomponenten aufgelistet.



Abbildung 4: Bruker Raid Messsystem

**Tabelle 3: Standardbibliotheken für die detektierbaren Substanzen des Bruker Raid-MNR (Quelle: alphasense.com, (Dräger Safety AG & Co. KGaA 2021))**

Bibliothek	Auf Gerätedisplay angezeigtes Symbol	Name der entsprechenden Substanz
Chemische Kampfstoffe (standard)	GA GB GD GF VX VXR HD HN3 L AC	Tabun Sarin Somam Cyclosarin VX VX Russian (VR) Senfgas Stickstofflost Lewisit Cyanwasserstoff
Chemische Kampfstoffe (erweitert)	ACK HK, HDP, HDB HNX, HN <sub>3</sub> CLX CL2	Cyanwasserstoff, Chlorcyan Senfgas Stickstofflost Chlorpikrin, Phosgen Chlor
ITF-25	AC CL <sub>2</sub> CLX CS2 ETO FAH HNO PCL SO <sub>2</sub> TX1	Cyanwasserstoff Chlor Phosgen Kohlenstoffdisulfid Ethylenoxid Formaldehyd Salpetersäure Phosphortrichlorid Schwefeldioxid Fluor, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Schwefelwasserstoff
Brandgase	AC BR <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> CLB CLX CSX DCP FAH HDZ MCP MMH NHX NO <sub>2</sub> PH PIC SO2 TDI TMA TX1	Cyanwasserstoff Brom Chlor Chloropren Phosgen Kohlenstoffdisulfid, Carbonylsulfid 2,4-Dichlorphenol Formaldehyd Hydrazin 2-Chlorphenol Methylhydrazin Anilin, 1,1-Dimethylhydrazin Stickstoffdioxid Phenol Phenylisocyanat Schwefeldioxid Toluol-2,4-diisocyanat Trimethylamin Fluor, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Schwefelwasserstoff, Tetrachlorethan

Die Stoffbibliothek „Brandgase“ enthält eine Vielzahl der eingangs aufgezählten, für die anvisierte Messaufgabe relevanten Gase und darüber hinaus weitere Komponenten, die ebenfalls bei Brandereignissen zu erwarten sind. Die Messdatenaufzeichnung erfolgt standardmäßig auf einen internen Datenlogger. Über eine serielle Schnittstelle lässt sich an das Messgerät ein Modul zur Funkübertragung anschließen, über welches die gemessenen Konzentrationsdaten zu einer Bodenstation/ auf einen Server gesendet werden können.

### **2.1.3 ION Science Tiger**

Das Messsystem „Tiger“ von der Firma Ion Science (s. Abbildung 5) ist ein tragbarer Photoionisationsgasdetektor (PID), welcher unter Anderem im Katastrophenschutz oder zur Brandursachenermittlung zur Messung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) eingesetzt wird. Es misst mit einer 10,6 eV Kryptonlampe und kann über 450 verschiedene Gase detektieren (ISM Deutschland GmbH 2020). Bei unbekannter Gaszusammensetzung ist das Ergebnis ein Summenparameter, der eine Gesamtkonzentration aller flüchtigen organischen Verbindungen beinhaltet. Bei bekannter Gaszusammensetzung könnte mithilfe eines Responsefaktors, der der Stoffliste für den Tiger entnehmbar ist, die Konzentration des bekannten Stoffes errechnet werden. Eine Kenntnis über den genauen Stoff ist in vielen Situationen, wie auch bei Störfallereignissen, jedoch oftmals nicht vorhanden. Vorteile dieses Messgerätes sind die schnelle Ansprechzeit von 1,5 s, ein weiter Messbereich bis zu 20000 ppm, sowie eine einfache Bedienbarkeit. Technische Spezifikationen des Systems sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Nachteil dieses Systems ist das Fehlen einer Schnittstelle, worüber eine Datenübertragung während des Messfluges realisiert werden könnte. Hier ist das nachträgliche Auslesen des internen Speichers die einzige Möglichkeit, um an die Messdatei zu gelangen. Während des Fluges könnte mithilfe einer Kamera das Display des Tiger gefilmt werden, um zumindest einen Eindruck über die aktuell gemessenen VOC-Konzentrationen zu erhalten.



Abbildung 5: PID-Handmessgerät Tiger der Firma ION-Science

Tabelle 4: Technische Daten des Tiger Messgerätes

<b>Gewicht</b>	720 g
<b>Abmessungen</b>	340 * 90 * 60 mm
<b>Gehäuseschutzklasse</b>	IP65
<b>Messbereich</b>	0,001 – 20000 ppm
<b>Ansprechzeit (<math>T_{90}</math>)</b>	1,5 s
<b>Kapazität des internen Speichers</b>	Bis 120000 Messwerte
<b>Betriebstemperatur- / feuchtebereich</b>	-20 – 60 °C / 0 – 99 % nicht kondensierend

#### 2.1.4 Dräger X-am 8000

Bei dem X-am 8000 handelt es sich um ein tragbares kommerzielles Mehrgasmessgerät der Firma Dräger, mit dem je nach Sensorkonfiguration, bis zu sieben verschiedene Gase gemessen werden können. Dabei stehen insgesamt fünf Steckplätze zur Verfügung, die entsprechend der Messaufgabe variabel bestückt werden können (s. Abbildung 6). Für die im Rahmen dieser Literaturstudie anvisierte Messaufgabe stehen bei der Firma Dräger mehrere elektrochemische, IR- und PID-Sensoren im Produktportfolio für die folgend aufgelisteten Komponenten zur Verfügung: CO<sub>2</sub>, CO, HCN, NO, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, VOC. Zur Messung aller aufgezählten Gase müssten zwei X-am 8000 Geräte verwendet werden, da die Steckplatzanzahl bei einem Gerät nicht ausreichen würde (ein einzelnes X-am 8000 wiegt 550 g). Dräger vermarktet zusätzlich eine Kalibrierstation (X-dock), an die sich das Gerät schnell und unkompliziert anschließen lässt und womit

sich die verbauten Sensoren überprüfen lassen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, das Messgerät mit einem LoRA-Funkmodul zu erweitern, wodurch die Daten während des Messfluges live übertragen werden könnten und z.B. auf einem Server gespeichert werden könnten.



**Abbildung 6: Sensorsteckplätze beim X-am 8000 Mehrkomponentenmessgerät (Quelle: [https://www.gasmesstechnik.de/documents/products/FotoErwGross/180000999\\_Detail%202.jpg](https://www.gasmesstechnik.de/documents/products/FotoErwGross/180000999_Detail%202.jpg))**

### 2.1.5 FLIR Muve C360

Das FLIR Muve C360 (Abbildung 7) ist ein für den Einsatz auf Drohnen speziell entwickeltes kommerzielles Gasmesssystem. Es ist mit einem PID Sensor zur Erfassung von VOC ausgestattet, einem Lower Explosive Limit Detector (LEL), welcher die untere Explosionsgrenze von brennbaren Stoffen in Mischung mit Luft bestimmen kann sowie weiteren sechs elektrochemischen Sensoren für die Gase CO, CL<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> (Flir Systems Inc 2019). Das System verfügt außerdem über eine Benutzersoftware, die eine Anzeige der aktuell gemessenen Konzentrationen aller Komponenten beinhaltet. Diese Anzeige (s. Abbildung 8) steht den Pilot\*innen während eines Drohnenfluges auf dem Tablet-Display der Funksteuerung zur Verfügung. Weiterhin werden die gemessenen Daten auf dem Tablet für nachgehende Analysen gespeichert. Zusätzlich ist eine Kalibrierstation für den Sensorblock verfügbar, mit dem die Gassensoren überprüft werden können.



Abbildung 7: FLIR Muve C360 Mehrkomponenten Gasmesssystem (Quelle: <https://www.flir.com/products/muve-c360/>)

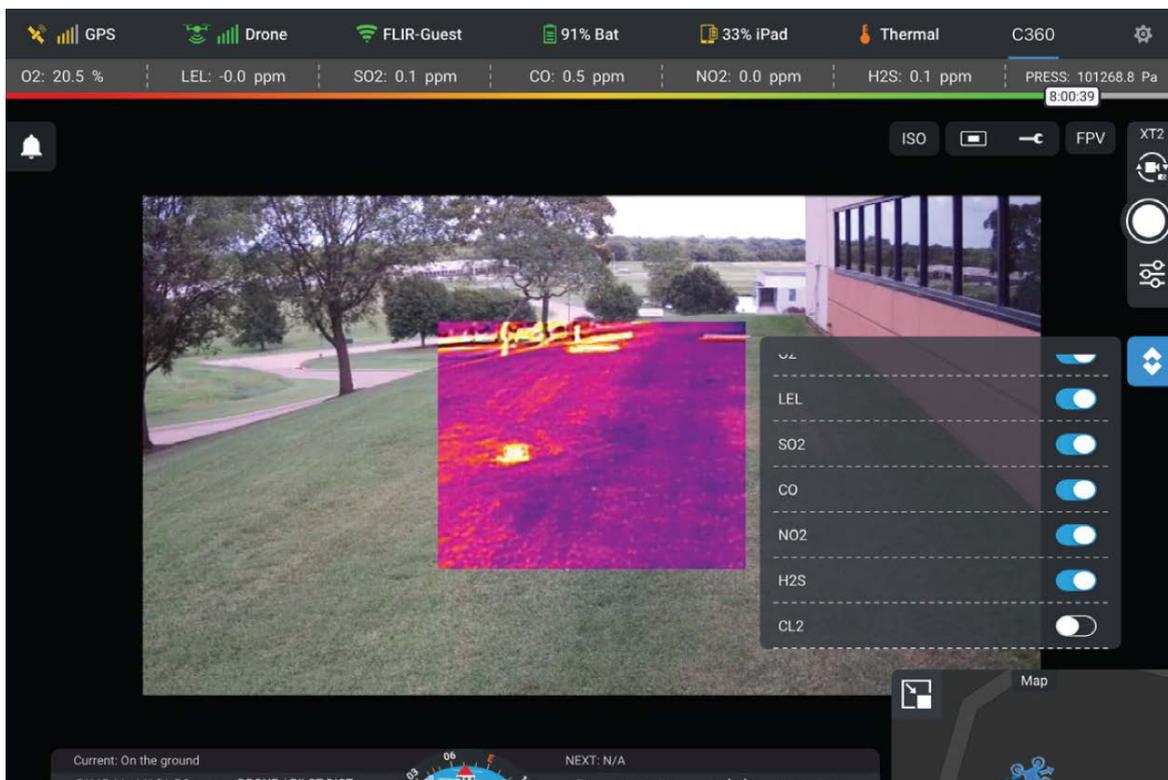


Abbildung 8: Anzeige der Messdaten während eines Fluges

### 2.1.6 WITEC optische Sensoren

Bei den Systemen der Firma WITEC handelt es sich um optische in-situ Messsysteme, welche sich aufgrund ihrer kompakten und robusten Bauweise gut für den mobilen Einsatz eignen. Die Firma WITEK Sensorik ist eine Ausgründung der Fachhochschule Dortmund, Institut für Mikrosensorik Prof. Dr. Gerhard Wiegleb. Als Messprinzip wird die nicht dispersive Absorptionsfotometrie im infraroten als auch im ultravioletten Spektralbereich verwendet.

Der infrarote Bereich erstreckt sich über einen Bereich von 1 µm und 12 µm, wodurch sich die folgenden Gase analysieren lassen: Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Ethan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), Butan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O).

Der UV Bereich liegt zwischen 200 nm und 400 nm, wodurch die folgenden Stoffe bestimmt werden können: Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Schwefelkohlenstoff (CS<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Chlor (Cl<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), Chlordioxid (ClO<sub>2</sub>).

Weitere Vorteile der Gasmesssysteme sind, dass diese modular aufgebaut sind und sich die Module entsprechend an den Bedarf der Anwendung anpassen lassen. Weiterhin sind sie relativ leicht (720 g) und kompakt (319 \* 120 \* 75 mm), haben einen Niederspannungsanschluss (15-30 V) und einen geringen Stromverbrauch von unter 2 W, wodurch sie sich optimal für einen Einsatz auf einem UAS eignen. Auch für den zeitkritischen Ernstfall sind sie mit einer schnellen Einschaltzeiten von unter einer 1 min und einer Stabilisierungszeit von weniger als 15 min gut geeignet. Als digitaler Output stehen zur Anbindung an die online-Datenübertragung gängige Schnittstellen wie RS232 oder CANbus zur Verfügung. Ein Vorteil gegenüber vielen elektrochemischen Sensoren besteht in der vergleichsweise schnelle Ansprechzeiten (T<sub>90</sub>).

Das Produktportfolio gliedert sich entsprechend in die zwei Spektralbereiche, INFRA.sens und ULTRA.sens. Diese können jedoch auch in der KOMBI.sens Produktlinie kombiniert werden. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der weiteren technischen Spezifikationen.

**Tabelle 5: Technische Spezifikationen der Gasmesssysteme der Firma WITEC**

	<b>INFRA.sens</b>	<b>ULTRA.sens</b>
Anzahl Komponenten pro Messzelle	3	2
Ansprechzeit T90	1,5 – 15 s	1,5 – 15 s
Detektionslimit (3-sigma)	< 0.5 % F.S. (full scale)	< 0,25 ppm
Linearität	< ± 1 % F.S.	< ± 0,5 % F.S.
Querempfindlichkeit	< 2% F.S.	< 2% F.S.
Einsatzbedingungen (Druck, Temp.)	600-1200 mbar, 5-45 °C	600-1200 mbar, 5-45 °C

Weiterhin bietet die Firma WITEK eine spezielle Software (MARS Multi Analyzer and Research Software) an, mit welcher sich aktuelle Messwerte numerisch, sowie als Graphen aufbereitet darstellen und speichern lassen. Ebenso können hier alle momentanen Geräteparameter eingesehen werden. Zusatzfunktionen wie die manuelle Überprüfung und Festlegung des Nullpunktes sowie die Hinterlegung eigens erstellter Kalibrierdaten sind ebenso möglich.



**Abbildung 9: Übertragungsschema und Kommunikation zwischen Messgerät und MARS Software (Quelle: WITEC Sensorik)**

### 2.1.7 US EPA Kolibri

Das „Kolibri“-Messsystem ist eine nicht-kommerzielle Entwicklung der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency), welches für den Einsatz auf Drohnen und zur stationären, bodenbasierten Messung konzipiert wurde. Der Einsatzbereich erstreckt sich von Messungen bei Waldbränden, landwirtschaftlichen Bränden oder zur Detektion von industriellen Abgasfahnen (B. Gullett 2021). Bei dem System handelt es sich um ein Schuhkarton-großes aus Carbonplatten gefertigtes Gehäuse, welches mit einer großen Bandbreite an Sensoren verschiedener Hersteller wie SenseAir oder Alphasense bestückt werden kann (s. Abbildung 10). Diese umfassen unter anderem die Komponenten CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, VOC, PM<sub>x</sub> und Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs). Die Datenerfassung ist mithilfe von Arduino-basierter Mikroprozessortechnik realisiert. Eine Datenübertragung an die Bodenstation wurde im Rahmen von Studien durch die EPA mithilfe eines XBee S3B Moduls der Firma Digi International umgesetzt. Seit 2016 wurde das Multi-Komponenten Messgerät innerhalb von 16 Messkampagnen eingesetzt (z.B. (Aurell, et al. 2017), (Gullett, et al. 2021)). Da es sich bei diesem System um eine eher forschungsorientierte Entwicklung handelt, ist es nicht kommerziell verfügbar. Weiterhin sind, anders als beim AirSenseEUR System, keine Open-Source Hardware oder Open-Source Software Komponenten verfügbar.



**Abbildung 10: Kolibri-Messsystem verbaut unter einem DJI M600 Hexacopter (oben) und mit geöffneter Seitenansicht (unten)**

### **2.1.8 AQ Mesh**

Das AQMesh ist eine Entwicklung der Cambridge University aus der Arbeitsgruppe rund um Prof. Rod Jones. Abbildung 11 zeigt das AQMesh. Das System wurde als kompaktes und kostengünstiges Multi-komponentenmesssystem entwickelt mit dem Ziel in einer Stadt an vielen Stellen Messungen durchzuführen. Das System soll ergänzend zu den offiziellen Messstellen der Umweltämter zum Einsatz kommen und somit die Luftqualität mit einer höheren räumlichen Auflösung abzubilden. Das System nutzt Mobilfunk zum Transfer der Rohdaten zum Cloud-Server.



**Abbildung 11: AQMesh mit Antenne zum Datentransfer**

Das AQMesh misst dabei über elektrochemische Sensoren NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, über einen NDIR Sensor CO<sub>2</sub> und mit einem optischen Partikelzähler PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> und PM<sub>1</sub>. Zusätzlich können auch meteorologische Parameter wie Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und die Windrichtung erfasst werden.

Die folgende Tabelle zeigt die technischen Spezifikationen.

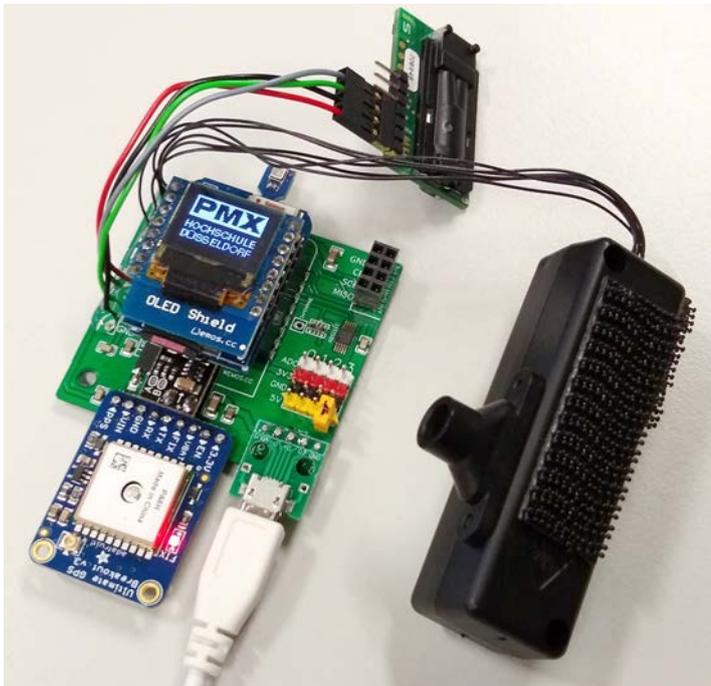
**Tabelle 6: Technische Spezifikationen des AQMesh**

<b>Gewicht</b>	2 - 3 kg
<b>Abmessung</b>	22 * 25 * 17 cm
<b>Gehäuse Schutzklasse</b>	IP65
<b>Stromversorgung</b>	9- 24 V DC
<b>Temperatur-/ Luftfeuchtebereich</b>	-20 – 40 °C / 15—95 % RH

### 2.1.9 HSD UMT Multisensorplattform „PMX“

Die hier vorgestellte modulare Multisensorplattform ist eine ständig wachsende Eigenentwicklung des Labors für Umweltmesstechnik (UMT). Das System ist sowohl für mobile als auch stationäre Untersuchungen ausgelegt und kann über Batterie (Akku), Powerbank, Netzteil oder Photovoltaik versorgt werden. Der Energiebedarf liegt, abhängig von seiner Ausbaustufe, bei rund 1 W bis ca. 3 W. Das Kernsystem (ohne Gehäuse) wiegt rund 20 g. Dieses System wurde bereits in vielen Applikationen sowohl stationär als auch mobil auf unterschiedlichen Plattformen (UAS, Fahrräder, Kfz) erfolgreich eingesetzt.

Die folgende Abbildung 12 zeigt das System ohne Gehäuse und in einer Ausbaustufe mit einem Feinstaubsensor, einem CO<sub>2</sub>-Sensor sowie dem im Kernsystem verbauten Klimasensor, Speicherkarte, Display, Schnittstellen und GPS-Modul.



**Abbildung 12: Grundplatine des Multisensormoduls mit angeschlossenem CO2-Sensor und einem optischen Partikelzähler**

Abbildung 13 zeigt das oben beschriebene System mit einem Telemetriesystem zur Echtzeitübertragung der Daten. Das System ist aus Gründen der Gewichteinsparung ohne Gehäuse auf einem UAS (DJI Mavic2 Pro) montiert. Es dient hier der orientierenden Untersuchung von Aerosolen, die von Binnenschiffen emittiert werden. Dabei werden die Feinstaubkonzentrationen an eine Bodenstation in Echtzeit übertragen und graphisch auf einem Display dargestellt.



**Abbildung 13: Sensorsystem auf einer DJI Mavic2 Pro montiert**

Eine weitere Modifikation des Sensorsystems ist in Abbildung 14 zu sehen, bei der zusätzlich zum optischen Partikelzähler ein PID-Sensor der Firma Alphasense zur Erfassung von VOC an das System angeschlossen ist. In diesem Fall wurde ein DJI M200 zur flächigen Kartierung von VOC-Konzentrationen im ppb Konzentrationsbereich eingesetzt.



**Abbildung 14: UMT-Sensorsystem mit angeschlossenem VOC-Sensor (Alphasense) auf einer DJI M200 Drohne**

Das Kernsystem besteht aus einem Prozessor, einem GPS-Modul, einem Temperatur-/ Feuchte-/ Luftdrucksensor, einem Micro-SD Kartenschacht und einem OLED-Display. An dieses Kernsystem sind verschiedene Sensoren integrierbar. Diese können über I2C- Schnittstelle und an bis zu vier Analogeingänge angeschlossen werden.

Die mit diesem System gemessenen Daten werden grundsätzlich auf eine Micro-SD Karte geschrieben. Sobald das System eingeschaltet wird, beginnt die Datenaufzeichnung. Daten wie Höhe, Länge Breite, Geschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck werden auch ohne angeschlossene externe Sensoren gespeichert, da sie vom Kernsystem erfasst werden. Ein Übertragen der Daten per Funkstrecke ist realisiert und bereits mehrfach erfolgreich beim Auffinden von sog. Hotspots angewendet worden.

Eine weitere Möglichkeit, zusätzlich zur automatischen Speicherung auf einer Speicherkarte, ist die Übertragung der Daten per Funkstrecke an ein Display, welches auch bei voller Sonneneinstrahlung ablesbar ist. Hier können bis zu 6 Kanäle numerisch und ein beliebiger Kanal wahlweise graphisch dargestellt werden. Die Funkstrecke ist mit einer Reichweite von  $> 2$  km getestet worden. Eine weitere Option ist die Übertragung der Daten per WLAN. Das ermöglicht das Speichern der Daten auf einem Server oder die direkte Anzeige der Messdaten z.B. auf einem Mobiltelefon.

Die Übertragung der Daten per Iridium Satellitenverbindung sowie per Mobilfunknetz ist möglich. Eine Kombination beispielsweise aus Funkstrecke parallel mit Iridiumverbindung ist denkbar, jedoch noch nicht vom Labor für Umweltmesstechnik in dieser Kombination erprobt worden.

Nachfolgend sind mögliche Gaskomponenten verschiedener Sensortechnologien (PID, NDIR, elektrochemisch, Metalloxidsensoren, photoakustisch) aufgelistet, die mit diesem System betrieben werden können:

Ammoniak, Salzsäure, Cyanid, Schwefelwasserstoff, Chlor, Stickstoffoxide, Phosphin, Schwefeldioxid, Kohlenstoffmonoxid, Ethylen, VOC, Wasserstoff, Feinstaub und einige weitere.

Es sind zudem Messsysteme anderer Hersteller, deren Daten per RS232 ausgegeben werden, mit dem PMX- System kombinierbar. Vom Labor für Umweltmesstechnik wurde in diesem Zusammenhang bspw. ein optisches Partikelspektrometer der Firma Grimm Aerosoltechnik mit der Multisensorplattform verbunden.

Eine modulare Lösung, wie sie die hier vorgestellte PMX-Multisensorplattform bietet, ist generell für den Einsatz durch Krisenkräfte geeignet, jedoch bedarf es der detaillierten Absprache, welche Komponenten gemessen werden sollen und welche ggf. existierende Geräte eingebunden werden können. Die Handhabbarkeit kann vom Labor für Umweltmesstechnik so einfach wie möglich gestaltet werden. Beispielsweise könnte ein Gehäuse gefertigt werden, das alle erforderlichen Sensorkomponenten enthält sowie einen AN/AUS- Schalter, eine Ladebuchse und ein kleines Display, welches den Status anzeigt. Das System wäre von der verwendeten Plattform unabhängig und kann auf UAS eingesetzt werden. Erweiterungen, die über das hier beschriebene System hinausgehen, sind denkbar.

## **2.2 Recherche kommerzieller UAS**

Im Rahmen der Recherche kommerzieller UAS mit Vorschlag eines für die vorgesehene Messaufgabe geeigneten Systems müssen viele Kriterien untersucht werden. Im günstigsten Fall begrenzt sich die Auswahl durch Erfüllung und Nichterfüllung der Anforderungen am Ende des Kapitels auf wenige Systeme. Zusätzlich zur Auswahl eines UAS werden in weiteren Kapiteln einige Systemkomponenten wie beispielsweise die Datenübertragung gesondert betrachtet, ohne Einfluss auf die Wahl des UAS zu haben. Da es sich bei diesen Komponenten meist um nicht kommerzielle Peripheriegeräte handelt, müssen diese für sich selbst bewertet werden.

### **2.2.1 Art des Fluggerätes**

In diesem Kapitel wird die Art des Fluggerätes bestimmt werden. Obgleich die Auswahl eindeutig zu sein scheint, müssen – wie bei jedem weiteren Auswahlprozess in den folgenden Kapiteln – alle Optionen aufgeführt und nichtzutreffende Systeme durch vorgegebene Kriterien ausgeschlossen werden. Folgende Arten von Systemen werden auf Tauglichkeit unter Berücksichtigung der Vorgaben untersucht:

- Copter
- Multicopter
- Flächenflieger
- Hybride VTOL (Vertikal Take Off Landing)
- Aerostat

Copter und Multicopter unterscheiden sich durch die Anzahl der in einer Ebene angeordneten Propeller. Ab einer Zahl von zwei Antriebspropellern in einer Ebene spricht man von Multicoptern. Unter hybriden VTOL Systemen sind Flächenflieger zu verstehen, welche in der Lage sind senkrecht zu starten und zu landen. Im weiteren Verlauf des Berichtes werden diese mit dem umgangssprachlich genutztem Begriff VTOL abgekürzt. Fachlich korrekt ist unter VTOL jedes senkrecht startende und landende UAS einzugliedern. Ein Aerostat erzielt den größten Teil seines Auftriebes durch die Füllung eines Gases, dessen Dichte geringer als die der Luft ist. Da alle Systeme autark durch einen Computer oder manuell von einem Piloten

aus gesteuert werden können, fallen sie unter die Rubrik der UAS. Einige Coptersysteme sind zudem als kabelgebundene Versionen erhältlich und sollen so nahezu unbegrenzte Flugzeiten ermöglichen. Diese finden im weiteren Verlauf jedoch keine Beachtung, da Ihre Flughöhe und Reichweite zu stark durch die Versorgungsleitungen eingeschränkt sind. In den folgenden Abbildungen werden die verschiedenen Arten der untersuchten UAS beispielhaft dargestellt.



**Abbildung 15: Arten von UAS, (Quellen: [www.dji.com](http://www.dji.com), [bluebird-uav.com](http://bluebird-uav.com), [www.wingcopter.com](http://www.wingcopter.com), [cleanpng.com](http://cleanpng.com))**

Für die Auswahl genügen bereits einige Kriterien, welche für die Gefahrenabwehrkräfte von großer Bedeutung sind. So muss die Möglichkeit eines Vertikalaufstieges gegeben sein, die Vorbereitungszeit zum Starten des UAS sollte sehr gering sein und die Wahl des Start- und Landepunktes darf nicht maßgeblich durch Hindernisse beeinflusst werden. In der Tabelle 7 werden diese und weitere Kriterien gewichtet und anschließend der Erfüllungsgrad bestimmt. Bei zukünftigen Projekten können die Kriterien beliebig ergänzt und gewichtet werden.

**Tabelle 7: Bewertungskriterien für die Art des Fluggerätes**

Kriterien	Beschreibung
Vertikalaufstieg	Möglichkeit einer vertikalen Flugstrecke. Eine hohe Bewertung beschreibt die bestmögliche Beschaffenheit hierfür.
Start / Landung	Hindernisse im Bereich des Start- und Landeplatzes. Eine hohe Bewertung lässt eine höhere Zahl an Hindernissen in der Nähe zu.
Nachtflugtauglichkeit	Nachteile durch den Flug bei Nacht. Eine hohe Bewertung spricht für weniger Nachteile.
Verpackungsgröße	Benötigter Stauraum für Gefahrenabwehrkräfte. Eine hohe Bewertung steht für geringeren Platzbedarf.
Pilotenskills	Ausbildungsgrad der Fernpiloten. Eine höhere Bewertung verlangt weniger fliegerisches Können.

Kriterien	Beschreibung
Flugzeit	Angabe über Verweildauer in der Luft. Eine hohe Bewertung bedeutet längere Flugzeit.
Windwiderstand	Angabe über die maximal zulässige Windgeschwindigkeit. Eine hohe Bewertung steht für eine höhere Windgeschwindigkeit.
Montage Payload	Aufwand bezüglich der Befestigung der Payload. Eine hohe Bewertung bedeutet geringeren Aufwand.
Schwebeflug	Möglichkeit in der Luft auf der Stelle schweben zu können. Eine hohe Bewertung beschreibt die bestmögliche Beschaffenheit hierfür.
Geschwindigkeit	Beschreibt die eigene Fluggeschwindigkeit unabhängig vom Wind. Eine hohe Bewertung bedeutet eine höhere Geschwindigkeit.

In der folgenden Bewertungsmatrix werden alle vorliegenden Alternativen hinsichtlich gewichteter Kriterien bewertet (Budgahl 1990). Die Auswahl der Art des UAS fällt anschließend auf das System mit der höchsten Summe der gewichteten Teilzielerfüllungen.

**Tabelle 8: Bewertungsmatrix zur Bestimmung der Art des Fluggerätes (GITTA kein Datum)**

Bewertungskriterien	Gewichtung g (g) $\sum = 100$	Copter / Multicopter		Flächenflieger		VTOL		Aerostat	
		n	n*g	n	n*g	n	n*g	n	n*g
Vertikalaufstieg	14	9	126	3	42	7	98	6	84
Start / Landung	13	9	117	6	78	8	104	8	104
Nachtflugtauglichkeit	12	7	84	6	72	6	72	7	84
Verpackungsgröße	11	7	77	5	55	5	55	3	33
Pilotenskills	11	9	99	6	66	7	77	6	66
Flugzeit	10	5	50	8	80	7	70	9	90
Windwiderstand	8	7	56	6	48	6	48	2	16
Montage Payload	8	6	48	4	32	4	32	6	48
Schwebeflug	7	9	63	0	0	8	56	9	63
Geschwindigkeit	6	7	42	9	54	9	54	2	12
Summe	100	762		527		666		600	
Rang		1		4		2		3	

g = Gewicht eines Teilziels im Verhältnis zu den anderen Teilzielen

n = Beurteilungsnote (hier: 0 - 9)

n \* g = gewichtete Teilzielerfüllung der Lösungsvariante

Summe = Summe der gewichteten Teilziele je Alternative

Rang = Rang, basierend auf der Summe der gewichteten Teilziele

Die Wahl für die Art des UAS fällt somit in diesem speziellen Fall unter den gegebenen Vorgaben auf Copter und Multicopter. Um hier ebenfalls eine Festlegung treffen zu können bedienen wir uns im folgenden Kapitel einer ausführlichen Studie des Institutes für Flugsystemtechnik des DLR aus Braunschweig.

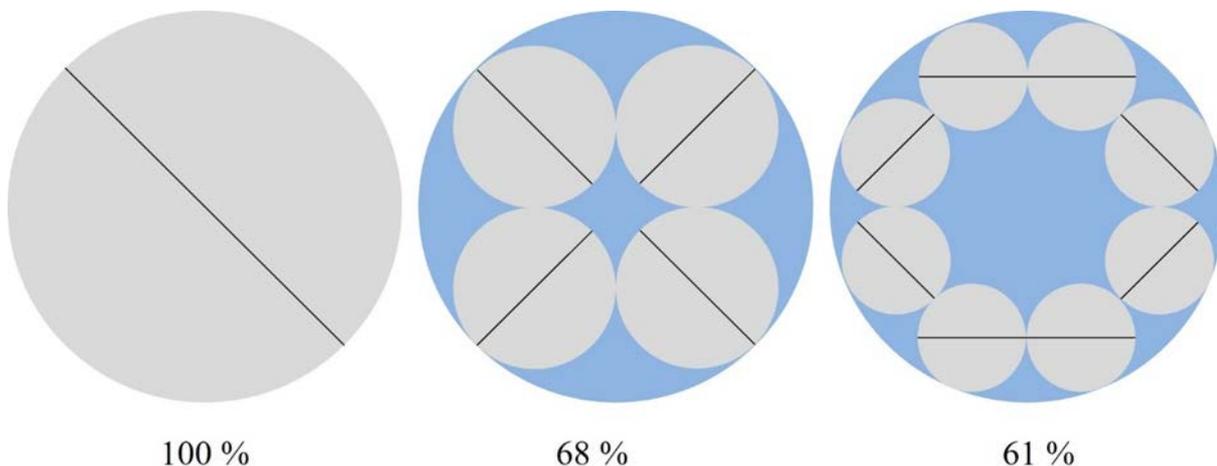
## 2.2.2 Hubschrauber (Copter) oder Multicopter

Unter Multicoptern versteht man bemannte oder unbemannte Luftfahrzeuge, die über mehrere in einer Ebene angeordnete, senkrecht oder annähernd senkrecht, nach unten wirkende Propeller benutzen, um Auftrieb und durch Neigung der Rotorebene auch Vortrieb zu erzeugen. Durch den Einsatz leichter, leistungsfähiger, bürstenloser Elektromotoren, Antriebsakkus mit hoher Energiedichte und stetig besser werdender Flugsteuerungssysteme entsteht ein System, welche sich in kürzester Zeit sowohl im Privatsektor auch als im professionellen kommerziellen Segment etabliert hat. Verglichen werden sollen hier drehzahlgesteuerte Multicopter mit starren Rotoren und Elektroantrieb gegenüber dem elektrisch betriebenen Hubschrauber (Copter, hier: Helicopter) mit Taumelscheibensteuerung und Heckrotor.

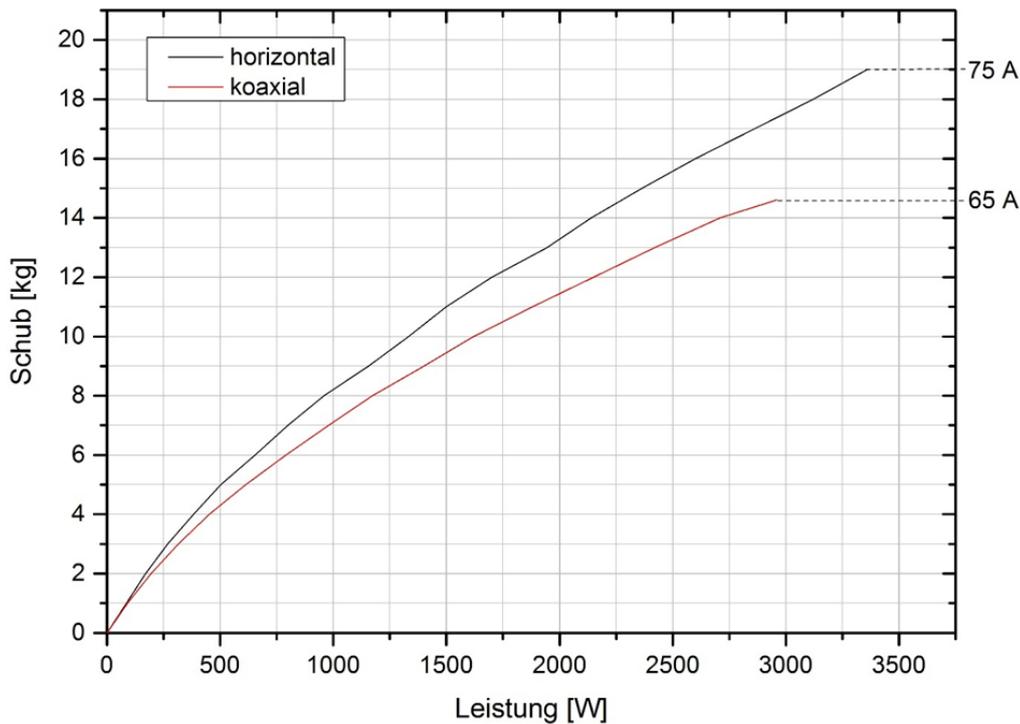
Unter der Berücksichtigung von Aspekten wie dem Aufbau der Systeme, verwendeter Komponenten (Energiespeicher und Motoren), Aerodynamik (Bodeneffekt, Leistungspolare, Wirbelringstadium, Strahltheorie, optimierte Rotorgeometrie, Drehzahlabhängigkeit der Effizienz, Trägheit der Rotoren, Getriebeeinfluss und Blattschlägen), Flugmechanik, Flugregelungen, Missionen und dem Einsatzspektrum ergeben sich folgende nennenswerte Vorteile für Multicopter gegenüber Hubschraubern (Strickert 2016):

- Unkomplizierterer Aufbau
- Elektronische Leistungsdichte ist heute bereits hoch genug für lange Flugzeiten
- Einfachere Bedien- und Steuerbarkeit
- Höhere Alltagstauglichkeit
- Günstigere Anschaffungspreise
- Besser geeignet als universale Trägerplattform

Der einzige nennenswerte Nachteil einer Multicopterkonfiguration gegenüber einer Hubschrauberkonfiguration ist die Effizienz. Hierfür gibt es zwei Gründe. Die projizierte auftriebserzeugende Propellerfläche bei gleicher Baugröße ist größer, je weniger Propeller verbaut werden. Abbildung 16 zeigt hierfür die Propellerfläche der Konfigurationen mit einem, vier und acht Propellern. Des Weiteren steigt der erzeugte Schub eines Propellers nicht linear mit der Drehzahl an. Kleine Propeller müssen demnach schneller drehen, um den gleichen Auftrieb zu erzeugen und sind somit weniger Effizienz (siehe Abbildung 17).



**Abbildung 16: Projizierte Propellerfläche / Packungsdichte bei unterschiedlicher Propelleranzahl**



**Abbildung 17: Schub über Leistung / Drehzahl**

Abbildung 17 zeigt den nicht linearen Anstieg des Auftriebes mit steigender Drehzahl. Der Versuchsaufbau wurde gleichzeitig genutzt, um die Effizienz eines koaxial angeordnetem Propellerpaares zu untersuchen.

Der Vergleich der beiden Konfigurationen zeigt, dass für den genannten Einsatzzweck die Vorteile eines Multicopters überwiegen. Besonders die einfache Handhabung und Möglichkeit der Messtechnikimplementierung sprechen für die Wahl dieser Konfiguration.

### 2.2.3 Auswahl der Multicopterkonfiguration

Nach der Empfehlung der Multicopterkonfiguration muss noch eine weitere Wahl getroffen werden. Bezüglich der Anordnung der Propeller gibt es fünf gängige Systeme, welche kommerziell angeboten werden:

- Quadcopter
- Hexacopter
- Hexacopter, Y6
- Octocopter
- Octocopter, X8

Darüber hinaus gibt es noch Bicopter, Tricopter, Dodecacopter und weitere Exoten, welche aufgrund ihres seltenen Einsatzes und geringen kommerziellen Verfügbarkeit nicht weiter untersucht werden. Die Vor- und Nachteile einer jeden Konfiguration lassen sich sehr einfach zusammenfassen. Je höher die Anzahl der Propeller / Motoren ist, desto ausfallsicherer sind diese Systeme im Allgemeinen. Wichtig ist hierbei, dass ein System dazu entwickelt sein muss eine defekte Antriebseinheit zu kompensieren. So ist ein Hexa- oder Octocopter nicht zwangsläufig redundant, sollte ein Antrieb ausfallen. Bei gleicher Startmasse weisen Copter mit höherer Antriebszahl eine größere Bauform auf. Bei identischer Baugröße eine entsprechend kürzere Flugzeit oder geringer Startmassen. An dieser Stelle sei jedoch gesagt, dass es bei den mehr als 1.400 Flügen durch das Labor für Umweltmesstechnik mit kommerziell gefertigten Multicoptern nicht zu einem Absturz oder Beinahe-Absturz gekommen ist – anders als bei den selbstgefertigten Systemen. Das

Argument der Ausfallsicherheit wird von kleinen Drohnenmanufakturen immer noch sehr gerne verwendet, verliert mit dem hohen Fertigungsstandard der großen Hersteller jedoch an Bedeutung. Unter Berücksichtigung der Faktoren Flugzeit und Verpackungsgröße für die angegebenen Einsatzszenarien empfehlen wir daher den Einsatz eines Quadrocopters. Auf die maximale Zuladung hat diese Empfehlung keinen weiteren Einfluss, da es Systeme in dieser Konfiguration in nahezu jeder beliebigen Leistungsklassen gibt. Sollte der Aspekt der Sicherheit den Einsatz eines Quadrocopters nicht zulassen, empfehlen wir hier den Einsatz eines kommerziellen Fallschirmsystems. Mit Einbußen in der Flugzeit jedoch identischer Baugröße könnte ebenfalls ein Octocopter mit koaxialer Propelleranordnung zum Einsatz kommen. Ausgewählte Quadrocopter können allerdings auch noch mit drei Antriebseinheiten unter der Verwendung spezieller Algorithmen eine Sicherheitslandung durchführen.

#### **2.2.4 Auswahl eines geeigneten Systems**

Da sowohl die Art des UAS als auch die Konfiguration feststeht, muss nun ein Hersteller und ein Modell für die beschriebenen Einsatzszenarien festgelegt werden. Um die Auswahl ein wenig einschränken zu können macht es an der Stelle Sinn, sich nach der maximal zu tragenden Payload zu richten. Entsprechend der zur Verfügung stehenden Sensorkonfigurationen aus dem AP1 sollte der Multicopter bis zu 2,7 kg tragen können. Viel größer sollte die mögliche Zuladung nicht sein. Zwar lassen sich die Messsysteme auch mit hierfür überdimensionierten UAV tragen, allerdings überwiegen die Nachteile, sollten die Drohnen nicht für weitere Szenarien eingesetzt werden, bei denen eine höhere Tragkraft erforderlich ist. Um eine Eingrenzung der Hersteller vornehmen zu können, werden zunächst die größten Hersteller ziviler UAV begutachtet. Laut der Statista GmbH waren dies im Jahr 2017 die folgenden Unternehmen ( Statista GmbH kein Datum):

- DJI, 2.830 mio. USD Umsatz
- Parrot, 173 mio. USD Umsatz
- 3D Robotics, 22 mio. USD Umsatz (Umsatz 2014, im Jahr 2017 nicht mehr gelistet)

Des Weiteren werden nach einer ausführlichen Beratung durch den deutschen Drohnen-Dienstleister Spectair folgende Hersteller ebenfalls der Auswahl hinzugefügt. Dabei sei gesagt, dass mindestens ein System jeder der genannten Unternehmen vom Labor für Umweltmesstechnik geflogen oder am Boden begutachtet werden konnte.

- Acecore Technologies
- Watts Innovations
- Freeflysystems
- Yuneec Electric Aviation

Darüber hinaus hat das Labor für Umweltmesstechnik im Rahmen der Recherchen weitere UAS anderer Hersteller bewertet. Das diese hier nicht aufgeführt werden hat den Grund, dass die neusten Systeme der Hersteller zu alt sind und somit nicht dem Stand der Technik entsprechen. Konkret bedeutet dies, dass die betrachteten UAS Modelle älter als zwei Jahre sind oder Flugzeiten mit Leergewicht von unter 40 Minuten aufweisen.

Im Folgenden wird eine Kaufempfehlung samt detaillierter Merkmale des UAV aufgeführt. Zusätzlich werden noch drei Alternativen dargestellt. Die Alternativen dienen dem Zweck bei zukünftigen Szenarien mit abweichenden Bedingungen eine möglichst schnelle Wahl treffen zu können.

### **Kaufempfehlung: DJI M300 RTK**

Der DJI Matrice RTK ist die neueste kommerzielle Drohnenplattform aus dem Hause DJI. Mit bis zu 55 Minuten Flugzeit, einer Payload von 2,7 kg, Kollisionssensoren an jeder Seite und fortschrittlicher Funktionen im Bereich der künstlichen Intelligenz setzt der M300 neue Standards im Drohnensegment. Das System überwiegt vor allem durch seine Alltagstauglichkeit und der hohen Zahl an Sicherheitsfunktionen. Auch wenn die Einsatzkräfte stets gut ausgebildet sein sollten, erleichtert der M300 den Fernpiloten und Operatoren die Arbeit. Im Flug macht das UAV genau das, was es soll: Es steht sicher und fest in der Luft, auch bei starken Böen. Hier stehen dem M300 die anderen getesteten Systeme allerdings in nichts nach. Unter dem Gesichtspunkt der Nutzerfreundlichkeit bietet der DJI M300 jedoch einige Vorteile gegenüber der anderen Systeme. Vom Aufstellen bis zum Start sind es nur wenige Handgriffe. Das intelligente Batteriemanagementsystem konnte für lange Einsätze ebenfalls gut punkten. Es gibt einen transportablen 230 V Ladekoffer, welcher 4 Akkupaare aufnehmen kann und dabei die Akkus stets so auflädt, dass keine langen Wartezeiten entstehen. Hierbei werden zusätzlich die Temperaturen aller Akkus nach einem Flug überwacht, um die Akkus zu schonen und eine lange Lebenszeit zu ermöglichen. Der Einsatz einer zweiten Fernbedienung ist standardmäßig vorgesehen. So kann es einen extra Kameraoperator geben oder ein zweiter Pilot übernimmt von einem anderen Standort aus die Flugsteuerung. Diese Funktion ist zwar nicht neu, allerdings schafft es DJI diese Funktion auch in der Software so gut zu integrieren, dass das Risiko durch Anwenderfehler stark reduziert wird. Der M300 überzeugt ebenfalls durch seine Flugzeit und der Möglichkeit, Payload ohne großen Aufwand integrieren zu können.



**Abbildung 18: DJI M300 RTK mit Payload oberhalb und unterhalb des Multicopters (DJI kein Datum)**

Die im Gehäuse fest installierten Gewinde für Gimbalapplikationen können ideal für das Befestigen jeder gewünschten Last genutzt werden. Die hierdurch möglicherweise Verdeckten Abstandssensoren lassen sich bequem in der Software deaktivieren. Das System bietet eine Reihe von SDK Erweiterungsanschlüssen auf der Ober- und Unterseite der Drohne. Diese können externe Geräte mit 24 V, 17 V und 13, 6 V bei 4 A und einer Gesamtleistung von 180 W versorgen. Ohne bereits die Datenübertragungstechnik der

Sensorik ansprechen zu wollen, bietet die überragende Qualität der Bildübertragung ebenfalls die Möglichkeit, die Displays der Messtechnik abzufilmen und via HDMI oder WLAN in ein Einsatzfahrzeug zu übertragen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten technischen Daten des DJI M300 RTK zusammengefasst:

**Tabelle 9: Technische Daten DJI M300 RTK (DJI kein Datum)**

<b>Abmessungen</b>	Mit ausgefalteten Propellern und Landegestell: 810 × 670 × 430 mm
<b>Gewicht</b>	6,3 kg
<b>Max. Abfluggewicht</b>	9 kg
<b>Max. Reichweite</b>	15 km
<b>Betriebstemperatur</b>	-20 °C bis 50 °C
<b>Max. Flugzeit</b>	55 min (keine Zuladung)
<b>Max. zulässige Windgeschwindigkeit</b>	15 m/s
<b>Schutzart</b>	IP45
<b>Max. Flughöhe</b>	7.000 m
<b>Schwebegenauigkeit</b>	Vertikal: ±0,1 m, Horizontal: ±0,3 m
<b>Betriebsfrequenz</b>	2,4000 - 2,4835 GHz; 5,725 - 5,850 GHz
<b>Strahlungsleistung (EIRP)</b>	2,4 GHz: ≤ 26 dBm (NCC/FCC); ≤ 20 dBm (CE/MIC); ≤ 20 dBm (SRRC) 5,8 GHz: ≤ 26 dBm (NCC/FCC); ≤ 14 dBm (CE); ≤ 26 dBm (SRRC)

Durchforstet man das Internet nach Contras für das System stößt man immer wieder auf die Gegner in der Drohnen-Community, welche Systeme des besagten Herstellers einzig aufgrund ihrer Herkunft aus China ablehnen. Anderen geht der erlaubte Eingriff in Funktionen und die Flugsteuerung nicht tief genug. Das Labor stuft im Rahmen dieser Arbeiten beide Argumente als unkritisch ein. Es ist nicht auszuschließen, dass gesammelte Daten des Systems übermittelt werden. Für besagte Szenarien stellt das Übermitteln von Daten (Telemetriedaten, Fotos, etc.) jedoch keinen Nachteil dar. Gleiches kann bei Herstellern anderer Länder ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Bezüglich des Eingriffs in die Software des M300 bietet der Hersteller mit seinen Software Developer Kits Entwicklern die Möglichkeit, relativ einfach auf standardisierte Funktionen seiner Produkte zuzugreifen. Für die Einsatzkräfte steht jedoch die einfache und vor allem sichere Handhabung im Vordergrund. Zwei weitere entscheidende Vorteile des Herstellers sind folgende: DJI verkauft 77 % aller zivil genutzten Drohnen (Handelsblatt 2020). Händler und Servicepartner gibt es mehr als von jedem anderen Hersteller. Ersatzteile oder ein Geräte austausch lassen sich deutlich schneller abwickeln als bei kleineren Händlern. Die hohe Anzahl an produzierten Drohnen ist nur mit einer maschinellen Serienfertigung möglich und bietet den höchsten Fertigungsstandard, der uns bekannt ist. Ein weiterer Vorteil ist das große Produktportfolio des Herstellers. Sollten die Einsatzkräfte den Flugpark einmal aufstocken wollen, bietet DJI sowohl größere als auch kleinere Systeme an. Die Piloten unter den Einsatzkräften müssten sich somit nicht neu einarbeiten und können instinktiv andere Geräte des Herstellers fliegen. Das Labor für Umweltmesstechnik verfügt genau aus diesem Grund über sieben Geräte aus dem Hause DJI. Obwohl noch drei weitere Systeme für Spezialanwendungen genutzt werden, bieten die DJI Geräte die unkomplizierteste Ergänzung einer universellen Messgeräteplattform. Im Rahmen der Berichterstellung wurde aus den hier aufgeführten Gründen ein zweiter DJI M300 RTK für das Labor erworben.

Ein weiterer Vorteil des Matrice 300 RTK, welcher nicht mit in die Bewertung eingeflossen ist, jedoch für die Einsatzkräfte von großer Bedeutung sein könnte ist die Nutzung des Systems für andere Einsätze.

Soll der Multicopter allein zur Bildübertragung aus der Luft genutzt werden, gewinnt hier wiederholt die sehr lange Flugzeit an Bedeutung. Zudem gibt es zahlreiche, qualitativ hochwertige Kamera-Gimbal-Systeme, welche für den direkten Einsatz vorgesehen sind und ohne Aufwand mit der Drohne verbunden werden können.

Stellt man die Vor- und Nachteile des Systems gegenüber wird schnell klar, warum es für die genannten Einsatzszenarien zu dieser Entscheidung gekommen ist:

**Tabelle 10: Vor- und Nachteile DJI M300 RTK**

Positiv	Neutral	Negativ
Flugzeit	Eingriff in Flugsteuerung begrenzt	Flüge über 500 m a.g.l. mit Aufwand verbunden
Reichweite		
Usability	Produktionsstandort	
Verpackungsgröße		
Installation Messtechnik		
Akkumanagement		
Sicherheitsfunktionen		
Zubehör		
Externe Stromversorgung		
Fertigungsstandard		
Integriertes RTK		
Primäres Flugdatendisplay		
Erweiterte Dual-Steuerung		
Redundanzsysteme		

**Alternative: Kraft und Sicherheit: Watts Prism (X8)**

Je nach Einsatzszenario in der Zukunft können sich die Anforderungen ändern. Leichte Abweichungen der Bedingungen sollen nicht dazu führen, dass mit viel Aufwand ein neues, für den Einsatz geeignetes System recherchiert werden muss. Der Prism aus dem Hause Watts ist flugtechnisch mit dem DJI M300 RTK nahezu gleich auf. Mit 400 g weniger Payload und 10 Minuten weniger Flugzeit musste sich das System geschlagen geben. Auch in Hinblick auf Fertigungsstandards und Sicherheitssysteme hat der M300 die Nase leicht vorne. Sollten jedoch Lasten von 11 kg getragen werden müssen, bietet der Prism ein fast einzigartiges Zubehör. Der Quadrocopter lässt sich durch tausch der Arme in einen Octocopter in einer X8 Konfiguration umrüsten. Seine Gesamtzuladung erhöht sich bei gleicher Baugröße hierdurch von 2,5 kg auf 11 kg. Für Flüge jenseits der 500 m a.g.l. und Implementierung von Sensorik bietet die Flugsteuerung Pixhawk 2 mehr Anwendungsmöglichkeiten als jede andere Flugsteuerung. Das Beladesystem des Multicopters schlägt in seiner Benutzerfreundlichkeit sogar den M300. Ist die Sensorik jedoch einmal fest installiert, verliert der Punkt an Bedeutung. Der Watts Prism ist für Spezialanwendungen so gut geeignet, dass er es auf der Liste der zu beschaffenden Drohnen des Labors für Umweltmesstechnik geschafft hat.



**Abbildung 19: Watts Prism als Quadrocopter und Octocopter X8 (Premium-Modellbau kein Datum)**

In Summe überzeugt der M300 RTK für die Einsatzszenarien in Punkto Anwenderfreundlichkeit. Auch die Anzahl der Distributoren und Servicepartner lassen sich für den Prism in Deutschland an einer Hand abzählen. Das System bietet in vielen Bereichen mehr Freiheiten: Wahl der Akkus, Eingriff in die Sensorik, unkompliziertes Fliegen in Flugverbotszonen, etc. Diese verschaffen den Einsatzkräften der definierten Katastrophensituationen jedoch keinen entscheidenden Vorteil, weshalb es der Watts Prism nur auf den zweiten Platz schafft.

**Alternative: Vibrationsarme und Kraft: Freefly Alta X**

Mit dem Alta X aus dem Hause Freefly wird hier ein System unter den Alternativen vorgeschlagen, was für Spezialeinsätze zum Einsatz kommen kann. In Punkto Anwenderfreundlichkeit und Alltagstauglichkeit ist der Alta X gleich auf mit dem Watts Prism. Der Alta X bringt jedoch auf Grund seines maximalen Abfluggewichtes von knapp 35 kg (davon 16 kg Zuladung) sehr große Abmaße mit sich. Mit Propellern kommt der Alta X auf einen Durchmesser von 2.273 mm. Ein weiterer signifikanter Vorteil neben der hohen Zuladung ist eine Mechanik zur Reduktion der Vibrationen. Diese wurde von der Firma Freefly erstmalig in einen kommerziellen Multicopter verbaut. Sie reduziert die Vibrationen um 80 %. Aus diesen Gründen kommt das System überwiegend in der Filmindustrie zum Einsatz. Je nach Empfindlichkeit und Größe der Sensortechnik ist der Einsatz auch in der Analytik vorstellbar.



**Abbildung 20: Freefly Alta X (Freefly kein Datum)**

## **2.3 Datenübertragung**

In diesem Kapitel wird neben der Sensor- und Drohnentechnik die dritte relevante Komponente untersucht. Um die Messdaten der Sensorik im Einsatz vom UAS in Echtzeit zur Bodenstation zu übermitteln, wird ein Datenübertragungssystem benötigt. Außer weniger Ausnahmen, sei an dieser Stelle schon gesagt, dass die Übertragungstechnik nahezu für alle Messgeräte angepasst und entsprechend zusammengestellt werden muss. Zwar besteht ebenfalls die Möglichkeit die Daten über die Drohnenschnittstellen zu übermitteln, allerdings sind in diesem Fall ebenfalls Anpassungen erforderlich. Um ein UAS-unabhängiges Datenübertragungssystem zu haben, empfehlen wir dieses als autarke Applikation. Im Folgenden stellen wir die Charakteristik der Datenübertragung anhand der Verbindung zwischen einem UAV und seiner Bodenstation dar, da dem Labor hier zahlreiche Versuchsreihen zu Grunde liegen. Auch hier handelt es sich um eine Form der Datenübertragung, welche theoretisch für die Messdaten genutzt werden kann. Im weiteren Verlauf übertragen wir den Sachverhalt auf die Datenübertragung der Messtechnik und schildern, was sich hieraus ergibt.

### **2.3.1 Vertikale Funkdatenübertragung**

Der Betrieb eines UAS ist in den meisten Fällen auf das Aufrechterhalten einer Funkverbindung angewiesen. Dies ist in dem hier beschriebenen Anwendungsfall von sekundärer Bedeutung, da hier nicht die Steuerbarkeit des UAS im Vordergrund steht, sondern eine Messdatenübertragung in Echtzeit sicherzustellen ist. Der Flug selbst kann bei Abbruch des Signals völlig automatisiert erfolgen. Die Aufrechterhaltung der Funkverbindung ist somit essenziell für die Lagebewertung in einem Störfall.

Die Erfahrung im Umgang mit UAS hat gezeigt, dass die horizontale Ausbreitung der Funkwellen zur Steuerung und Telemetriedatenübertragung einige Kilometer weit reichen kann, jedoch im gleichen Setup die Übertragung in der Vertikalen erheblich eingeschränkt sein kann. Ein Beispiel hierzu: Horizontale Reichweite einer Standardfernsteuerung: 2 km. Die vertikale Reichweite liegt hingegen

lediglich bei ca. 600 m - 700 m. Ungünstige atmosphärische Bedingungen z.B. Nebel, können die Reichweite noch weiter vermindern. Das liegt in erster Linie an der Antennenkonfiguration der Funkübertragungssysteme, da die meisten kommerziell erhältlichen Systeme aus dem Bereich Modellbau, Film und BOS (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben) stammen, bei denen eine vertikale Optimierung der Reichweite in große Höhen nur sehr selten erforderlich ist. Für den hier vorgestellten Einsatzbereich ist eine Optimierung der vertikalen Funkübertragung ein wichtiger Bestandteil. Hiervon hängt der Erkenntnisgewinn über die Lage ab.

Die Antenne hat einen sehr starken Einfluss auf das Abstrahlverhalten eines Funkübertragungssystems. Mit einer schlechten Antenne kann man mit einer gegebenen Sendeleistung nur wenige hundert Meter Reichweite erzielen oder mit der gleichen Leistung und einer optimierten Antenne eine Reichweite von z.B. 50 km und mehr erzielen.

Die vertikale Ausbreitung von Funkwellen eines am Boden befindlichen Senders ist in erster Linie von den reflektierenden und absorbierenden Eigenschaften des Bodens abhängig. Die reflektierenden Eigenschaften des Bodens sind durch die Dielektrizitätskonstante und durch die Leitfähigkeit bestimmt. Weniger offensichtlich ist, dass auch abgestrahlte Energie der Antenne vom Boden absorbiert wird. Für die Reflexion elektromagnetischer Wellen an der Erdoberfläche gilt, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Die reflektierten Wellen können sich mit den nichtreflektierten Wellen überlagern. Es kann sowohl zu konstruktiven als auch zu destruktiven Interferenzen kommen. Bei der Betrachtung von Überlagerungen ist die Ausrichtung der Antenne gegenüber dem Boden zu beachten und im Falle einer Schwächung des Signals durch eine Positionsänderung zum Boden behebbar.

### **2.3.2 Antenne mit Richtcharakteristik**

Eine Richtantenne ist mit einem definiert konstruierten Reflektor ausgestattet der, anders als der Boden, ausschließlich zu einer konstruktiven Interferenz führt, wodurch eine gute Abstrahlung in eine Richtung erreicht wird.

In der hier dargestellten Anwendung ist die Verwendung einer Antenne mit Richtcharakteristik zum sicheren Betrieb der vertikalen Funkstrecke von Vorteil.

Die folgende Abbildung zeigt die Bodenstation der vertikalen Richtfunkstrecke bei einer Messkampagne des Labors für Umweltmesstechnik in Melpitz. Hier wurden vertikale Richtfunkstrecken von über 2.000 m a.g.l. auf 433 MHz ohne Überschreitung der zulässigen Sendeleistung von 25 mW realisiert. Die Funkstrecke diente zur Übertragung von Telemetriedaten.



**Abbildung 21: Telemetrie-Bodenstation der HSD im vertikalen Betrieb (HSD UMT, 2014)**

### **2.3.3 Funkfernsteuersysteme**

Auf dem Markt befinden sich unterschiedliche Systeme. Hierbei werden sog. offene als auch geschlossene Systeme hinsichtlich ihrer Konfigurierbarkeit der Übertragungswege (Antenne, Frequenz, Leistung usw.) unterschieden.

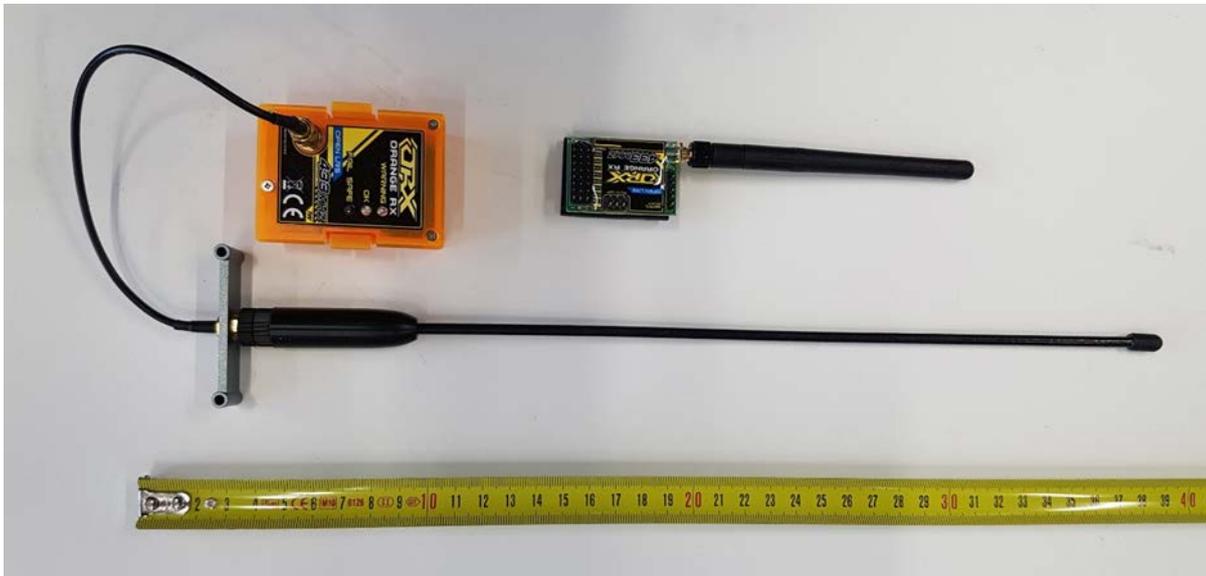
#### **Geschlossene Systeme**

Unter geschlossenen Systemen versteht man, im Rahmen dieser Betrachtung, Funkssysteme, die nicht durch den Nutzer hinsichtlich der Funkübertragung konfiguriert werden können. Die Funkübertragungssysteme von DJI bieten zwar die Möglichkeit über eine DJI eigene Programmierplattform (SDK) bestimmte Funktionen zu ermöglichen, sind aber nicht vollumfänglich an gegebene Aufgaben insbesondere zur Erhöhung der vertikalen Reichweite der Funkübertragung anpassbar. Aus diesem Grunde sind die DJI Systeme lediglich eingeschränkt nutzbar, wenn eine vertikale Funkstrecke  $> 500$  m a.g.l. verlangt wird.

#### **Offene Systeme**

Unter offenen Systemen versteht man Systeme, die durch den Nutzer potenziell vollumfänglich konfiguriert und erweitert werden können. Das heißt, hier wird die Anwendung unterschiedlicher Antennen durch den Nutzer ermöglicht. Sogar die Sendeleistung kann bei einigen offenen Systemen angepasst werden, was für die Einsatzkräfte von Bedeutung sein könnte. Das Einspeisen von Daten in die Funkstrecke ist hierbei über geeignete Schnittstellen möglich. Hier sind jedoch die nationalen Richtlinien bezüglich der Sendeleistung in den einzelnen Frequenzbändern zu beachten.

In der folgenden Abbildung ist ein Vertreter der offenen Systeme gezeigt. Hierbei sind sowohl die Antenne frei wählbar als auch die Sendeleistung anpassbar. Das hier gezeigte System arbeitet auf 433 MHz und kann Reichweiten von ca. 10 km realisieren. Es ist zudem vom Nutzer frei programmierbar und unterliegt der Open Source Lizenz.



**Abbildung 22: 433 MHz Sende- und Empfangseinheit (HSD UMT, 2021)**

Eine Reichweitenerhöhung ist durch verschiedene Strategien erzielbar. So kann beispielsweise die Ausrichtung der Antenne einen Einfluss auf die Reichweite haben. Ein Funksystem mit z.B. zwei Antennen, dem sog. Diversity- Betrieb ermöglicht das beste Signal von einer der beiden Antennen zu nutzen. Eine weitere Strategie ist es, für eine kurze Zeit mit hohen Sendeleistungen Datenpakete zu versenden. Dadurch wird das Integral der genehmigungsfreien Sendeleistung nicht überschritten, jedoch die Reichweite der Sendeanlage erhöht.

Abbildung 23 zeigt ein modernes System des Herstellers TBS (Team Blacksheep). Dieses System arbeitet auf 868 MHz, ist mit einem robusten, 2-Wege Sendeverfahren ausgestattet und erzielt lt. Hersteller Reichweiten bis 40 km. Der Empfänger verfügt über zwei Antennenanschlüsse für den Diversity-Betrieb (Bild links) und das Sendemodul (Bild rechts). Dieses System ist, neben der Übertragung der Steuersignale und Fluggerät-Telemetriedaten, potenziell in der Lage zusätzlich oder exklusiv Umweltdaten über eine I2C-Schnittstelle des Messsystems zu übertragen.



**Abbildung 23: Telemetriesystem der Firma TBS mit hoher Reichweite (TBS kein Datum)**

Im Folgenden werden exemplarische Systeme und deren Reichweiten gezeigt. Ein allumfassender Überblick kann hier, aufgrund der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Systeme, nicht gegeben werden. Alle hier vorgestellten Systeme haben eine digitale Datenübermittlung.

**Tabelle 11: Typische Reichweite von Fernsteuersystemen**

Hersteller	horizontale Reichweite [km]	Vertikale Reichweite [km]	Quelle
DJI M300	7	0,7	Erfahrungswert
Graupner HOTT	10	< 2	Erfahrungswert
TBS	40	Nicht bekannt	Herstellerangabe
Orange	10	1	Herstellerangabe

### 2.3.4 Empfehlung

Aus den vorausgegangenen Informationen des Kapitels lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

- DJI bieten keine Auswahl der Sendeleistung und / oder Antennenkonfiguration
- Messsystemdatenübertragung ist bei vielen Herstellern von UAS prinzipiell möglich jedoch zum Teil nur eingeschränkt
- Geringe vertikale Reichweiten der Fernsteuerungen schränken eine sichere Datenübertragung ein.
- Vorzugsweise unabhängiges Datenübertragungssystem – eigenständig auf vertikale Kommunikation optimiert

Wir sprechen somit eine Empfehlung für eine plattformunabhängige Datenübertragung aus. Prinzipiell ist es bei vielen Fernsteuerungen möglich, Telemetriedaten über die Funkstrecke zu übertragen. Dies ist sogar bei DJI möglich. Hierbei gibt es die proprietäre Programmierumgebung „SDK“, um dies zu realisieren. Jedoch bleibt die Einschränkung in der vertikalen Reichweite und der nicht vorhandenen Möglichkeit der Verwendung von Richtantennen.

Besser sind hierfür Lösungen, die ein plattformunabhängiges Übertragungssystem bieten. Zumal hier die Möglichkeit besteht, in Echtzeit die Daten per mobile Internetdatenverbindung (LTE, Iridium Satellit oder ähnliches) auf einen Server zu speichern und von dort aus an interessierte Stellen z.B. in ein Lagezentrum zu übermitteln. Das lässt weitere Kombinationsmöglichkeiten von Sensorausstattung und Trägersystem zu. Beispiel hierfür: Verwendung des Sensorsystems mit Telemetrie auf Fahrzeug oder verschiedenen UAS (Multicopter, Luftschiff, Fesselballon, Flugzeug, VTOL usw.) zu nutzen. Folgende Struktur ist für die Nutzung eines autarken Datenübertragungssystems erforderlich:

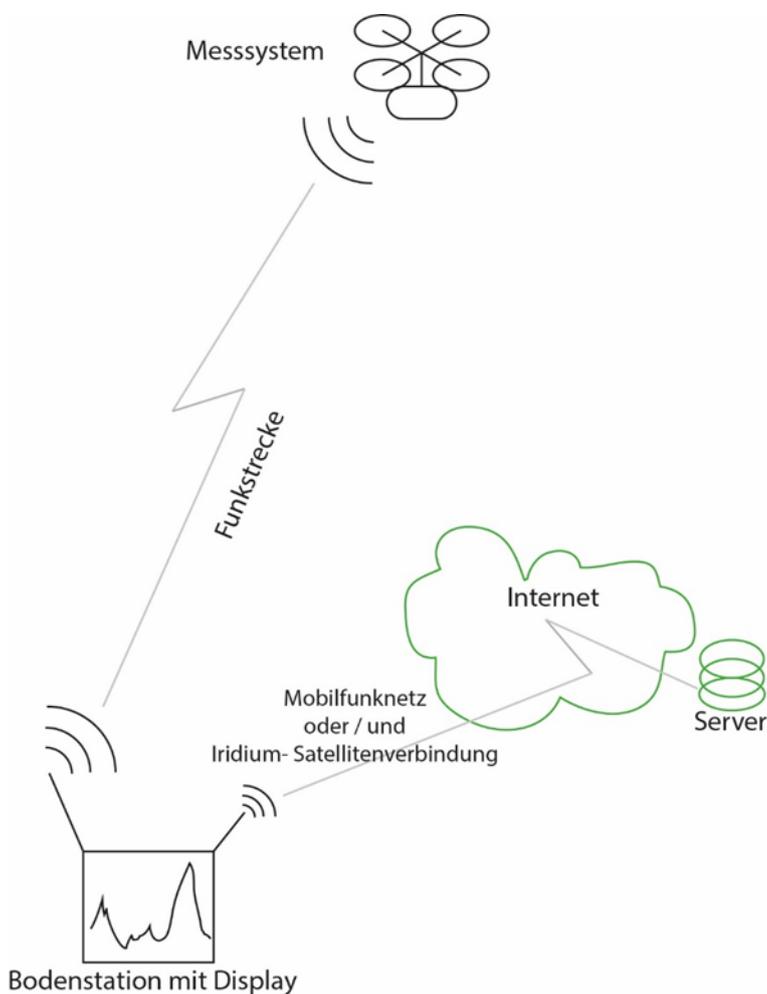
Die Sensordaten werden auf dem UAS auf einem Datenträger gespeichert und auf einer Funkstrecke, die eine ausreichende vertikale Funkverbindung aufrechterhalten kann, mit einem robusten Protokoll gesendet.

Die vom auf dem UAS befindlichen Messsystem gesendeten Daten werden auf dieser Funkstrecke an eine Bodenstation übertragen. Der Operator kann die Daten graphisch aufbereitet auf einem Display in Echtzeit sehen und für sein weiteres Handeln bewerten und nutzen. Des Weiteren können die Daten ebenfalls direkt von einer Empfangseinheit im Einsatzfahrzeug empfangen werden. Es ist ebenfalls möglich, die Daten via Mobilfunknetz oder Iridium Satellit von der Bodenstation auf einen Server zu übertragen. Berechtigte Personen können auf die Daten auf dem Server zugreifen, um die Situation im Lagezentrum oder einem anderen beliebigen Ort analysieren zu können und entsprechend handeln zu können.

Um die Daten per Mobilfunknetz auf den Server zu senden, sollte dieser Schritt nicht direkt vom auf dem UAS montierten Messsystem geschehen, sondern vom Boden aus. Das hat den Hintergrund, dass die Mobilfunkverbindung vom Mobilfunkbetreiber bodengebunden ausgelegt ist und mit zunehmender Höhe immer schwächer wird, bis sie schließlich abreißt.

Hier können sich bereits bei wenigen 100 m über Grund Netzverbindungsausfälle zeigen. Das haben Versuche im Feld des Labors für Umweltmesstechnik im Rahmen dieser Berichterstellung ergeben. Dazu wurde ein LTE Modem, das auf einen Server beliebige Daten zeitlich äquidistant sendet, auf ein UAS montiert und Vertikalaufstiege mit einer Freigabe auf 1.500 m a.g.l. unternommen. Ortsabhängig wurden bei einem dieser Versuche schon ab 150 m a.g.l. Einschränkungen der Datenübertragung bis zum Abbruch der Verbindung bei rund 180 m a.g.l. festgestellt.

Die folgende Abbildung zeigt eine optimierte Datenübertragungsstruktur, die auch bei nicht vorhandenem Mobilfunknetz eine möglichst hohe Datenverfügbarkeit auch via Satelliten bietet.

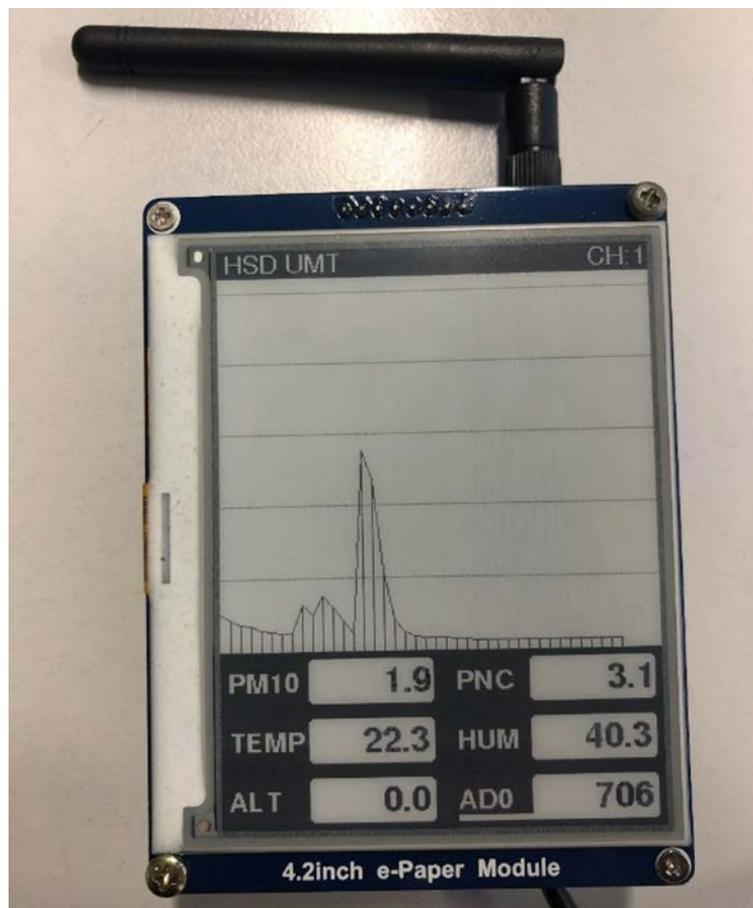


**Abbildung 24: Schematische Darstellung der Datenverbindung und des Datenflusses des vorgeschlagenen Datenübertragungssystems**

Beachtet man die Mobilfunkabdeckung im Bereich Erzgebirge, so stellt man fest, dass es eine vom Anbieter abhängige Mobilfunknetzabdeckung gibt. Das erschwert die direkte Datenübertragung der Daten vom UAS über das Mobilfunknetz auf den Server. Selbst auf dem Boden ist die Datenübertragung auf den Server nicht an jedem Ort garantiert und vom Anbieter abhängig. Hier scheint derzeit Vodafone, gefolgt von Telekom, der Anbieter mit der besten Netzabdeckung im Gebiet des Erzgebirges zu sein. Das kann sich

jedoch im Laufe der Zeit ändern, so dass eine Entscheidung für den besten Mobilfunkanbieter erst zum Zeitpunkt der Anwendung eines hier beschriebenen Systems erfolgen kann.

Um sich eine Vorstellung davon machen zu können, wie eine Datendarstellung in Echtzeit an der Bodenstation erfolgen kann, ist in der folgenden Abbildung die selbstentwickelte Empfangseinheit des Labors für Umweltmesstechnik dargestellt.



**Abbildung 25: Handgroßes Paperwhitedisplay mit Livedatenanzeige von 6 Sensoren (HSD UMT, 2021)**

## 2.4 Wissenssammlung

In den folgenden Unterkapiteln werden wichtige Informationen bezüglich der Nutzung von UAS und der Datenübertragung beschrieben. Die Daten entstammen neben Recherchen dem stetig wachsenden Knowhow der Mitarbeiter des Labors für Umweltmesstechnik.

### 2.4.1 Nachtflug

„Im Gegensatz zum bisherigen deutschen Recht sind Flüge von UAS bei Nacht nicht ausgeschlossen und bedürfen damit keiner besonderen Genehmigung. Das UAS muss während des Betriebs bei Nacht mit einem grünen Blinklicht ausgestattet sein. Der Flug ist, wie am Tag, in direktem Sichtkontakt zwischen Fernpilot und Drohne durchzuführen. Zusätzliche Positionslichter, die die Beurteilung der Lage des UAS im Raum erleichtern, sind empfehlenswert.“ (Luftfahrt-Bundesamt 2019).

Für den empfohlenen DJI M300 RTK ist eine kommerzielle Beleuchtung erhältlich. Diese Beleuchtung ist geeignet, um Nachtflüge nach §21 LuftVo durchzuführen. Die Nachtflugbeleuchtung ist angelehnt an SERA-DVO 923/2012 Punkt 3215 (Globe Flight GmbH kein Datum).

### 2.4.2 Fallschirmsystem

Der wesentliche Zweck eines Drohnen-Fallschirms ist es, im Falle einer Fehlfunktion während des Fluges das Verletzungsrisiko für Menschen am Boden zu reduzieren und zugleich das kostspielige Equipment sicher auf den Boden zurückzubringen. Die Firma Globe Flight GmbH als größter deutscher Vertriebspartner bietet gleich zwei Fallschirmsysteme an, welche exakt auf den DJI M300 RTK zugeschnitten sind. Dabei lassen sich die Systeme sowohl automatisch als auch manuell auslösen.

### 2.4.3 Qualitätssicherung

Um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die von den Propellern erzeugte Strömungsfeldern auszuschließen, wurde die Probenahme einer Partikelmessung oberhalb der Propeller des UAS in verschiedenen Höhen montiert. Hier wurde zunächst mit einem Kugelanemometer untersucht, wie sich das Strömungsfeld im Bereich der Probenahme während des Flugbetriebes verändert. Die optimale Höhe für die Probenahme an dem eingesetzten UAV wurde bei 55 cm festgelegt. Die maximal gemessene Strömungsgeschwindigkeit, welche durch die Propeller in diesem Bereich erzeugt wird, lag bei 2,5 m/s, was zu keiner Beeinträchtigung des Messergebnisses bei Verwendung einer radialen Probenahme führt. Anschließend wurden die Ergebnisse einer 18-minütigen Messung zwischen einer mobilen und einer stationären Messung untersucht. Sowohl der Verlauf der Massenkonzentration als auch die normierte Partikelanzahlverteilung zeigen, dass durch die gewählte Position der Probenahme von keiner Beeinträchtigung der Messergebnisse auszugehen ist. Ein ähnliches Vorgehen ist bei Schadgasmessungen ebenfalls denkbar, wobei davon ausgegangen werden kann, dass der Einfluss hier geringer sein dürfte als bei Aerosolmessungen.



**Abbildung 26: Untersuchung des Windfeldes im Bereich der Probenahme (HSD UMT, 2021)**

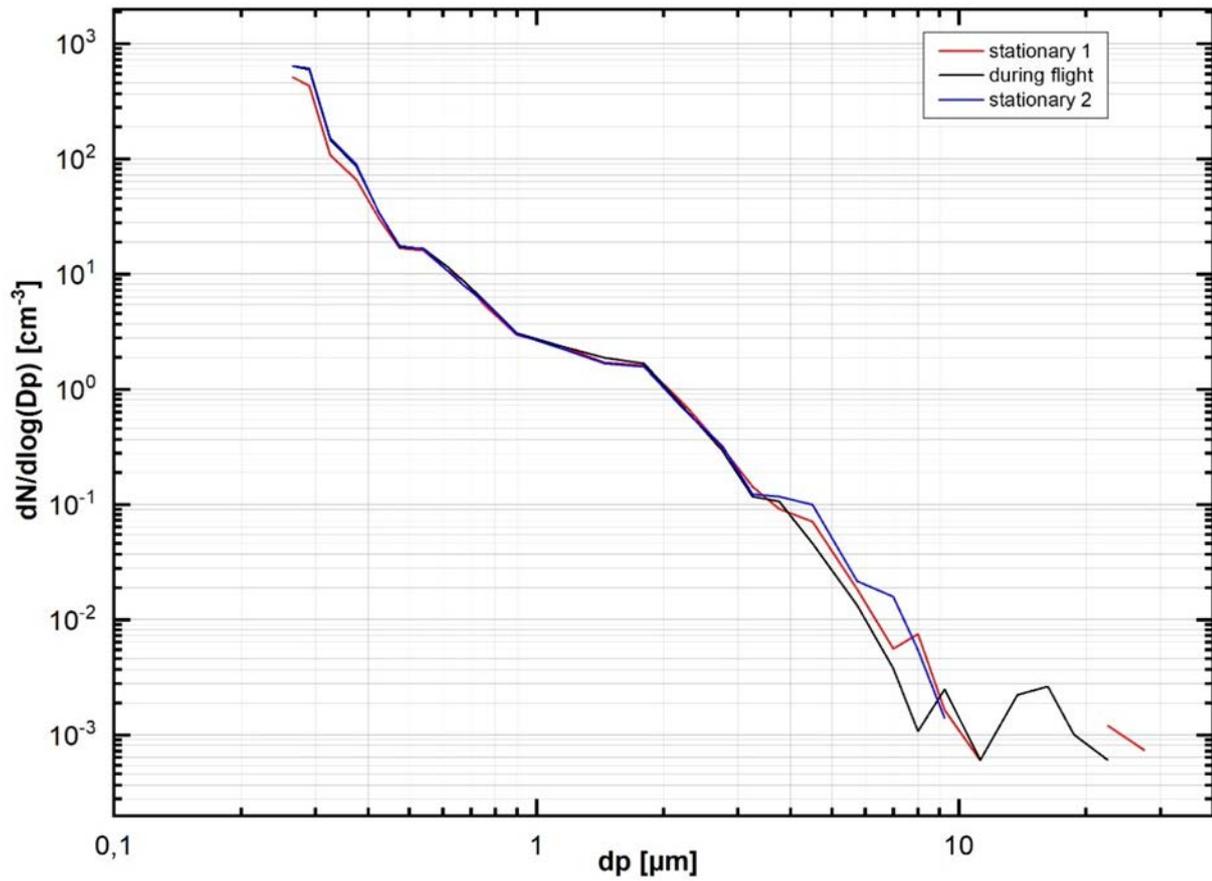


Abbildung 27: Vergleich Anzahlverteilung stationär und im Flugbetrieb (HSD UMT, 2021)

### 3 AP2 – Vorbereitende Arbeiten für Freifeldversuche

In diesem Kapitel soll eine umfassende und detaillierte Beschreibung der geplanten Freifeldversuche bzw. des Praxistests mit Bezug auf die örtlichen Gegebenheiten incl. Beschreibung der benötigten Komponenten und Technik sowie Erstellung eines Zeit- und Kostenplans erstellt werden. Aufgrund der besonderen geografischen Lage wird man für einen Freifeldversuch etwas mehr ins Detail gehen müssen. Ein Praxistest in der Nähe des Böhmisches Beckens / des Erzgebirgskamms ist nicht gleichzusetzen mit einer drohnengestützten Messung im flachen Inland. So muss zunächst einmal die Ausgangslage genau definiert werden.

#### 3.1 Ausgangslage

In den vergangenen Jahren kam es in den Chemieparcs im böhmischen Becken immer wieder zu Störfällen mit Freisetzung von Schadstoffen:

- 10.11.2010: Havarie im Druckgaswerk Vresova
- 18.05.2011: Havarie einer Claus-Anlage in Litvinov
- 13.08.2015: Explosion im Chemiewerk Litvinov
- 22.03.2018: Explosion in einer Erdö Raffinerie der Fa. Unipetrol
- 27.07.2021: Explosion eines Entsorgungszentrums im Chempark Leverkusen

Die nachfolgende Grafik kategorisiert eine Liste der großen Chemiekatastrophen nach der Art des Unglücks. Deutlich zu erkennen ist, dass bei fast der Hälfte aller Unfälle es zu einer Explosion kam. Bei knapp einem Drittel kam es auch zu Bränden. Unter der Gruppe „Sonstige“ fallen Zugunglücke, unkontrollierte chemische Reaktionen als auch ungeklärte Ursachen.

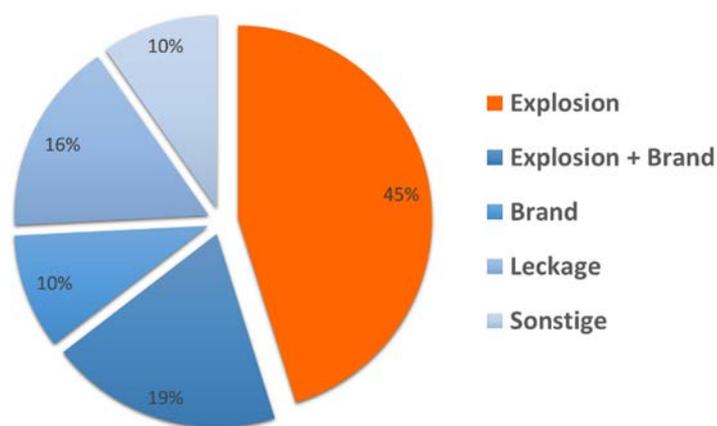


Abbildung 28: Nach Ursachen kategorisierte Chemieunfälle (Datengrundlage: wikipedia.de)

Die Daten erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen lediglich einen Überblick geben, mit welcher Wahrscheinlichkeit, welche Szenarien bei einem Chemieunfall zu erwarten sind und mit welchen Auswirkungen zu rechnen ist. Diese können einen direkten Einfluss auf die Höhe der Freisetzung von Schadstoffen und somit auch auf deren Ausbreitung haben. Bei Leckagen werden die Stoffe meist in Bodennähe freigesetzt, von wo sie - je nach ihrer spezifischen Dichte, entweder aufsteigen oder am Boden verbleiben. Hier kann es sogar zu Ansammlungen und Anreicherung in Senken kommen, wo sich gesundheitsgefährdende Konzentrationen bilden können. Bei Explosionen werden enorme Mengen an Energie in Form einer Druckwelle freigesetzt, wodurch sich Schadstoffe direkt bis in mehrere hundert Meter Höhe in die Atmosphäre befördert werden können. Brände, die in Folge von Explosionen entstehen können, verstärken zudem das Aufsteigen der Rauchsäule. Dabei verursacht das Feuer zusätzlich einen

thermischen Auftrieb, was die Entwicklung und Ausdehnung der Rauchsäulen deutlich beeinflussen kann. Somit ist im Realszenario auch immer von einer großen vertikalen Ausbreitung auszugehen, wobei aus Sicht des Bevölkerungsschutzes primär die Ausbreitung in den unteren und Bodennahen Luftschichten von größerem Interesse sind.

### **3.1.1 Herausforderungen bei der Erfassung störfallbedingter Emissionen im Untersuchungsgebiet**

Wie bei allen anderen Ausbreitungen von Luftverunreinigungen spielt die Meteorologie eine entscheidende Rolle. Dabei sind hauptsächlich die Windstärke und Windrichtung maßgebliche Faktoren mit denen Luftschadstoffe transportiert werden. Dabei kann der Wind sowohl von seiner Richtung als auch Stärke in der Höhe variieren. Durch den Transport, die sogenannte Transmission nimmt die Konzentration an Luftschadstoffen in den meisten Fällen ab. Ein weiterer entscheidender Faktor für die Ausbreitung und Verdünnung von Luftschadstoffen ist der Zustand bzw. die Stabilität der unteren Atmosphäre. Die sogenannte Schichtungsstabilität ist ein Maß für den vertikalen Luftaustausch und beschreibt, inwiefern sich Luftschadstoffe in der bodennahen Mischungsschicht verteilen können. Im Normalzustand ist eine neutrale Schichtung zu erwarten, welche durch eine gute Durchmischung der unteren Luftschichten und einer damit einhergehenden hohen Mischungsschicht geprägt ist. Hierbei können Schadstoffe sowohl horizontal als auch vertikal gut verteilt und entsprechend verdünnt werden. Im Gegensatz dazu kann es in der Atmosphäre auch zu sehr stabilen Schichtungen kommen. Diese treten vorwiegend im Herbst und Winter bei langanhaltendem Hochdruckwetterlagen auf und können zu sehr austauscharmen Perioden führen. In diesen Situationen kommt das Phänomen der Ausbildung einer sogenannten Inversion zum Tragen. Diese kann, je nach Art der Inversion, entweder in höheren Luftschichten oder aber auch in den bodennahen Luftschichten entstehen. Beide Arten sind durch eine Temperaturumkehr geprägt. Unter normalen Zuständen nimmt die Temperatur mit der Höhe ab. Bei einer Inversion nimmt die Temperatur jedoch mit der Höhe zu. Dieser Effekt entsteht im Falle einer Bodeninversion dadurch, dass in wolkenlosen Nächten die Wärmestrahlung der Erde ungehindert abgestrahlt wird, wodurch es zu einer Auskühlung des Bodens und dadurch auch zur Abkühlung der bodennahen Luftschicht kommt. Da warme Luft leichter als kalte Luft ist, liegen die wärmeren und leichteren Luftschichten auf den Kälteren auf. Hierdurch wird der vertikale Luftaustausch behindert oder komplett unterbunden, sodass es zu keiner vertikalen Durchmischung kommt. Die Inversionsschicht kann eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern ausbilden.

Durch die Sperrriegelwirkung der Schicht und des damit unterbundenen vertikalen Austausches kann es infolgedessen zu einer Anreicherung an Luftschadstoffen und somit zu stark erhöhten Konzentrationen innerhalb der Schicht kommen. Diese hohen Konzentrationen können sich negativ auf die Gesundheit auswirken. Ein prominentes Beispiel, welches auch den Begriff Wintersmog prägte, trat 1952 in London auf. In Folge einer mehreren Tage andauernden Inversionswetterlage kam es zu einer so hohen Anreicherung an Luftschadstoffen, dass mehrere Tausend Menschen zum Teil schwere Atemwegserkrankungen erlitten.

Zusätzlich zum verminderten vertikalen Austausch ist die Inversionsschicht von sehr geringen Windgeschwindigkeiten bis hin zur Windstille geprägt. So kann es durchaus gleichzeitig vorkommen, dass es in Tallagen auf tschechischer Seite des Erzgebirges innerhalb der Inversionsschicht fast windstill ist und in einigen Kilometern Entfernung oberhalb der Inversionsschicht in den Höhenlagen des Erzgebirgskammes ein starker Höhenwind weht. Hierdurch ergeben sich sehr unterschiedliche Ausbreitungscharakteristika, welche in der Messstrategie Berücksichtigung finden müssen.

Dies ist wichtiger Aspekt, da die besondere Orographie rund um den Erzgebirgszug die Entstehung von Inversionen begünstigt. Hier spielt das sogenannte Berg-Tal Windsystem eine Rolle, welches dadurch geprägt ist, dass es tagsüber durch Sonneneinstrahlung an den Hängen ein hangaufwärts gerichteter Wind entsteht. Nachts hingegen kühlt sich der Boden unter sternklarem Himmel ab und damit auch die bodennahen Luftschichten, sodass diese Kaltluft aufgrund ihrer höheren Dichte als Kaltluftbahnen an den Hängen ins Tal gleitet. Im Zuge dessen können sich dort sogenannte Kaltluftseen ausbilden, welche die Ausbildung einer Bodeninversion intensivieren. Diese Kaltluftseen können sich aber auch in Tälern bzw. Senken in den Höhenlagen des Erzgebirges bilden.

Eine weitere Besonderheit der Geographie des Erzgebirges kommt im Wechselspiel mit der Ausbildung einer Inversionsschicht zum Tragen. Normalerweise stellen die Höhenzüge des Erzgebirges eine natürliche Barriere dar. Je nach Ausbildung der Inversionsschicht reicht diese von ihrer Mächtigkeit nicht über die Höhenzüge heraus, wodurch der Transport nach Sachsen unterbrochen wird. Jedoch gibt es entlang des Erzgebirgskammes auch Taleinschnitte (Elbtal, Klingental), durch welche die mit Schadstoffen angereicherte Luft nach Sachsen dringen kann. Dieses Phänomen konnte vom Labor für Umweltmesstechnik im Rahmen einer vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Landes Sachsen (LfULG) beauftragten Studie zur Fluggestützten Untersuchung des Ferntransportes von Luftschadstoffen nachgewiesen werden. Durch die Täler können somit auch störfallbedingte Emissionen nach Sachsen gelangen. Dieses Szenario sollte im Rahmen der Messstrategie auch aufgrund der fliegerischen Herausforderung gezielt untersucht werden.

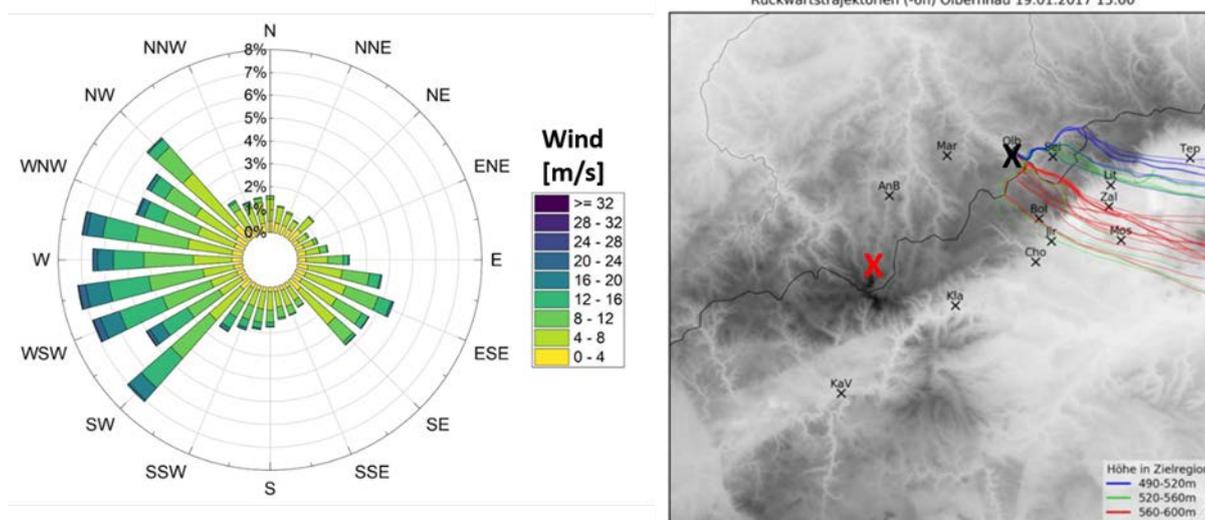
Weiterhin kann durch die Orographie des Erzgebirges ein lokal geprägtes Windsystem, der sogenannte „Böhmische Wind“ entstehen. Dieser tritt auf, wenn sich im Böhmisches Becken durch eine über mehrere Tage anhaltende stabile Hochdruckwetterlage eine mehrere hundert Meter mächtige Kaltluftschicht entwickelt. Beim Überstreichen des Erzgebirgskammes entsteht dadurch ein kalter Fallwind, welcher dann in die angrenzenden Täler weht und dort zu lokal auftretenden Windböen führen kann. Dies stellt die Durchführung von Profillflügen in Tälern neben der räumlichen Begrenzung vor besondere Herausforderungen, welche zusätzlich in der Praxiserprobung mitberücksichtigt werden sollten.

### **3.1.2 Herausforderungen an die Ausbreitungssimulation**

Die Feinstruktur des Erzgebirgskammes (Einschnitte am Gebirgskamm, Taleinschnitt, Gebirgstäler, etc.) beeinflusst die überströmenden Luftmassen deutlich, sodass es zu lokal von der Hauptwindrichtung abweichenden Strömungsmustern kommen kann. Diese lokalen Abweichungen erschweren natürlich Prognosen zur Ausbreitung der freigesetzten Emissionen. Die Abbildung 29 zeigt auf der linken Seite die Windverteilung als langjähriges Mittel (Bezugsjahre 2010-2020) an der Wetterwarte Fichtelwald des DWD. Diese befindet sich auf dem Erzgebirgskamm in 1213 m Höhe über NN. Vorrangig weht der Wind aus westlichen Richtungen mit einer zweiten Hauptwindrichtung aus Ost bis Südöstlicher Richtung. Die Windgeschwindigkeiten sind, wie für diese Höhenlage auch zu erwarten, entsprechend erhöht. Auf der rechten Seite der Abbildung sieht man Rückwärtstrajektorien eines Modellaufes aus einem Vortrag, welcher auf der Abschlussveranstaltung des Projektes „Odcom“ präsentiert wurde (Schrödner & Wolke 2019). Die Rückwärtstrajektorien wurden für den Ort Olbernhau, welcher in einem Höhental auf deutscher Seite des Erzgebirgskammes liegt, für 6 Stunden zurückgerechnet. Dabei wurde der Modellauf mit einer feiner aufgelösten Gitterweite von 200 m, anstelle der üblichen 1 km Gitterweite gerechnet. Hierdurch konnten auch feingliedrige Strömungsmuster visualisiert werden, was die Grafik deutlich zeigt. Durch die höhere Auflösung können sowohl einzelne Transportwege, Zirkulation innerhalb der Täler sowie die vertikale Komponente detaillierter untersucht und besser beschrieben werden. Deutlich zu erkennen ist, dass an dem Ort

Luftpakete und somit auch Schadstoffe sowohl aus einem großen Einzugsgebiet als auch aus unterschiedlich hohen Luftschichten stammen können.

Alles in allem sorgen die vielfältigen Faktoren dazu, dass die klassische Transmission von Schadstoffen im Zielgebiet beeinflusst wird, wodurch die reale Erfassung möglicher störfallbedingter Emissionen erschwert werden kann. Durch die stetige Verbesserung der Rechenleistung können in aktuellen Ausbreitungsmodellen kleinskaligere Gitterweiten verwendet werden, wodurch die Orographie höher aufgelöst berücksichtigt und die teils komplexen Ausbreitungsmuster besser abgebildet werden können. Die Freifeldversuche zur Durchführung von Profilflügen zur Detektion einer durch einen Störfall freigesetzten Schadgaswolke können zusätzlich dazu beitragen, die Ergebnisse der Modellläufe unter realen Bedingungen zu untersuchen und im besten Falle zu validieren. Die Wahl des optimalen Aufstiegspunktes ist eine wichtige Größe zur korrekten Erfassung einer Schadstofffahne gerade unter zeitkritischen Bedingungen im Ernstfall.



**Abbildung 29: Langjähriges Mittel (2010-2020) der Windverhältnisse an der Wetterwarte Fichtelberg (rotes X, 1213 m NN, Daten: DWD). Rechts: Rückwärtstrajektorien zeigen das orographisch beeinflusste Windfeld (schwarzes X, Schrödner & Wolke 2019)**

### 3.2 Vorbereitung

Erstes wichtiges Ziel im realen Einsatzfall ist es einen geeigneten Take-off and Landing Point, kurz TOL für die Durchführung von Profilflügen zu finden. Modellläufe zur Ausbreitungssimulation geben im Ernstfall erste Hinweise über die räumliche Verteilung der Wolke. Auf Basis der Ergebnisse werden Zielgebiete für die Durchführung der Profilflüge definiert. Wie genau dabei die Modellläufe sind, gerade unter den besonderen mikroklimatischen und geographischen Bedingungen, welche sich wechselseitig beeinflussen können, soll ebenso in den Freifeldversuchen eruiert werden. Weiterhin sollten zusätzlich Möglichkeiten erörtert werden, inwiefern die Ergebnisse der Ausbreitungssimulation des Frühwarnsystems mit zusätzlichen Informationen kombiniert werden können, um so den bestmöglichen Ort für die Durchführung von Profilflügen auch unter zeitkritischen Aspekten zu definieren.

Durch die zusätzliche Kopplung der Ergebnisse der Ausbreitungssimulation über ein GIS System und die Verknüpfung des Ausbreitungsgebietes mit weiteren thematischen Layern, können geeignete Gebiete im Vorfeld näher eingegrenzt werden. So können zum Beispiel Layer der Landnutzung (Wald) und Naturschutzgebiete (FFH), Layer mit Stromtrassen oder kritischer Infrastrukturen, Flugverbotszonen oder

militärische Gebiete etc. mit der Ausbreitung verschnitten werden. Hierdurch können Zielgebiete definiert werden, die sich als grundlegend geeignet für einen Profilflug zur Detektion der Schadstofffahne erweisen und zusätzlich aber auch alle anderen sicherheitsrelevanten Faktoren im Vorfeld berücksichtigt haben. Hierdurch kann im Ernstfall eine zügige Findung des bestmöglichen TOL erfolgen, was eine schnelle Einsatzbereitschaft zur Durchführung der Profilflüge gewährleistet.

### **3.3 Einsatz des Gesamtsystems im Praxistest**

In dem folgenden Kapitel wird eine detaillierte Beschreibung der geplanten Freifeldversuche in der Praxiserprobung dargestellt.

#### **3.3.1 Ortswahl**

Das im Projektvorhaben zu untersuchende Gebiet umfasst bei einer Ost-West Ausdehnung von 350 km und einer Nord-Süd Ausdehnung von ca. 120 km eine Fläche von rund 42.000 km<sup>2</sup> (knapp 6 mio. Fußballfelder). Zusätzlich ist es durch besondere geographische Gegebenheiten geprägt.

Da in einer Praxiserprobung nicht jeder mögliche Standort praktisch abgebildet werden kann, sollen im Vorfeld möglichst Gebiete mit ähnlichen Standortbedingungen definiert werden. Die Gebiete sollen so kategorisiert werden, dass diese repräsentativ für alle weiteren Orte im Zielgebiet sind. Hierdurch ergeben sich für die Felderprobung folgende Gegebenheiten, an denen Profilflüge durchzuführen sind:

- Erzgebirgskamm
- Tal
- Hang

Des Weiteren empfehlen wir im Rahmen eines Praxisversuches auch Sonderszenarien zu untersuchen oder ein Vorgehen dazu zu definieren, sollte ein Messeinsatz nicht möglich sein:

- Nachteinsätze
- Inversionslagen
- Tallage Windsystem
- Elbtal
- Extremereignissen wie Sturm, Nebel oder Gewitter

#### **3.3.2 Emissions- und Ausgabemethoden**

Um aus dem Bodenbereich in Höhen zu gelangen, die einem Störfallszenario ähneln, sollte die Quelle mindestens einige Meter bis einige zehn Meter oberhalb der Bodenoberfläche emittieren. Eine bodennahe Freisetzung kann bei geringen Windgeschwindigkeiten und besonderen Witterungslagen zu einem „kleben bleiben“ im bodennahen Bereich führen und die Emission kann nicht ausreichend aufsteigen, um ausreichend transportiert zu werden. Dies ist insbesondere der Fall, wenn das Gas kalt ist, z.B. wenn es aus einem Druckbehälter strömt. Heiße Brandgase steigen durch die Schwerkraft angetrieben auf und erreichen Luftschichten die einen Transport begünstigen können.

#### **Vorhandene (industrielle) Quellen**

Industrieanlagen emittieren mehr oder weniger genau bekannte Stoffmengen, die als Tracerquellen genutzt werden können. Hier sind bekanntermaßen Gase und, wie sich bei eigenen Untersuchungen an Eisenhütten gezeigt hat, UFP geeignet. Typischerweise sind hier geführte und diffuse Emissionen zu finden. Die diffusen treten eher bodennah auf. Die geführten werden durch Schornsteine abgeleitet. Diese haben in der Regel eine Höhe von einigen 10 m bis einigen 100 m über Grund. Leider sind die Emissionsraten zum Zeitpunkt der Messung in der Regel nicht bekannt. Gerade bei Hüttenbetrieben, wie auch bei anderen Industriezweigen, sind es meist Batch-Prozesse, die kurzzeitig schwankend, unterschiedlich

stark emittieren. Das macht deren Verwendung, bei Notwendigkeit gleichmäßiger Emission als Quelle, nur beschränkt brauchbar.

### **UAS mit Gasquelle**

Die Freisetzung eines Tracers mit einem RPAS (Remotely Piloted Aircraft System, zunehmend von Behörden genutzter Begriff für UAS) ist in der Höhe in sehr variabel und nur durch dessen Nutzlast beschränkt. Exemplarische Möglichkeiten Tracerstoffe mit Hilfe eines UAS freizusetzen, sind im Folgenden beschrieben:

1. Das UAS ist mit dem Ende eines geeigneten Schlauchs verbunden, dessen Länge durch sein Eigengewicht begrenzt ist. Hier sind die Vor- und Nachteile dieser Strategie gezeigt. Für diese Strategie wurde ein Schlauch aus Polyamid mit einer Größe von 10 mm x 8 mm ausgewählt. Dieser wiegt mit einer Länge von 100 m rund 2,8 kg und kann von einem gängigen System, wie es im Labor für Umweltmesstechnik vorhanden ist, getragen werden. Das Gas kann z.B. über einen MFC (Mass Flow Controller) dosiert werden und in das bodenseitige Schlauchende gegeben werden. Das UAS kann nun auf die gewünschte Höhe bis ca. 100 m a.g.l. geflogen werden, dort verweilen und das Gas kann freigesetzt werden. Dabei ist in diesem Beispiel die zusätzliche Windangriffsfläche von 1 m<sup>2</sup> durch den Schlauch (Länge: 100 m x Durchmesser: 0,01 m) zu berücksichtigen. Hierdurch können die Grenzen der Flugfähigkeit der UAS möglicherweise schon bei geringen Windgeschwindigkeiten überschritten werden. Dieser Effekt wächst insbesondere mit zunehmender Flughöhe über Grund, da die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe potenziell zunimmt.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- Definierte Emission möglich
- Unterschiedliche Komponenten einsetzbar z.B. Propan, SO<sub>2</sub> (rein) usw.

Die Nachteile dieser Methode sind:

- sehr Windanfällig: ca. 1 m<sup>2</sup> Angriffsfläche bei 100 m Flughöhe
- Geringe Emissionsraten
- Höhe über Grund auf Schlauchgewicht begrenzt

2. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung eines reinen Gases in der gewünschten Höhe durch Verbrennen von z.B. Schwefel. Dazu wird Schwefel in ein zylindrisches Metallgefäß mit über dessen Länge gleichen Querschnitts gegeben und angezündet. Der Schwefel verbrennt zu SO<sub>2</sub> und wird vom Abwind des UAS, abhängig von der Länge der Aufhängung z.B. 5 m unterhalb des UAS, mehr oder weniger intensiv verteilt und vom Wind transportiert. Vorteilhaft bei dieser Ausführung ist die erzeugbare Gasmenge. Wenn der Copter ca. 3 kg Schwefel transportiert, so können rund 6 kg SO<sub>2</sub> auf beliebiger Höhe, in der Regel bis 500 m a.g.l., mit erweiterter Genehmigung auch höher emittiert werden. Das System ist kaum Windanfällig und vergleichbare Lasten unterhalb des UAS an einer langen Leine wurden bereits oft vom Labor für Umweltmesstechnik geflogen. Die Emission des SO<sub>2</sub> mit dieser Methode ist als mittlere Emission über die Brennzeit zu sehen.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- kostengünstiger Tracer
- Emissionshöhe bis „gewünschte“ Höhe (ohne größeren Aufwand bis 500 m a.g.l.)
- hohe Emissionsraten
- nicht windanfällig

Die Nachteile dieser Methode sind:

- Nicht konstante Emission über die Zeit

### **PFC Tracer**

Eine weitere Möglichkeit ist das Ausbringen eines flüssigen Tracers, der in der Luft in beliebiger Höhe versprüht wird und durch seinen Dampfdruck schnell in die Gasphase übergeht. Die so entstandene Wolke kann dann mit Hilfe von Akkumulationsröhrchen gesammelt werden und in einer späteren Analyse auf seine Beladung im Labor untersucht werden. Dieses Verfahren wurde in der Vergangenheit vom Labor für Umweltmesstechnik mehrmals zur Untersuchung von atmosphärischen Ausbreitungsmodellen großskalig (einigen 1.000 km<sup>2</sup>) eingesetzt. Leider ist es ein Verfahren, das zwar den Nachweis des Tracers bis in den ppq Konzentrationsbereich zulässt, jedoch keine „Echtzeitinformation“ liefert. Daher ist dieses Verfahren für den hier vorgeschlagenen Einsatz weniger gut geeignet.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- Sehr geringe Nachweisgrenze (einstellige ppq)

Die Nachteile dieser Methode sind:

- Keine „Echtzeitinformation“
- sehr teuer im Vergleich zu anderen hier vorgestellten Verfahren
- diskontinuierliche Messung

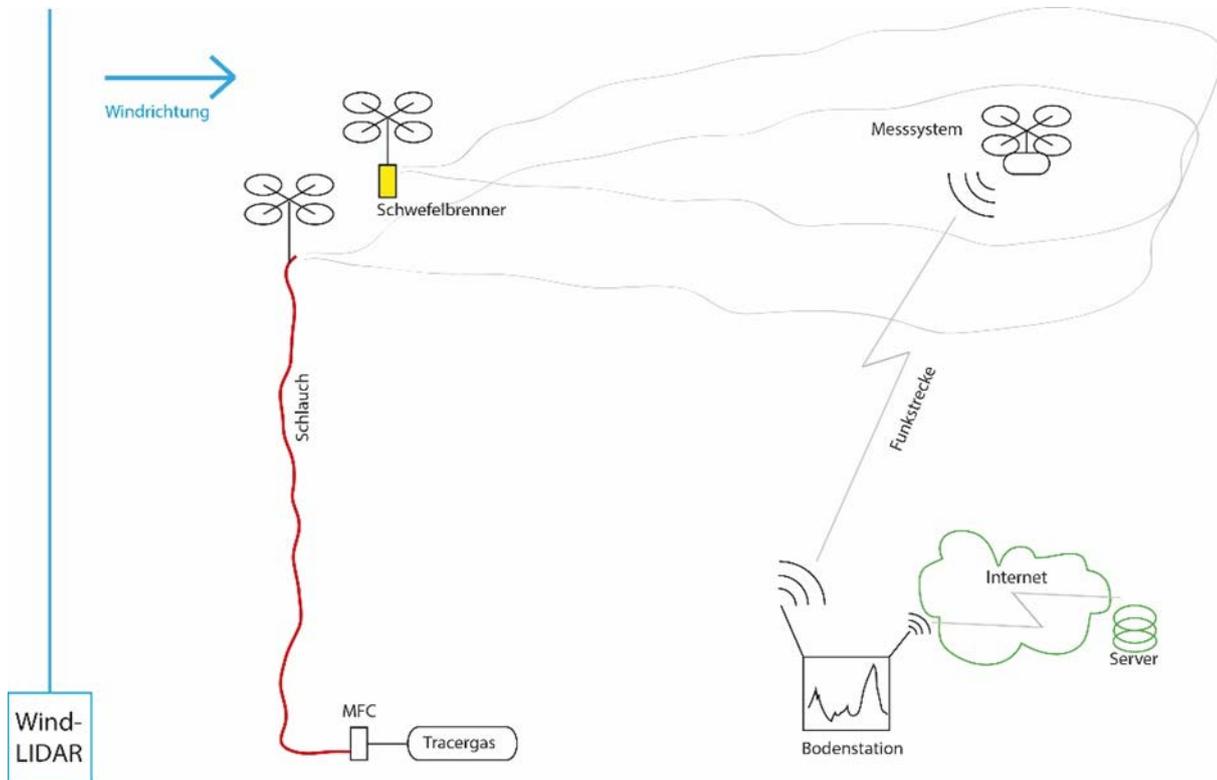
### **Hubarbeitsbühnen und Mastanlagen**

Um eine realistische Quellhöhe zu erreichen, können Bauwerke oder Hubarbeitsbühnen verwendet werden, auf denen man einen Tracerstoff freilässt. Ausreichend hohe Bauwerke, die genutzt werden dürfen, wie z.B. Kraftwerkskesselhäuser oder Funkmastanlagen (oft selbstabstrahlend und somit nicht nutzbar) sind meist schwierig in einem geeigneten Untersuchungsgebiet zu finden und deren Nutzung ist mit den Betreibern schwierig zu verhandeln aber nicht unmöglich. Hat man ein geeignetes Bauwerk gefunden, sind viele Arten der Freisetzung auf der vorgegebenen Höhe möglich.

### **3.3.3 Untersuchung des Windfeldes**

Begleitend zu der Freisetzung eines Tracers und Messung im Lee der Quelle, ist die Untersuchung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Höhe des Experimentes notwendig. Dies kann bei einigen UAS durch Verwendung der Schräglage des UAS im Postprozess aus den Flugdaten gewonnen werden. Dies ist allerdings nur ein Näherungswert, dessen Aussagekraft von der verwendeten Nutzlast verfälscht wird. Das liegt daran, dass die UAS ohne Nutzlast in die vom Serviceanbieter zur Verfügung gestellte Berechnung einfließen. Ändert man nun sowohl den Flächenschwerpunkt als auch den Massenschwerpunkt des UAS, ändert sich das Flugverhalten und somit die Schrägstellung bei Windangriff. Unterstützend dazu kann das Labor für Umweltmesstechnik eine „Kalibrierung“ des von der Nutzlast abhängigen Fehlweises vornehmen. Dies wird durch ein Wind-LIDAR, wie es vom Labor für Umweltmesstechnik betrieben wird, ermöglicht. Hierzu kann das UAS Luv-seitig des Messstrahls auf z.B. 100 m a.g.l. geflogen werden und das Wind-LIDAR auf 100 m a.g.l. fokussiert werden. Nun hat man Daten des Wind-LIDAR und die im Postprozess ermittelten Winddaten aus dem UAS Logfile. Diese können nun entsprechend korrigiert werden. Das ermöglicht im späteren Prozess der Umsetzung des hier beschriebenen Versuchs mit bekannter Nutzlast und ihrer Anbringung eine näherungsweise Schadstoffflussbestimmung.

Die folgende Abbildung zeigt einen möglichen Versuchsaufbau der Tracerfreisetzung, der Tracermessung und der Kalibrierung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit wie sie aus den UAS-Logfiles ermittelt werden können. Auf der linken Seite sind zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Tracergas-Emission im Lee eines Wind-LIDARs zu sehen. Auf der rechten Seite ist das auf dem UAS montierte Messsystem mit Telemetrie zu sehen. Die Konzentrationsdaten werden in „Echtzeit“ über die Funkstrecke an die Bodenstation gesendet und können von dort aus in das mobile Internet auf einen Server gesendet werden.



**Abbildung 30: Funktionsskizze des Freifeldversuches**

### 3.4 Standardisierte Abläufe im Einsatzfall

Standardisierte Abläufe verringern Fehleranfälligkeiten und sorgen gerade in Stresssituation für mehr Sicherheit. Das folgende Prozedere kann als Grundlage für die Durchführung von Profilflügen im Katastrophenfall genutzt werden:

#### Checkliste regelmäßiges Intervall:

- Lizenz gültig
- Betriebsregistrierung gültig
- Versicherung gültig
- Flugrouten aktuell
- NOTAMs
- Wetter
- Genehmigungen
- Software aktualisieren
- Ladezustand Akkus

### **Checkliste Ausrüstung vor dem Ausrücken:**

- Auswahl TOL nach Modelllauf
- UAS, Bodenstation und Messtechnik vollständig
- Speicherkarten vorhanden
- Ersatzbatterien
- Betriebshandbuch / Logbuch
- Windmesser
- Ladestation
- Wetterinformationen
- Aktuelle NOTAMs

### **Checkliste Pre-Flight:**

- Fitness
- Equipment startbereit
- Batteriespannung
- Failsafe gewählt: Landung, RTH (Return To Home), Rückflughöhe, Mission Fortsetzen
- Flugmodus
- Signalstärke
- GPS-Empfang
- Kamera
- Datenübertragung Sensorik
- Maximales Abfluggewicht
- Luftraumüberwachung
- Passanten informiert

### **Checkliste nach dem Start:**

- Steuerung
- Signalstärke
- Abnormalitäten

### **Checkliste vor der Landung:**

- TOL frei von Personen und Hindernissen

### **Checkliste nach der Landung:**

- UAS auf Beschädigungen prüfen
- Temperatur prüfen
- Ausschalten / Akkutausch (beim DJI M300 können die zwei Akkus nacheinander so getauscht werden, dass das System nicht ausgeschaltet werden muss und ein Akku die Versorgungsspannung gewährleistet.)

### **Checkliste nach dem Einsatz:**

- Flugdokumentationen
- Datenevaluierung

### **Beispiel eines Durchführungsverfahrens im Störfall**

Am 27.07.2021 kam es am Vormittag auf dem Gelände des Leverkusener Chemieparks, in dem der BAYER-Konzern und andere Hersteller produzieren, zu einer schweren Explosion, bei der große Schadstoffmengen austraten. Nachdem das Labor für Umweltmesstechnik leider erst recht spät von

diesem Störfall erfuhr, wurden die UAS-gestützten Messsysteme, um VOC- und PM-Messungen im Lee des Chemiepark zu unternehmen, vorbereitet und flugfertig gemacht. Dabei wurden einige Hürden offenbar, die im Falle einer Rufbereitschaft und Alarmierung von Wichtigkeit sein können.

### **Akkumanagement**

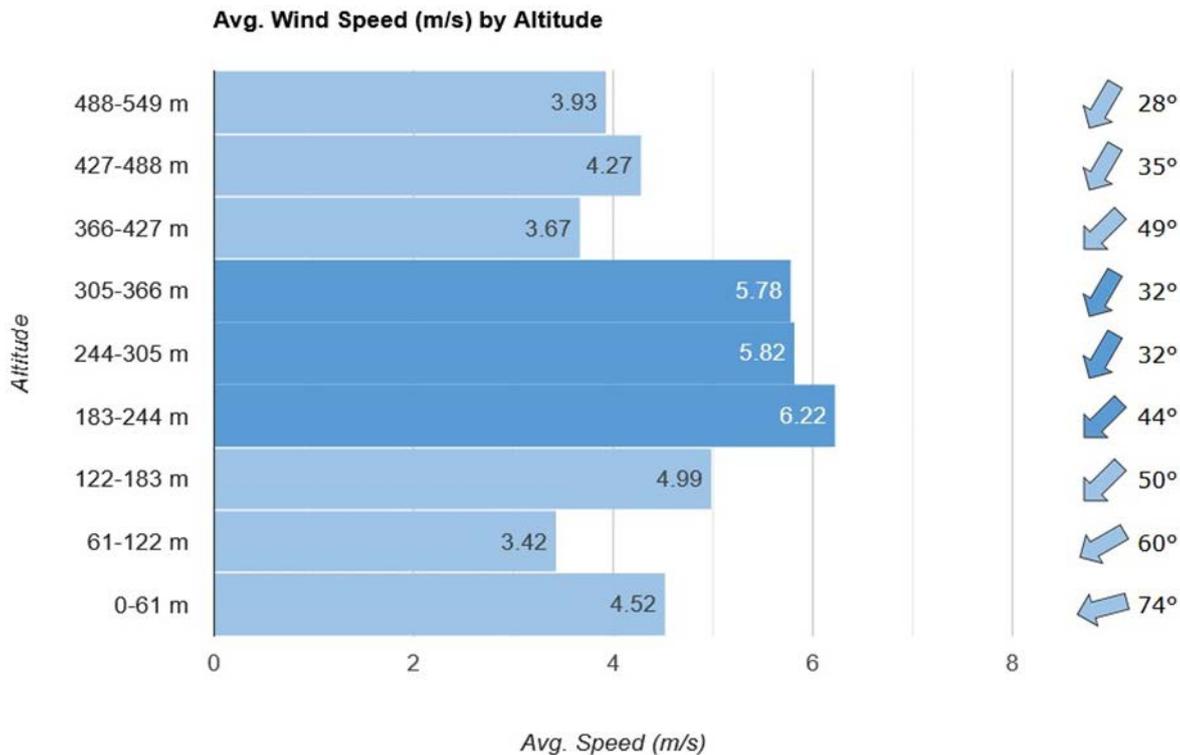
Als die Entscheidung fiel, Messflüge im Lee der Anlage zu unternehmen, mussten zunächst die Akkus des UAS geladen werden. Die vom Labor genutzten Akkus entladen sich üblicherweise nach spätestens 10 Tagen auf 60 % ihrer Kapazität, um die Lebenszeit der Akkus zu verlängern. Dieser Fakt erfordert das Vorhalten mehrerer Akkusätze, bei denen in einem sinnvollen Zyklus eine ausreichende Anzahl sofort einsatzbereiter Akkus vorhanden ist. Die Ladezeit von ca. 1 Stunde im Falle einer Alarmierung ist zu lange für eine schnelle Reaktion.

### **Anfahrt in das Einsatzgebiet**

Am Tage des Störfalls sind zwei Autobahnabschnitte gesperrt worden, wodurch sich der Verkehr in die umliegenden Verkehrswege verteilt hat. Das hatte zur Folge, dass die Anfahrt ohne Sonderrechte sehr lange dauerte. Daher ist für den Einsatzfall sinnvollerweise das Messsystem auf Fahrzeugen zu transportieren, die diese Rechte haben oder eine entsprechende Begleitung zu organisieren. Bei Absperrung eines Einsatzgebietes muss zudem sichergestellt werden, dass für das Messteam die Einfahrt ermöglicht wird.

### **Meteorologische Bedingungen am Einsatzort**

Die Windgeschwindigkeit und in diesem Falle umso wichtiger, ist die Windrichtung. Sie sind bekanntermaßen für den Schadstofftransport ausschlaggebend. Im Einsatzfall ist eine möglichst genaue Kenntnis der Windverhältnisse in Beziehung zum Quellort sehr ausschlaggebend für den Erfolg des Einsatzes. Nur so kann eine sinnvolle Verortung des Messortes erfolgen. Zusätzlich ist zu beachten, dass der Wind meist ca. 10 m über Grund gemessen wird. Das kann in der Höhe, z.B. 120 m über Grund anders sein. Hier kann sich die Windrichtung, je nach Witterungssituation, deutlich von der am Boden gemessenen Windrichtung ändern. Somit ist die Windsituation in der voraussichtlichen Messhöhe wichtig. Diese Information kann an einigen Stationen durch Auswertung von LIDAR-Daten gewonnen werden und sollte im Vorfeld für das potenzielle Einsatzgebiet sichergestellt werden. Sollten diese Daten nicht vorhanden sein, besteht eine weitere Möglichkeit darin, mit einem kleinen, geeigneten UAS einen Vertikalaufstieg zu unternehmen und im Postprozess die Windrichtung nach der Landung zu bewerten. Einen derartigen Service stellen Dienstleister wie z.B. „Airdata“ zur Verfügung. Die folgende Abbildung zeigt das direkt nach der Landung abrufbare Ergebnis einer solchen, nur wenige Minuten dauernden „Sondierung“. Deutlich ist die Änderung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in Abhängigkeit der Höhe zu erkennen.



**Abbildung 31: Windprofil eines zügigen Multicopteranstieges bis auf 500 m a.g.l. [Quelle: [www.airdata.com](http://www.airdata.com)]**

### Fliegen am Einsatzort

Das Fliegen oberhalb 120 m a.g.l. ist, abgesehen von der Abflugmasse des UAS, genehmigungspflichtig. Am Einsatzort muss bedacht werden, dass man in den Luftraum der bemannten Luftfahrt einfliegt. Hier gelten bestimmte Regeln, die zwingend eingehalten werden müssen. Dazu gehört insbesondere die Kommunikation mit den zuständigen Stellen. Das sind z.B. Luftsicherung, Flugplätze usw. in der Nähe, um sicherzustellen, dass andere Luftfahrtteilnehmer über das Geschehen im Luftraum informiert werden können. Darüber hinaus ist man verpflichtet, den Luftraum zu beobachten und anderen Luftverkehrsteilnehmern auszuweichen. Das bedeutet, dass für das potenzielle Einsatzgebiet organisatorische Maßnahmen ergriffen werden müssen, den zwingend notwendigen Informationsaustausch zu ermöglichen und durchzuführen.

### Sonstiges

Der Platz, auf dem das UAS gestartet und gelandet wird, sollte für unbeteiligte Personen abgesperrt werden und über ein Mindestmaß an Sicherheitsausrüstung verfügen. Das sind z.B. Feuerlöscher, Verbandskasten, ein Helfer der die begleitenden Arbeiten neben dem Piloten, um diesen zu entlasten, erledigt. Eine Möglichkeit, um während der Befliegung z.B. für die Luftfahrtbehörde oder den Tower eines eventuell in der Nähe befindlichen Verkehrslandeplatzes erreichbar zu sein, muss sichergestellt werden. Hierfür kommen Mobiltelefon und ggf. Funk in Frage. Dies ist nur ein kleiner Ausschnitt der organisatorischen Maßnahmen am Einsatzort. Darüber hinaus empfehlen wir den Einsatz zwingend durch ein Zwei-Personen-Team durchzuführen, welches nach mehreren Flügen ausgewechselt werden kann.

## Literaturverzeichnis

- STATISTA GMBH: Größte Hersteller ziviler Drohnen weltweit nach Umsatz im Jahr 2014. Statista. kein Datum. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/661768/umfrage/groesste-hersteller-ziviler-drohnen-nach-umsatz/> (Zugriff am 05. 07 2021).
- AEROSOL, MATTER: „DiSCmini - Handheld diffusion size classifier for nanoparticle measurement.“ Wohlen: testo company, 2001.
- AURELL, J., W. MITCHELL, V. CHIRAYATH, J. JONSSON, D. TABOR, UND B. GULLETT: „Field determination of multipollutant, open area combustion source emission factors with a hexacopter unmanned aerial vehicle .“ Atmospheric Environment, 2017: 433-440.
- bandpro. Freely Alta X Drone. kein Datum. <https://www.bandpro.com/freely-alta-x-drone.html> (Zugriff am 03. 06 2021).
- BUDGAHL, VOLKER: Entscheidungsfindung. Würzburg: Vogel Verlag und Druck KG, 1990.
- DJI. MATRICE 300 RTK. DJI: kein Datum. <https://www.dji.com/de/matrice-300> (Zugriff am 10. 06 2021).
- Dr. Stroh, Katharina, und Carolin Himmelhan. Schadstoffe bei Brandereignissen. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2011.
- DRÄGER SAFETY AG & CO. KGAA: „DrägerSensor- & Gasmessgeräte Handbuch 5. Ausgabe.“ 2021. 318.
- FLIR SYSTEMS INC.: „Datasheet FLIR Muve C360.“ 2019.
- FREELY: „Alta X Brochure.“ kein Datum. <http://freely-prod.s3.amazonaws.com/support/alta-x-brochure.pdf> (Zugriff am 03. 06 2021).
- GERBOLES, MICHEL, ALEXANDER KOTSEV, LAURENT SPINELLE, MARCO SIGNORINI, UND J. VAN DEN BROECKE: „AirSensEUR User Manual v. 3.0.“ Ispra : European Union Joint Research Centre , 2018.
- GITTA: Geographic Information Technology Training Alliance - Bewertungsmatrix. kein Datum. [http://www.gitta.info/SystProbSolv/de/html/Unit4\\_learningObject5.html](http://www.gitta.info/SystProbSolv/de/html/Unit4_learningObject5.html) (Zugriff am 2. 5 2021).
- GLOBE FLIGHT GMBH: Globe Flight Aerial Solutions. kein Datum. [https://www.globe-flight.de/Globe-Flight-Nachtflugbeleuchtung-fuer-M300?curr=EUR&gclid=CjwKCAjwtfqKBhBoEiwAZuesiHq6ohgBHCwKUocqfqbZkUITVloQ3lcgo\\_\\_UINoqYPgd1I5W-zRoCDq4QAvD\\_BwE](https://www.globe-flight.de/Globe-Flight-Nachtflugbeleuchtung-fuer-M300?curr=EUR&gclid=CjwKCAjwtfqKBhBoEiwAZuesiHq6ohgBHCwKUocqfqbZkUITVloQ3lcgo__UINoqYPgd1I5W-zRoCDq4QAvD_BwE) (Zugriff am 02. 07 2021).
- GULLETT, B., J. AURELL, W. MITCHELL, UND J. RICHARDSON: „Use of an unmanned aircraft system to quantify NOx emissions from a natural gas boiler.“ Atmospheric Measurement Techniques, 2021: 975-981.
- GULLETT, BRIAN: „Kolibri System enables mobile measurement of air emissions at the source .“ EPA, 2021.
- HANDELSBLATT: Diese chinesische Firma hat mit Drohnen den Massenmarkt erobert. 07. 01 2020. <https://www.handelsblatt.com/technik/digitale-revolution/digitale-revolution-diese-chinesische-firma-hat-mit-drohnen-den-massenmarkt-erobert/25395412.html?ticket=ST-8038720-gSfbBEgc1AHyrNqAu7Ze-ap1> (Zugriff am 12. 06 2021).
- ISM DEUTSCHLAND GMBH: „Datenblatt Tiger.“ 2020.
- KG, GRIMM AEROSOL TECHNIK GMBH & CO: „Tragbares Laser Aerosolspektrometer und Staubmessgerät Modell 1.109/1.108.“ Ainring: Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG, kein Datum.
- LBA. LBA - BETRIEB: kein Datum. [https://www.lba.de/DE/Betrieb/Unbemannte\\_Luftfahrtsysteme/FAQ/01\\_FAQ\\_Allgemein/FAQ\\_node.html](https://www.lba.de/DE/Betrieb/Unbemannte_Luftfahrtsysteme/FAQ/01_FAQ_Allgemein/FAQ_node.html) (Zugriff am 09. 06 2021).

LUFTFAHRT-BUNDESAMT: Drohnen - Fragen und Antworten zu UAS. 2019.

[https://www.lba.de/DE/Drohnen/FAQ/01\\_FAQ\\_Allgemein/FAQ\\_node.html](https://www.lba.de/DE/Drohnen/FAQ/01_FAQ_Allgemein/FAQ_node.html)

(Zugriff am 12. 06. 2021).

PREMIUM-MODELLBAU: WATTS INNOVATIONS PRISM Quadcopter Drohne . kein Datum.

<https://www.premium-modellbau.de/watts-innovations-prism-quadcopter-drohne>

(Zugriff am 11. 06. 2021).

STRICKERT, G: Faktencheck Multicopter: Ähnlichkeiten und Unterschiede zu etablierten VTOL-Konfigurationen. Lilienthalplatz 7. 38108 Braunschweig, Deutschland: DLR, Institut für Flugsystemtechnik, 2016.

TBS. TEEM BLACKSHEEP: kein Datum. <https://www.team-blacksheep.com/> (Zugriff am 05. 07. 2021).

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
(LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: + 49 351 2612-0

Telefax: + 49 351 2612-1099

E- Mail: lfulg@smul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

**Autor:**

Prof. Konradin Weber

Hochschule Düsseldorf

Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Fachgebiet Physik und Umweltmesstechnik

Münsterstr. 156

40476 Düsseldorf

Tel. +4921143513469

E-Mail: konradin.weber@hs-duesseldorf.de

**Redaktion:**

Peter Fleischer

Abteilung 5 /Referat 52

Telefon: + 49 351 2612 5202

Telefax: + 49 351 2612 5099

peter.fleischer@smekul.sachsen.de

**Redaktionsschluss:**

30.11.2021

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de