



UNLuBW LEITFADEN

INNOVATIVE LUFTSCHADSTOFFMESSUNGEN
FÜR EFFEKTIVEN UMWELTSCHUTZ



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Partner

ISME
Institut Stadt | Mobilität | Energie

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



UNISPHERE

DIE PROJEKTBETEILIGTEN



Das **Institut Stadt|Mobilität|Energie (ISME)** ist eine unabhängige privatwirtschaftliche Beratungs- und Planungsgesellschaft, begleitet vielfältige Transformationsprozesse – sowohl auf strategischer Ebene im Auftrag von Bund und Ländern und in der konkreten Umsetzung auf kommunaler Ebene. Das ISME ist Ideengeber von UnLuBW, Konsortialführer sowie für die Konzeption von (temporären) Luftreinhaltemaßnahmen und die gesellschaftliche Partizipation und Öffentlichkeitsarbeit zuständig.



Die **Arbeitsgruppe Geoinformatik der Universität Tübingen** untersucht dynamische Mensch-Umwelt-Beziehungen mithilfe digitaler Methoden. Sie übernimmt die Regionalisierung, Auswertung und Interpretation, sowie die digitale Bereitstellung und Visualisierung der Messungen. Die Erkenntnisse münden in einen Leitfaden für Kommunen zur Etablierung von unbemannten Flugsystemen bzw. uncrewed aircraft systems (UAS) zur Messung kommunaler Luftqualität.

Die **Arbeitsgruppe Umweltphysik der Universität Tübingen** widmet sich hauptsächlich der Untersuchung der unteren Atmosphäre mit UAS und bodengestützten Messnetzwerken sowie der Entwicklung der zugehörigen Messtechnik und Datenverarbeitung. In UnLuBW koordiniert sie vorrangig Messungen, bringt aber auch ihre wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Ausstattung von UAS und der Auswertung meteorologischer Variablen ein.



Die **Unisphere GmbH** entwickelt Software für die Flugplanung und den sicheren, automatisierten Betrieb von UAS. In das Projekt bringt sie ihre Erfahrung in der Genehmigung und Planung von Messkampagnen in Städten sowie die eigens entwickelte Plattform NOVA ein, mit welcher die meteorologischen Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf den geplanten Flug automatisiert und zuverlässig evaluiert werden.




Gegenstand der **Förderrichtlinie** „Innovative Luftmobilität“ ist die Entwicklung und Erprobung innovativer Anwendungen unbemannter Luftfahrtsysteme (UAS, umgangssprachlich als Drohnen bezeichnet) im anwendungsorientierten Verkehrs-, Logistik- oder Forschungsbereich. Sie wird bis 2023 vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gestellt und unterstützt sieben Projekte der Themenbereiche Luftverkehrssicherheit, Datenverfügbarkeit, individuelle und nachhaltige Mobilität sowie Lebensrettung und Versorgung des ländlichen Raums.

INHALT

Einleitung – Worum geht’s?	4
Der Anwendungsfall Luftschadstoffmessung	6
Grundlagen zu Schadstoffen, Grenzwerten und deren Messungen7
Schadstoffe und deren Entstehung7
Gesundheitseffekte.8
Grenzwerte	10
Messung und Überprüfung der Einhaltung aktuell geltender Grenzwerte mit Bodenmessstationen	10
Messtechnik in Kombination mit mobilem Gerät	12
Die Sensorik.	12
Die Drohne	14
Die Kosten	14
Das Gesamtsystem Drohne und Sensorik	15
Maßnahmen zur Reduzierung des Schadstoffaufkommens.	17
Einsatz eines Multikopters – von der Genehmigung bis zum Flug	18
Genehmigungsprozess für Flugvorhaben von Drohnen allgemein	19
Risikobewertung	19
Geographische Erlaubnis nach LuftVo §21h	23
Zusammenfassung	27
Von der Fluggenehmigung bis zum Flug mit dem entwickelten Messsystem in der speziellen Kategorie	28
Die Fluggenehmigung in der speziellen Kategorie	28
Die Messstrategie.	31
Die Genehmigung zum Betreten des jeweiligen Flugstandortes	33
Weitere zu informierende Stellen	33
Hilfreiche Tipps in der Kommunikation mit relevanten Institutionen	34
Ausgewählte Ergebnisse.	38
Gewonnene Erkenntnisse und Empfehlung aus UnLuBW.	42
Literaturverzeichnis.	44
Abbildungen und Tabellen	45
Bilder	45
Impressum	46

EINLEITUNG – WORUM GEHT’S?





Die Nutzung von UAS (engl. uncrewed, aircraft systems – auch Drohnen genannt) zur Messung von Luftschadstoffen ist ein aufstrebendes und faszinierendes Gebiet, das neue Möglichkeiten für die Überwachung der Luftqualität eröffnet. Dieser Leitfaden bietet einen detaillierten Einblick der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt UnLuBW (Unbemannte Luftschadstoffmesssysteme in Baden-Württemberg).

Zunächst wird das Thema Luftschadstoffe genauer betrachtet und deren Wirkung auf die Gesundheit und Umwelt erläutert. Ergänzend hierzu wird die erprobte Messtechnik aus dem Forschungsprojekt im Detail vorgestellt und Instrumente, die beim Einsatz von UAS zur Erfassung und Analyse der Luftschadstoffe eingesetzt wurden, aufgezeigt. Von den verschiedenen Arten von Sensoren und Messgeräten bis hin zu den Herausforderungen und Vorteilen dieser Methode – der vorliegende Leitfaden zeigt auf, wie Drohnen zur Messung von Luftschadstoffen ausgestattet und eingesetzt werden können und welche Herausforderungen es hierbei noch zu bewältigen gilt.

Die Beschreibung des Genehmigungsprozesses für den Einsatz von Drohnen, zunächst allgemein und dann ganz konkret für die im Projekt eingesetzten Drohnen, zeigen die einzelnen Arbeitsschritte und die Herausforderungen, die damit einhergehen und zu beachten sind. Denn bei der Erarbeitung des Genehmigungsprozesses müssen einige grundlegende Schritte berücksichtigt werden: Je nach Flugort und Verfahren können die Anforderungen an den Genehmigungsprozess stark variieren.

Nach erfolgreicher Durchführung des Drohneneinsatzes zur Messung von Luftschadstoffen ergeben sich wertvolle Erkenntnisse und Erfahrungen. Die gesammelten Daten ermöglichen eine Analyse der Luftqualität an verschiedenen Standorten und zu unterschiedlichen Zeiten. Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Einsatz der Drohne, wie beispielsweise organisatorische Hürden oder technische Hindernisse, liefern wichtige Erkenntnisse für zukünftige Planungen und Verbesserungen. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von UAS zur Messung von Luftschadstoffen einen innovativen Ansatz für die Umweltüberwachung und bietet Potenzial für weiterführende Forschung und Entwicklungen in diesem Bereich. Die gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen bilden somit eine solide Grundlage für zukünftige Projekte und Initiativen zur Verbesserung der Luftqualität.



Luftschadstoffemissionen aus Industrieanlage

DER ANWENDUNGSFALL LUFTSCHADSTOFFMESSUNG

Luftschadstoffe sind Beimengungen der Luft, die die Qualität der Luft negativ beeinflussen und somit die Gesundheit und die Umwelt gefährden. Bei genauer Betrachtung sind verschiedene Arten von Luftschadstoffen zu differenzieren. Zum einen gibt es Schadstoffe natürlichen Ursprungs, welche von Waldbränden, Vulkanausbrüchen oder Sandstürmen verursacht werden. Zum anderen gibt es sogenannte anthropogene Schadstoffe. Diese sind menschengemacht und werden vor allem bei Verbrennungsprozessen in der Industrie, beim Transport, der Stromerzeugung und in der Landwirtschaft verursacht.

Im Rahmen des Projektes UnLuBW wurde ein bisher neuer Ansatz zur Messung von Luftschadstoffen verfolgt. Mithilfe von Drohnen und darauf montierter Messsensorik wurden an ausgewählten Standorten punktuelle Messflüge zur Ermittlung der Luftqualität durchgeführt. Hierbei sollte geprüft werden, wie sich Luftschadstoffe in unterschiedlichen Ebenen verhalten, im Raum verteilen und woher sie stammen.



DJI Matrice 300

GRUNDLAGEN ZU SCHADSTOFFEN, GRENZWERTEN UND DEREN MESSUNGEN

SCHADSTOFFE UND DEREN ENTSTEHUNG

Im Gegensatz zu dem Spurengas CO₂, welches langlebig ist, sind viele Luftschadstoffe eher kurzfristiger Natur. Sie reagieren in der Atmosphäre und verbleiben nicht in ihrer ursprünglichen Form. Die meisten Luftschadstoffe entstehen am Boden und verteilen sich von dort aus in höhere Schichten der Atmosphäre. Unterschieden wird zunächst zwischen natürlichen und anthropogenen, also menschengemachten Luftschadstoffen. Vor allem Verbrennungsprozesse in der Energiewirtschaft und im Verkehr sind der Grund für anthropogene Luftschadstoffe. Stickstoffoxid- und Feinstaubemissionen haben ihren primären Ursprung in Verbrennungsmotoren von Fahrzeugen sowie bei Verbrennungsprozessen in Kohlekraftwerken. Ammoniak tritt am ehesten in der Landwirtschaft auf. Dort kommt er hauptsächlich im Düngemittel, Stallmist und in der Gülle vor.¹

Neben der Unterscheidung in natürliche und anthropogene Luftschadstoffe kann in Sekundär- und Primärschadstoffen differenziert werden. Ein Primärschadstoff beschreibt demnach einen Schadstoff, welcher direkt von einer Verursacherquelle freigesetzt wird wie dies bspw. bei Stickstoffoxid- und Feinstaubemissionen der Fall ist. Sekundäre Schadstoffe hingegen entstehen erst durch chemische Reaktionen unterschiedlicher Substanzen, also nachgelagert. Ein Beispiel hierfür ist das bodennahe Ozon, welches nicht mit dem Ozon in der Stratosphäre verwechselt werden sollte. Dieses bodennahe Ozon entsteht bei starker Sonneneinstrahlung aus Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen und sammelt sich dann in Bodennähe.

¹ Auf der Seite des Umweltbundesamtes gibt es eine sehr gute Übersicht mit Informationen über ausgewählte Luftschadstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick> (letzter Zugriff am 19.04.2024)

GESUNDHEITSEFFEKTE

Unabhängig von ihrer Art gehören Luftschadstoffe zu einer der am umfangreichsten untersuchten Umweltbelastungen. Untersuchungen an Tieren zeigten, dass eine mehrwöchige Belastung mit hohen Mengen an Stickstoffdioxid anhaltend Entzündungsreaktionen, allergische Reaktionen sowie eine Überempfindlichkeit der Atemwege begründen können. Weitere Experimente konnten zeigen, dass Versuchsteilnehmende mit einem leichten Asthma nach kurzen, relativ hohen Stickstoffdioxid-Belastungen stärker empfindlich reagierten. Für eine bessere Übertragbarkeit auf die allgemeine Bevölkerung sind vor allem epidemiologische Beobachtungsstudien unter realen Umgebungsbedingungen notwendig, um Effekte durch den Einfluss von Luftschadstoffen besser nachvollziehen zu können. Diese epidemiologischen Studien beschreiben die Untersuchung der Häufigkeit und Verteilung von

Krankheiten in der Bevölkerung. Hierbei können langanhaltende Belastungssituationen mit mehrjährigen Kohortenstudien oder auch kurzfristige Effekte von täglichen Veränderungen der Luftschadstoffbelastung genauer betrachtet werden. Die dort untersuchten Gesundheitsauswirkungen von Stickoxiden zeigten kurzfristig eine Verschlechterung von bestehenden Atemwegserkrankungen und langfristig die Entwicklung von neuen Atemwegserkrankungen. Bei Feinstaub wurde ein Zusammenhang zu Herz-Kreislauf-, Atemwegs-, Lungenkrebserkrankungen sowie einer erhöhten Sterblichkeit beobachtet. Die folgende Übersicht verschiedener Luftschadstoffe zeigt, welche Quellen jeweils ursächlich sind und welche möglichen Risiken für die Gesundheit und die Umwelt bestehen (Max-Planck-Institut 2019; Schulz, et al., 2018; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2019).

Tabelle 1: Darstellung der unterschiedlichen Luftschadstoffe, mögliche gesundheitliche Folgen und Entstehungsquellen (eigene Darstellung ISME nach (Umweltbundesamt, 2017))

KOHLENSTOFFMONOXID	VERURSACHER	RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT
CO	→ Kraftfahrzeugverkehr	<ul style="list-style-type: none"> → Beeinträchtigt die Sauerstoffaufnahme von Menschen und Tieren → Kann Auswirkungen auf das zentrale Nervensystem haben
STICKOXIDE	VERURSACHER	RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT
NO _x	<ul style="list-style-type: none"> → Unerwünschtes Nebenprodukt bei Verbrennungsprozessen. Hauptquelle sind Verbrennungsmotoren (Straßenverkehr) und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle 	<ul style="list-style-type: none"> → Kann zu Bronchienverengung führen → Kann Pflanzen schädigen, sowie vorzeitiges Altern und Kümmerwachstum bewirken → Trägt zur Überdüngung und Versauerung der Böden bei

AMMONIAK



VERURSACHER

- Landwirtschaft mit etwa 95 % aus Wirtschaftsdüngern, Stallmist und Gülle (70 % der gesamten Ammoniakemissionen stammen aus der Tierhaltung)
- Industrie
- Energiesektor
- Abfallwirtschaft

RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT

- Lagert sich in Ökosystemen ab
- Trägt zur Versauerung von Böden bei
- Wirkt toxisch über die Blattorgane
- Kann zum Absterben einzelner Arten führen

OZON



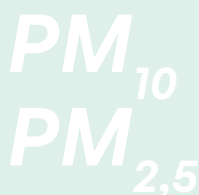
VERURSACHER

- Etwa die Hälfte kommt aus dem Verkehrsbereich (Straßenverkehr)
- Feuerungsanlagen
- Lösungsmittelhaltige Substanzen (Farben, Lacke, Klebstoffe, Reinigungsmittel)
- Verbrennung von Kraftstoffen

RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT

- Verminderte Lungenfunktion
- Entzündliche Reaktion in den Atemwegen und Atemwegsbeschwerden
- Personen mit Asthma bspw. sind besonders anfällig für hohe Ozonwerte
- Risiko für Pflanzenwachstum, Ernterträge und die Qualität der Landwirtschaft

FEINSTAUB



VERURSACHER

- Kraftfahrzeuge (Motor, Brems- und Reifenabrieb)
- Kraft- und Fernheizwerke
- Öfen und Heizungen in Wohnhäusern
- Metall- und Stahlproduktion

RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT

- PM_{10} kann beim Menschen in die Nasenhöhle, $PM_{2,5}$ bis in die Bronchien und Lungenbläschen sowie in das Lungengewebe und in den Blutkreislauf eindringen
- Schleimhautreizungen, lokale Entzündungen in der Luftröhre und den Bronchien
- Verstärkte Plaquebildung in den Blutgefäßen, erhöhte Thromboseneigung oder Veränderung der
- Veränderung der Regulierungsfunktion des vegetativen Nervensystems

SCHWEFELDIOXID



VERURSACHER

- Verbrennungsvorgänge fossiler Energieträger wie Kohle und Öl

RISIKEN FÜR GESUNDHEIT UND UMWELT

- Kann Pflanzen schädigen und nach Ablagerung in Ökosystemen eine Versauerung von Böden und Gewässern bewirken

GRENZWERTE

Luftschadstoffemissionen sind in Deutschland seit einigen Jahren mit Ausnahme von Ammoniak rückläufig (Umweltbundesamt 2021). Damit sich dieser positive Trend fortsetzt und sich die Luftqualität z. B. auch in Städten verbessert, wurden gesetzlich bindende Grenzwerte für Luftschadstoffe bestimmt. In Deutschland gelten die seitens der EU festgelegten Grenzwerte sowie Richtwerte für Luftschadstoffe, welche nach Vorschlag der EU-Kommission künftig noch weiter verschärft werden sollen (Science Media Center 2022).

Für die Festlegung von Grenzwerten werden die Kategorien Emissionen und Immissionen unterschieden. Bei der Unterteilung in **Emissionen** und **Immissionen** ist die Art der Betrachtung der Luftschadstoffe unterschiedlich. Als Emissionen werden die ausgestoßenen Gase bezeichnet, die in unterschiedlichen Mengeneinheiten wie Kilogramm oder Tonnen gemessen werden. Es gibt bspw. Grenzwerte für CO₂-Emissionen in der Industrie. Mit einem Grenzwert für diese Emissionen wird direkt an der Quelle, also dem Ausstoß des jeweiligen Schadstoffes, angesetzt. Im Gegensatz dazu stehen die Immissionen. Immissionen bezeichnen den Einfluss der ausgestoßenen Stoffe auf die Umwelt und den Menschen. Sollen die Auswirkungen der unterschiedlichen Schadstoffe auf die Gesundheit der

Menschen oder die Umwelt gesenkt werden, sind die Konzentration des jeweiligen Schadstoffes, also die Masse je Volumeneinheit, zu berücksichtigen.

Die Grenzwerte für Immissionen, welche die Konzentration der jeweiligen Schadstoffe in der Atemluft regulieren sollen, wurden für unterschiedliche Schadstoffe in der EU-Richtlinie 2008/50/EG und dessen Überführung in deutsches Recht durch das **Bundesimmissionsschutzgesetzes 2010**, verankert. In der folgenden Tabelle werden geltenden Obergrenzen für unterschiedliche Immissionswerte aufgeführt. Diese zeigen (sofern für den jeweiligen Luftschadstoff vorhanden) die maximal erlaubte Konzentration des jeweiligen Stoffes in der Atemluft. Dem gegenüber stehen Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO), welche aufgrund neuester Forschungserkenntnisse ihre Empfehlungen hinsichtlich der Grenzwerte im Jahr 2021 erneut angepasst hat. Wird beides miteinander verglichen, fällt auf, dass die Empfehlungen seitens der WHO deutlich restriktiver ausfallen als die final bestimmten Grenzwerte der EU. Demnach ist zu erwarten, dass es in den kommenden Jahren noch weitere Grenzwertsenkungen geben kann, um die gesundheitlichen Folgen, welche im Zusammenhang mit Luftschadstoffen stehen, weiter zu reduzieren.

MESSUNG UND ÜBERPRÜFUNG DER EINHALTUNG AKTUELL GELTENDER GRENZWERTE MIT BODENMESSSTATIONEN

Die Einhaltung der Grenzwerte wird derzeit mit stationären Messeinrichtungen überwacht. Aufgrund ihrer hohen Anschaffungs- und Betriebskosten werden diese Stationen nicht flächendeckend errichtet, sondern an ausgewählten Standorten aufgestellt. Hierfür sind derzeit deutschlandweit rund 650 stationäre Messstationen im Einsatz. Diese erfassen und dokumentieren kontinuierlich die Schadstoffbelastung in der Luft. Die Verfahren zur Messung von vielen Luftschadstoffen bspw. Stickstoffdioxid und Feinstaub sind genormt und

die Aufstellung der jeweiligen Messstationen ist im Gesetz geregelt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2017). Die dadurch erzielten Messergebnisse ermöglichen einen Überblick über lokale und regionale Luftverschmutzungen. Die stationären Messstationen werden in der Regel von den jeweiligen Landesumweltbehörden betrieben. Darüber hinaus hat das Umweltbundesamt (UBA) ebenfalls Messstationen errichtet, die Luftschadstoffe erfassen. Die Ergebnisse aller Messstationen werden vom UBA

Tabelle 2: Übersicht Grenzwerte für Luftschadstoffe und Empfehlungen von WHO sowie gegenübergestellt EU-Grenzwert (eigene Darstellung ISME nach (Science Media Center, 2022))

	WHO-Empfehlungen		EU-Grenzwerte	
	Guideline 2005	Guideline 2021	Aktuelle geltende	Vorschlag der EU-Kommission
PM_{2.5}	10 µg/m ³	5 µg/m ³	25 µg/m ³	10 µg/m ³
	Jahresmittelwert		Jahresmittelwert	
	25 µg/m ³ (3)	15 µg/m ³ (3)		25 µg/m ³
	24-Stunden-Maximum		24-Stunden-Maximum	
PM₁₀	20 µg/m ³	15 µg/m ³	40 µg/m ³	20 µg/m ³
	Jahresmittelwert		Jahresmittelwert	
	50 µg/m ³ (3)	45 µg/m ³ (3)	50 µg/m ³ (3)	45 µg/m ³ (18)
	Tagesmittelwert		Tagesmittelwert	
NO₂	40 µg/m ³	10 µg/m ³	40 µg/m ³	20 µg/m ³
	Jahresmittelwert		Jahresmittelwert	
	200 µg/m ³		200 µg/m ³	200 µg/m ³ (1)
	1-Stunden-Maximum		1-Stunden-Maximum	
O₃	100 µg/m ³	100 µg/m ³	120 µg/m ³ (25)	120 µg/m ³ (18)
	8-Stunden-Maximum		8-Stunden-Maximum	
	20 µg/m ³		125 µg/m ³ (3)	50 µg/m ³ (18)
SO₂	Tagesmittelwert		Tagesmittelwert	
	500 µg/m ³		350 µg/m ³ (24)	
	10-Minuten-Maximum		10-Minuten-Maximum	

Grenzwerte Luftverschmutzung*

zusammengeführt, aufbereitet und regelmäßig veröffentlicht.

Um die Messwerte zwischen einzelnen Stationen sowie im zeitlichen Verlauf vergleichen zu können, sind einheitliche Messbedingungen unabdingbar. Von zentraler Bedeutung hierbei ist der

Aufstellungsort der jeweiligen Messstationen. Wie die Stationen aufgebaut werden sollen, ist in den Anlagen des Bundesimmissionsschutzgesetzes geregelt. In Abhängigkeit der Luftzirkulation können sich die Messwerte entlang einer Hauptverkehrsstraße stark unterscheiden (Umweltbundesamt 2022).

* https://www.sciencemediacenter.de/fileadmin/user_upload/Fact_Sheets_PDF/SMC-Tabelle_Grenzwerte_Luftverschmutzung_2022-10-26.pdf (letzter Zugriff am 19.04.2024)

MESSTECHNIK IN KOMBINATION MIT MOBILEM GERÄT

Im Forschungsprojekt UnLuBW wurde eine vom derzeit eingesetzten Messverfahren abweichende Methodik entwickelt und erprobt. Im folgenden Kapitel wird die im Projekt entwickelte und eingesetzte Technik bestehend aus Drohne und Sensorik vorgestellt. Die Gründe, warum im Projekt UnLuBW Drohnen zur Messung von Luftschadstoffen erprobt wurden, sind vielfältig. Schadstoffmessungen mithilfe von Drohnen haben das Potenzial, Umweltverschmutzung und Schadstoffquellen flexibel zu

messen und somit effizient zu überwachen. Moderne Drohnen werden z. T. bereits mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet wie bspw. Infrarotkameras, Gas- und Partikelsensoren. Diese Technologie bietet den Vorteil, dass sie mobil in unterschiedlichsten Gebieten eingesetzt werden kann, was herkömmliche Messmethoden nicht leisten können. Zudem ist eine Auswertung der Drohnenmessdaten mit Geoinformationssystemen (GIS) möglich, um eine räumliche Zuordnung der Messergebnisse vorzunehmen.

DIE SENSORIK

Für die Messung von Luftschadstoffen können unterschiedliche Sensoren erprobt und eingesetzt werden. Hierbei ist neben der präzisen Messung auch das Gewicht des jeweiligen Sensors entscheidend, da die potenzielle Nutzlast (also das Gewicht, welches eine Drohne zusätzlich tragen kann) begrenzt ist. Speziell im Bereich der Gassensorik sind kleine und leichte, zugleich aber präzise und schnelle Sensoren noch kaum vorhanden. Elektrochemische Sensoren sind zwar klein und haben eine geringe Masse, arbeiten oft allerdings langsam und ungenau. Diese Sensoren sind vorrangig für die Innenraumüberwachung von Gasen konzipiert. An einem mobilen System, welches sich in der Atmosphäre bewegt und gleichzeitig starken Luftströmungen ausgesetzt ist, sind diese Sensoren daher nur bedingt geeignet. Für Gase wie CO₂ gibt es bereits kleine und leichte Sensoren, die auf dem Prinzip des NDIR (nondispersive infrared) sehr gute Ergebnisse liefern. Für andere Gase wie NO₂ oder O₃ sind solche Sensortypen (noch) nicht verfügbar. Um schnelle und genaue Messdaten dieser Gase mithilfe einer Drohne zu erhalten, werden professionelle Sensoren, wie sie auch in offiziellen Messstellen verwendet werden, benötigt. Diese basieren zum Teil auf dem photoakustischen Messprinzip. Hier werden die Gase mit der für sie

typischen Wellenlänge mit einem Laser zum Schwingen angeregt. Diese pulsierende Schwingung der Teilchen verursacht eine Druckschwankung, welche von „Mikrofonen“ aufgenommen und in ein Messsignal umgewandelt wird. Durch die technologische Entwicklung sind diese Art von Sensoren leicht und klein genug geworden, um auch auf Drohnen verbaut zu werden. Es sind jedoch noch weitere Verbesserungen notwendig, um die Messgenauigkeit von Drohnen zur Schadstoffmessung effizienter und sicherer zu machen. Die Bestimmung von Partikelmassen (PM) auf Drohnen und anderen fliegenden System wurde in den vergangenen Jahren oft erprobt und liefert gute Ergebnisse.

Meteorologische Bedingungen spielen bei der Bestimmung von Schadstoffkonzentrationen eine wichtige Rolle. Die eingesetzte Sensorik zur Bestimmung von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sind mittlerweile erprobt und kann bei vielen Herstellern mit kleinem Formfaktor und guter Genauigkeit gekauft werden. Die Messung der mittleren Windrichtung und -geschwindigkeit ist aufgrund des durch die Drohne selbst erzeugten „downwashes“² im Flug mit konventionellen Geräten wie Schalenkreuz- oder Ultraschallanemometer nicht adequat

2 Abwärts gerichteter Luftstrom durch die Drehung der Rotoren

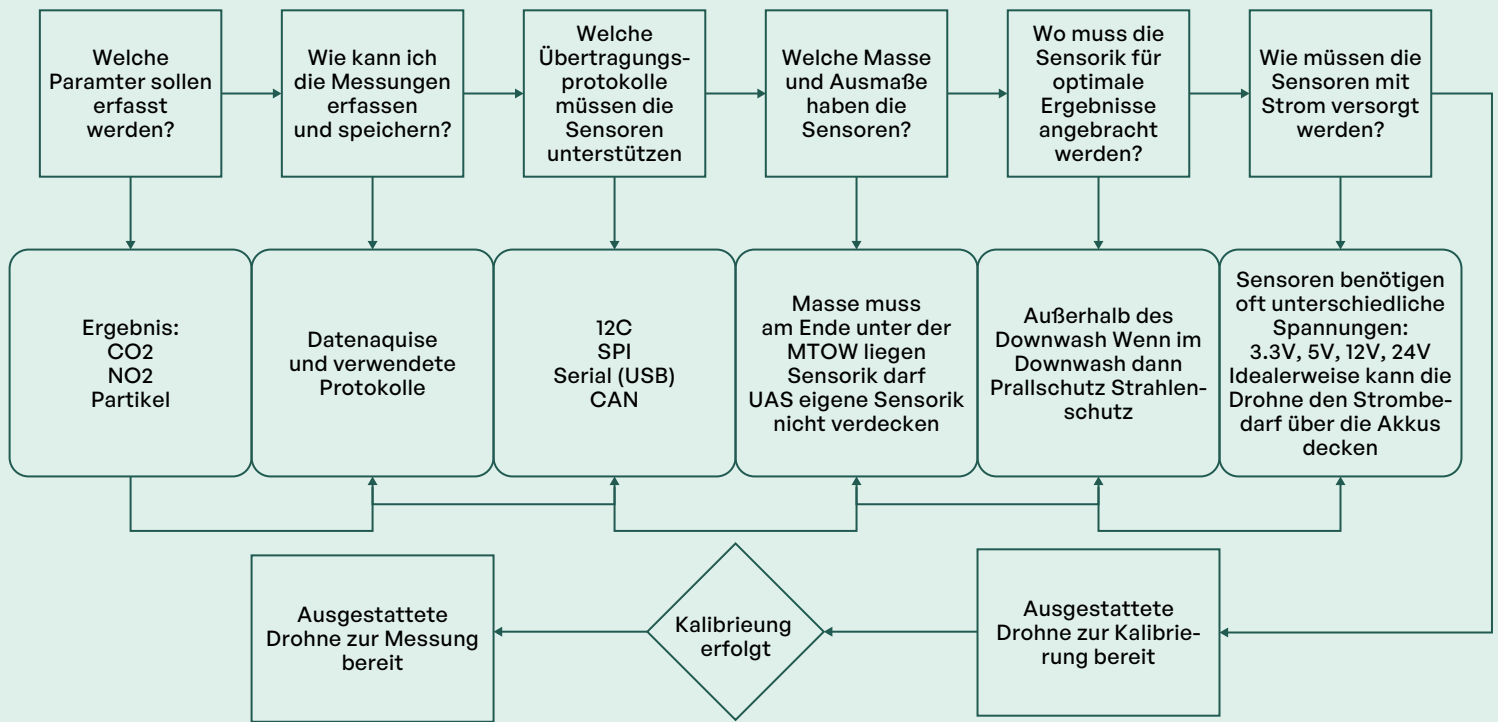


Abbildung 1: Auswahl Sensorik für Drohne (eigene Darstellung Universität Tübingen)

umzusetzen. Eine effektivere Methode zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit und -richtung im Flug ist die Verwendung der Fluglagedaten der Drohne.

Für das Forschungsprojekt UnLuBW wurde ein Gesamtsystem aus UAS und Sensorik den Anforderungen zur Messung von Luftschadstoffen in urbanen Gebieten entsprechend ausgewählt und entwickelt. Bei der Auswahl der Drohne wurde der Fokus zunächst auf die Auswahl geeigneter Sensorik gelegt.

- Welche Schadstoffe/Daten sollen die Sensoren erfassen?
 - NO₂
 - CO₂
 - O₃
 - Partikelmassen (Feinstaub)
 - Meteorologische Daten (Wind, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit)
- Wie viel Nutzlast muss die Drohne tragen können? (bspw. bei Montage zusätzlicher Anbauten) Wie groß und schwer ist die Drohne insgesamt?

- Wo soll die Drohne aufsteigen?
 - Im urbanen Raum, nahe Menschen, Verkehrswegen und Gebäuden
- In welcher Flughöhe soll die Drohne aufsteigen?
 - So hoch wie möglich, um viele Daten zu den Luftschadstoffen auf unterschiedlichen Höhen sammeln zu können
- Welche Eigenschaften muss die Drohne haben um die gewählten/benötigten Aufgaben zu erfüllen?
- Sind besonders große Windgeschwindigkeiten möglich? Soll bei anderen widrigen Bedingungen wie Regen, Schnee, Nebel oder kalten/heißen Temperaturen geflogen werden?

Kurz nach Start des Projektes stand fest, dass Sensorik zur Messung von NO₂ montiert werden soll. Für die verbleibende Nutzlast wurden mithilfe der Beantwortung der Fragestellungen in Abbildung 1, die restlichen Sensoren ausgewählt.

DIE DROHNE

Für das Projekt war eine Drohne notwendig,

- die ausreichend Nutzlast bietet, um all die Sensorik tragen zu können
- die Kollisionssensorik in möglichst viele Raumrichtungen und weitere Sicherheitsfeatures besitzt
- die eine sehr gute und intuitive Steuerung/Bedienung erlaubt
- die einen guten Autopiloten bietet
- die von einem namhaften Hersteller produziert wird, was ein Vorteil beim späteren Genehmigungsverfahren für diesen Typ Drohne sein kann.

Mit dem zuvor definierten Anforderungsprofil wurden im Fall des Forschungsprojektes UnLuBW eine DJI Matrice 300 ausgewählt.

Da unter anderem die NO₂ Konzentration in der Atmosphäre gemessen werden sollte, wurde für diesen Zweck ein professionelles Gerät mit dem kleinsten Formfaktor, welcher momentan verfügbar

ist, angeschafft. Der Sensor der Firma Knestel hatte nach Maßnahmen zur weiteren Reduktion des Gewichtes noch eine Gesamtmasse von etwa 1,8 kg. Zusammen mit der restlichen Sensorik war es notwendig eine Drohne mit einer maximalen Nutzlast von mehr als 2 kg zu beschaffen.

Neben der Beachtung des MTOW (Maximum Take Off Weight) ist im urbanen Raum vor allem der Sicherheitsaspekt ausschlaggebend. Die Flüge mit einer Drohne dieser Größenordnung und diesem Missionsprofil werden nahezu immer in der „speziellen“ Kategorie betrieben. Zusammen mit der sehr umfangreichen Dokumentation und etablierten Wartungsanweisungen des Herstellers wird eine Zulassung der geplanten Missionen deutlich vereinfacht. Ein weiterer positiver Effekt einer solchen Drohne, die speziell für industrielle Anwendungen entwickelt wurde, ist das hohe Maß an Sicherheitsfeatures. Das Risiko einer Kollision mit Hindernissen oder anderen Luftverkehrsteilnehmern ist durch technische Lösungen des Herstellers bereits deutlich reduziert.

DIE KOSTEN

Die Kosten eines solchen Systems hängen stark von der gewünschten Sensorik und dem geplanten Standort für die Befliegung ab. Denn der Standort entscheidet zugleich welche Sicherheitsmaßnahmen die Drohne leisten muss, um den Genehmigungsprozess schneller und erfolgsversprechender zu gestalten. Drohnen mit größerer Nutzlast, wie die im Projekt UnLuBW verwendete DJI Matrice 300, liegen im Bereich von ca. 10.000 €. Dazu kommen noch zusätzliche Akkus, um eine kontinuierliche Befliegung zu erlauben. Diese liegen pro Akkusatz (eines wird benötigt, um die Drohne zu betreiben) bei etwa 1.600 €. Zuletzt wird noch eine Ladestation für die Akkus benötigt, diese liegt bei 1.500 €. Insgesamt liegen die Kosten für eine Drohne dieser Größenordnung bei etwa 13.000 €. Allerdings handelt es sich hierbei um den Marktführer für Multirotor-Drohnen.

In Deutschland entwickelte und gefertigte Drohnen in dieser Gewichtsklasse können diesen Preis deutlich übersteigen. Je nach Größe und Ausmaß der Sensoren kann auch eine kleinere Drohne gewählt werden, die entsprechend preisgünstiger sind. Die Kosten der Sensorik hängen sehr stark von den zu messenden Parametern und deren Qualität ab. Der professionelle Sensor der Firma Knestel zum Messen von NO₂ liegt zum Beispiel bei 7.000–10.000 €. Insgesamt können die Kosten für ein solches System, je nach Begebenheiten, zwischen 14.000 € und 25.000 € liegen. Die genannten Preise sind Werte aus eigener Erfahrung und können sich entsprechend der Marktlage ändern.



DJI Matrice 300 mit Fallschirm ohne NO₂ Sensor



DJI Matrice 300 ohne Fallschirm mit NO₂ Sensor

DAS GESAMTSYSTEM DROHNE UND SENSORIK

Mit der gewählten Sensorik, passender restlicher Elektronik und der Anbauteile aus 3D-Druck zur Montage der Sensorik an der Drohne, erreicht diese eine Gesamtmasse (MTOW) von knapp 8,7 kg. Dabei setzt sich die Nutzlast aus der Masse des bereits genannten NO₂ Sensors mit 1,8 kg und der restlichen Sensorik und Anbauteilen mit insgesamt 0,6 kg zusammen. Die einzelnen Sensoren des oberen Sensorpaketes haben Massen zwischen 0,01 kg und 0,06 kg, wobei der verwendete Partikelsensor etwa 0,1 kg wiegt. Zu der Sensorik muss noch der Aufbau zur Befestigung, der Minicomputer zur Speicherung der Messdaten und die Kabelverbindungen zwischen den Sensoren und dem Minicomputer addiert werden. Somit erreicht der gesamte Messaufbau eine Masse von etwa 2,4 kg.

Da die DJI Matrice 300 über eine maximale Nutzlast von 2,7 kg verfügt, war die Verwendung eines Fallschirmes aufgrund der bereits ausgelasteten Nutzlast ausgeschlossen. Die zweite im Projekt verwendete Drohne wurde nahezu gleich aufgebaut, jedoch ohne den NO₂ Sensor der Firma Knestel. Stattdessen konnte ein Fallschirm verbaut werden. Die Bilder am Seitenanfang zeigen die beiden im Projekt eingesetzten Drohnen in zwei unterschiedlichen Ausführungen. Auf dem linken Bild ist die Drohne mit Fallschirm, auf dem rechten Bild ist die Drohne mit NO₂ Sensor zu erkennen.

Die maximale Flugzeit der Drohne hängt stark von der Masse der Nutzlast ab. Mit den im Projekt verwendeten Drohnen und deren Nutzlasten sind in der realen Atmosphäre Flugzeiten von etwa 25 Minuten

Tabelle 3: Übersicht Drohnensystem (eigene Darstellung Universität Tübingen)

Drohne

DJI Matrice 300 (3,6 kg ohne Akkus; 6,3 kg mit Akkus)
Akkus
Fernbedienung
Ersatzteile
Fallschirm

Sensoren

Variable	Sensor	Messprinzip
NO ₂	Knestel NO ₂ Sensor	Photoakustisch
NO ₂	DFRobot SEN0471	elektrochemisch
CO ₂	Sensirion SCD30	NDIR (infrarot)
O ₃	DFRobot SEN0321	elektrochemisch
Partikel (PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀)	Alphasense N3-OPC	optisch
Lufttemperatur	Sensirion SHT31	CMOSens
Luftfeuchte	Sensirion SHT31	CMOSens
Luftdruck	Bosch BME280	
Windgeschwindigkeit	DJI Matrice 300	Lagewinkel
Windrichtung	DJI Matrice 300	Lagewinkel

Datenakquise

Raspberry Pi Zero W

Datenübertragung

XBee3

möglich. Je nach Größe und Nutzlast des eingesetzten Systems unterscheidet sich dieses auch in der Lautstärke während des Fluges. In direkter Umgebung sind Drohnen wie die DJI Matrice 300 deutlich wahrnehmbar und können je nach Situation auch als störend empfunden werden.

Ein weiterer, besonders im städtischen Raum, relevanter Faktor ist der Datenschutz. Befindet sich an der Drohne eine Kamera, welche Bilder und/oder Videos aufzeichnen kann, ist zu beachten, dass Datenschutzrichtlinien bei der Aufnahme

sowie Verwendung dieses Bild bzw. Videomaterials berücksichtigt werden müssen. Bei der im Projekt verwendeten Drohne ist zwar eine Kamera verbaut, diese besitzt aber nicht die Fähigkeit, Bilder oder Videos aufzuzeichnen. Sie dient lediglich zur Orientierung des/der Piloten:in während des Fluges (eine sogenannte FirstPersonView-Kamera). In Tabelle 3 wird die verwendete Hardware, welche für die Messungen innerhalb des Projektes UnLuBW verwendet wurden, aufgeführt.

MASSNAHMEN ZUR REDUZIERUNG DES SCHADSTOFFAUFKOMMENS

Parallel zur Erprobung des Gesamtsystems zur Messung von Luftschadstoffen sollten im Projekt UnLuBW ausgewählte Maßnahmen zur Reduktion der lokalen, verkehrsbedingten Luftschadstoffe identifiziert und evaluiert werden. Nach einer Recherche wurden folgende Kategorien zur Ableitung möglicher Maßnahmen unter den Oberthemen Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung des Verkehrs zusammengetragen:

In zwei der beteiligten Kommunen konnte gemeinsam mit unseren Ansprechpersonen jeweils eine Maßnahme identifiziert werden, welche mit dem entwickelten Messsystem vor und nach Umsetzung mit Messflügen begleitet wurde. Zum einen wurde die Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 auf 30 km/h (Lörrach) begleitet. Zum anderen wurde eine Spurenverengung von zwei auf eine Spur aufgrund von Bauarbeiten (Kehl) begleitet. Für die Durchführung der Messungen mit der Drohne wurden je Maßnahme geeignete Standorte ausgewählt und für den Genehmigungsprozess vorbereitet.

Tabelle 4: Übersicht Auswahlkriterien für Maßnahmen zur Reduzierung von Luftschadstoffen (eigene Darstellung ISME)

Vermeidung	Verlagerung	Verbesserung
Vermischung von Wohn-, Arbeits- und Freizeitquartieren	Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur	Filteranlagen (Straßenrand/Fahrzeugen)
Paketstationen	Förderung des ÖPNV	Verringerter Energieverbrauch durch bessere Aerodynamik, Gewichtsreduktion
	Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h	
	Spurenverengung bzw. Spurenspernung	
	Steigerung der Attraktivität des ÖPNV	
	Steigerung der Attraktivität von Ridesharing	



Vorbereitung des Messfluges im Rosensteinpark in Stuttgart

EINSATZ EINES MULTIKOPTERS – VON DER GENEHMIGUNG BIS ZUM FLUG

Drohnen zur Messung von Luftschadstoffen einzusetzen ist nur ein möglicher Einsatzbereich aus einer Vielzahl möglicher Einsatzbereiche. In vielen Branchen gehört die Nutzung von Drohnen mittlerweile zum Alltag. Folgende Einsatzbereiche sind unter anderem denkbar:

- **Landwirtschaft:** Hier werden sie zur Überwachung von Feldern, zur Ernteoptimierung und zur Früherkennung von Schädlingsbefall eingesetzt.
- **Bauindustrie:** Mithilfe von Drohnen können Baustellen inspiziert und Vermessungsarbeiten durchgeführt werden, was Zeit und Ressourcen spart.
- **Logistikunternehmen:** Diese setzen sie im Bereich der Intralogistik ein, um Lagerbestände effizienter zu verwalten.
- **Energiebranche:** Darüber hinaus haben Drohnenanwendungen in der Energiebranche, bspw. bei der Inspektion von Stromleitungen und Windkraftanlagen erheblich zur Verbesserung der Sicherheit und Kosteneffizienz beigetragen.
- **Filmindustrie und im Marketing:** Hier werden sie für beeindruckende Luftaufnahmen und Werbezwecke eingesetzt.

GENEHMIGUNGSPROZESS FÜR FLUGVORHABEN VON DROHNEN ALLGEMEIN

Wenn mit einer Drohne geflogen werden soll, gilt es folgende Bedingungen unabhängig einer geltenden Genehmigungspflicht für den Einsatz einer Drohne zu erfüllen:

- **Mindestalter:** Es gilt ein Mindestalter von 16 Jahren (außer bei Zertifizierung in der Klasse C0).
- **Registrierungspflicht** für alle Piloten: Jeder Drohnen-Pilot muss sich online beim LBA (Luftfahrt Bundesamt) registrieren und erhält eine Registrierungsnummer (e-ID).
- **Versicherungspflicht:** Eine Drohnen-Haftpflichtversicherung ist gesetzlich für alle Drohnen vorgeschrieben (nach Landesvorgabe laut § 43 Luftverkehrsgesetz – LuftVG).
- **Beachtung der Privatsphäre:** keine Aufnahmen von Personen ohne Erlaubnis (im Landesgesetz verankert, nicht im EU-Drohnengesetz)

Ob für den geplanten Einsatzzweck eine Fluggenehmigung notwendig ist, hängt im Wesentlichen

von den drei Faktoren Größe und Gewicht, Besitzverhältnisse des zu überfliegenden Geländes sowie der geplanten Flughöhe ab. Je größer und schwerer die Drohne ist, desto wahrscheinlicher ist die Notwendigkeit zur Beantragung einer Fluggenehmigung. Zusätzlich sind die Besitzverhältnisse des zu überfliegenden Geländes zu beachten. Eine Unterscheidung ist vor allem zwischen privaten und nicht privaten Gelände durchzuführen (z. B. Ackerbau Betreibende, die eine Drohne über eigenen Feldern verwenden vs. die Inspektion von Brücken oder Windenergieanlagen im öffentlichen Raum). Hierbei ist die Besiedelungsdichte ein wichtiger Einflussfaktor. Außerdem ist die Nähe zu Industrieanlagen, Bundesstraßen, Bundeswasserstraßen oder anderer Infrastruktur zu berücksichtigen. Je nach Einsatzzweck können auch größere Flughöhen notwendig sein. Generell gilt ähnlich wie mit den Faktoren Gewicht und Größe je höher mit der Drohne aufgestiegen werden soll, desto wahrscheinlicher ist die Notwendigkeit einer Fluggenehmigung.

RISIKOBEWERTUNG

Mithilfe eines Entscheidungsbaums zur Risikobewertung des Luftfahrtbundesamtes kann das jeweilige Flugvorhaben geprüft werden, um herauszufinden, ob es genehmigungspflichtig ist oder nicht (je nach Kategorie) und wie hoch das Betriebsrisiko des jeweiligen Fluges ist. Im weiteren Verlauf des Leitfadens werden die drei relevantesten Kategorien (offene Kategorie, spezielle Kategorie und die zulassungspflichtige Kategorie) vorgestellt und daraus hervorgehende Bedingungen für die Durchführung der geplanten Flugvorhaben skizziert.

Offene Kategorie

Die am wenigsten restriktive Kategorie ist die offene Kategorie. Ergibt die Bewertung der Faktoren Größe und Gewicht, der Besitzverhältnisse des zu überfliegenden Geländes sowie der geplanten Flughöhe ein geringes Risiko, wird die offene Kategorie vergeben. Hierbei werden 3 bzw. 5 Unterkategorien unterschieden (von A1 bis A3). Diese lassen sich in urbane und außerhalb urbaner Gebiete unterscheiden. In Abbildung 2 wird aufgezeigt, mit welcher CE-Klasse der Drohne in welcher Unterkategorie geflogen werden kann. Je nach Unterkategorie wird ein Kompetenznachweis bzw. „Führerschein“ benötigt.

Welches Risiko geht von meinem Flugbetrieb aus? (Bewertung meines Betriebsrisikos)

Kategorie	Offen				Speziell	pflichtig
Unterkategorie	A1 (Überflug)	A1	A3	A2	SAIL I ... VI	
Kompetenznachweis/ Lizenz	A1/A3 empfohlen	A1/A3		A2	Entsprechend A2 oder höher	RPL
Neben der Betreiber- registrierung wird gefordert:	Einhaltung der Regeln in eigener Verantwortung!				Betriebsgenehmigung der zuständigen Behörde. Die Voraussetzung ist ein detailliertes Betriebshand- buch auf Grundlage einer Risikoanalyse nach EASA-SORA	Betriebszertifizierung der EASA. Unter Einhaltung sämtlicher Luftfahrt- normen und Standards
...sowie die Einhaltung: Nationaler Vorschriften	z. B. Geografische Gebiete					

GESCHAFFT, VIEL SPAß BEIM FLIEGEN!

Abbildung 2: Risikobewertung Vorprüfung gemäß Betriebsdetails LBA-V2.3 (eigene Darstellung ISME nach DVO (EU) 2019/947 (gültig bis 31.12.2023)³

A1/A3 sind ausschließlich für die offene Kategorie anwendbar, der A2-Nachweis kann sowohl in der offenen als auch in der speziellen Kategorie eingesetzt werden.⁴ Besitzt die jeweilige Drohne eine Abflugmasse von weniger als 500 g bzw. 250 g ist keine explizite Erteilung einer Fluggenehmigung notwendig. Gleichzeitig sind mit dieser Drohnggröße bereits einige Einsatzzwecke realisierbar (bspw. im Marketing- oder Designbereich für Foto- und Filmaufnahmen). Da zusätzliche externe Anbauten (Kameras/Sensorik) die mögliche Nutzlast der Drohne schnell übersteigen, bleiben mögliche Einsatzzwecke auf die in der Drohne bereits integrierte Kamera beschränkt. Wichtig ist, dass nicht zusätzlich eine der weiterhin geltenden Erlaubnispflichten oder Verbote der §§ 21a, 21b der Luftverkehrs-Ordnung zutreffend sind.

Grundsätzlich zu beachten sind:

- eine max. Flughöhe von 120 m

- Flüge sollten ausschließlich innerhalb der Sichtweite des/der Piloten:in durchgeführt werden und nicht über Menschenansammlungen stattfinden (sofern Zertifizierung der Drohne nicht vorliegt)
- Die Drohne sollte unter 25 kg wiegen
- Es dürfen keine Gegenstände abgeworfen und keine gefährlichen Gegenstände transportiert werden
- Ohne das Einverständnis der jeweiligen Personen, darf mit der Kamera einer Drohne weder fotografiert noch gefilmt werden bzw. darf das Material nicht veröffentlicht werden

Spezielle Kategorie

In der speziellen Kategorie ist es immer notwendig, über den Kompetenznachweis A2 zu verfügen. Dabei muss es nicht zwingend der/die Pilot:in sein, der/die diesen besitzt. Es genügt, wenn eine andere dauerhaft am Geschehen beteiligte Person über den Kompetenznachweis A2 verfügt.

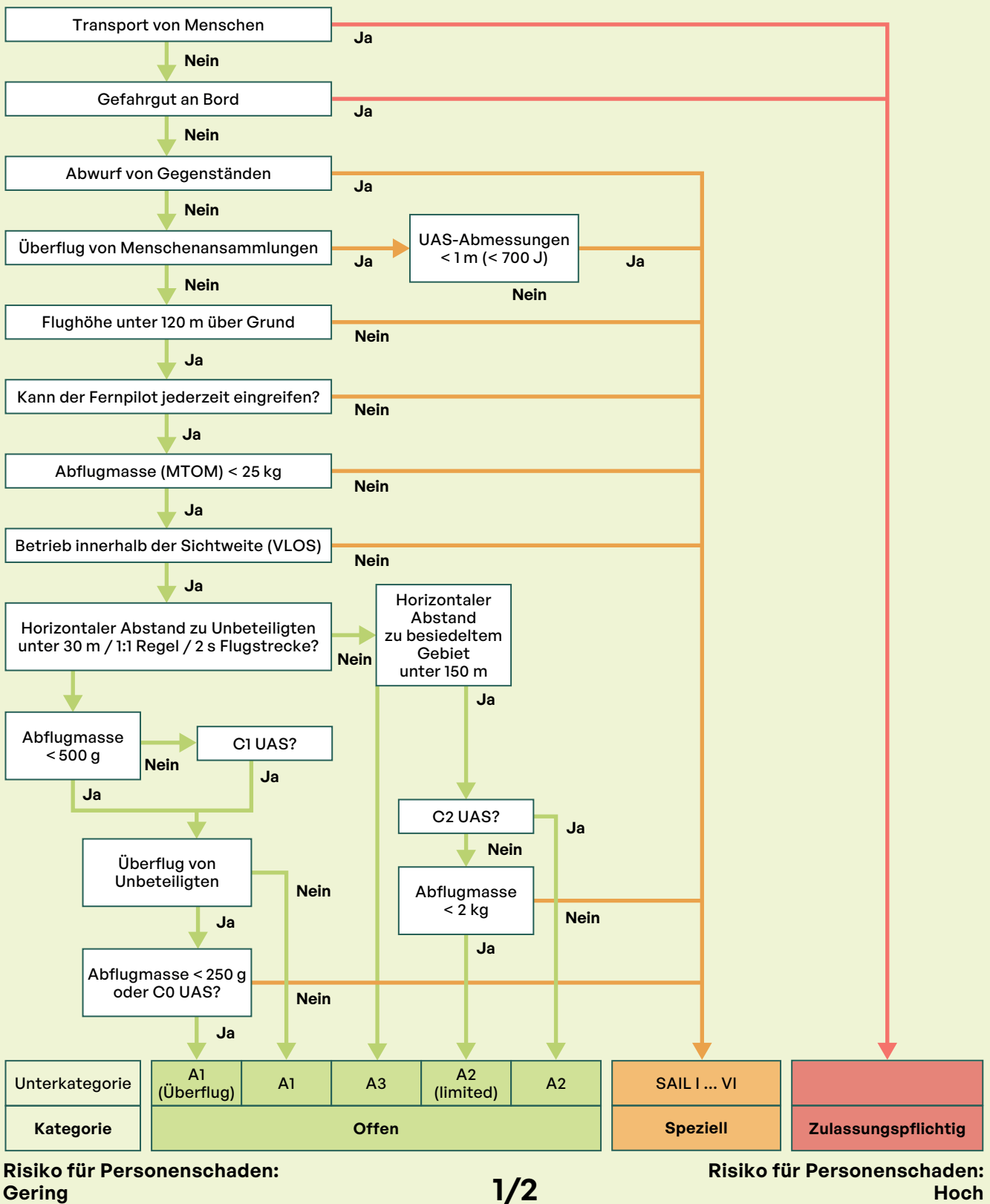
³ https://www.lba.de/DE/Drohnen/Allgemeine_Informationen/Risikobewertung/Risikobewertung_node.html (letzter Zugriff am 19.04.2024)

⁴ A1/A3: https://www.lba.de/DE/Drohnen/Fernpiloten/Kompetenznachweis_A1_A3.html (letzter Zugriff am 19.04.2024)

A2: https://www.lba.de/DE/Drohnen/Pruefstellen_PStF/Liste_der_benannten_Pruefstellen_node.html;jsessionid=5B140E87CE952113078D9B6357843DB8.live21301 (letzter Zugriff am 19.04.2024)

⁵ https://www.lba.de/DE/Drohnen/Allgemeine_Informationen/Risikobewertung/Risikobewertung_node.html (letzter Zugriff am 19.04.2024)

**Vollständige Risikobewertung nach den Betriebsdetails LBA-V2.3
Auf Grundlage der DVO (EU) 2019/947 (gültig bis 31.12.2023)**



LBA-V3.6

Abbildung 3: Vollständige Risikobewertung gemäß Betriebsdetails LBA-V2.3 (eigene Darstellung ISME nach DVO (EU) 2019/947 (gültig bis 31.12.2023))⁵

In der speziellen Kategorie gestaltet sich der Genehmigungsprozess etwas umfassender im Vergleich zur offenen Kategorie. Für den Erhalt einer Fluggenehmigung bzw. Betriebsgenehmigung muss das Risiko, welches von dem geplanten Flug oder den geplanten Flügen ausgehen kann, bewertet werden. Hierzu sind zwei Prüfungsansätze möglich: Entweder wird das Risiko mithilfe eines Predefined Risk Assessment (PDRA) oder eines Specific Operations Risk Assessment (SORA) abgeschätzt und bewertet.

Das PDRA ist dabei der schnellere Weg, setzt aber voraus, dass die Mission (Flugvorhaben), die geflogen werden soll, dem eines von der EASA bzw. den nationalen Behörden definierten Standardszenario entspricht. Ab Januar 2024 soll es diese Europäischen Standardszenarien (STS) geben, welche einen vordefinierten Ablauf beschreiben. Für Betreibende ist es dann nicht verpflichtend, eine Betriebsgenehmigung (bzw. Fluggenehmigung) einzuholen, wenn das geplante Flugvorhaben ein STS ist. Aktuell gibt es zwei veröffentlichte STS (STS-01 oder STS-02). Demnach besteht die Möglichkeit für diese zwei Szenarien eine Erklärung bei der zuständigen Luftfahrtbehörde abzugeben (sogenannte Declarations mit Angabe, ob STS 01 oder STS 02 durchgeführt werden soll).

Handelt es sich bei der geplanten Mission um kein Standardzenario, ist eine Risikoanalyse mithilfe eines SORA (Specific Operations Risk Assessment) für das geplante Flugvorhaben durchzuführen und bei der entsprechenden Landesluftfahrtbehörde einzureichen. Die Erstellung eines SORA beschreibt eine Methodik zur Klassifizierung des vom geplanten Drohnenflug ausgehenden Risikos sowie zur Ermittlung von Abhilfemaßnahmen und Sicherheitszielen. Die Prüfung beinhaltet einen zehnstufigen Prozess, der mit der Beschreibung des Einsatzes und der Bewertung des Boden- und Luftrisikos beginnt.

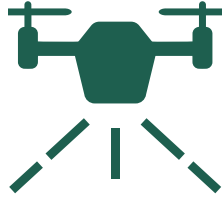
- Das **Bodenrisiko** beschreibt das Risiko, das für Personen, Eigentum oder kritische Infrastruktur entstehen könnte, wenn Sie von einer Drohne getroffen werden. Die wichtigsten Eckpunkte hierbei sind:
 - Die Bevölkerungsdichte am Flugort,
 - die Flughöhe – also ob die Drohne noch im visuellen Sichtfeld des/der Piloten:in liegt (VLOS) bzw. außerhalb davon (BVLOS),
 - die Größe und das Abfluggewicht der Drohne,
 - sowie mögliche Abhilfemaßnahmen (bspw. Einsatz eines Fallschirms oder zusätzliches Bodenpersonal).
- Das **Luftrisiko** berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit, im Luftraum auf bemannte Luftfahrzeuge zu stoßen. Das ergibt sich aus:
 - Der Dichte des bemannten Flugverkehrs im Luftraum sowie
 - die geplanten Abhilfemaßnahmen.

Mithilfe der Kombination der beiden Faktoren wird eine Risikoabschätzung für den geplanten Flugbetrieb definiert, die mit einer Einordnung in SAIL (Specific Assurance Integrity Level) beschrieben wird. Je höher die Einstufung in SAIL (I – IV) erfolgt, desto höher ist das Risiko des jeweils geplanten Fluges. Diese Kategorie richtet sich also an (semi-) professionelle Nutzende (im weiteren Verlauf Betreibende genannt), die bspw. Agrarflüge, Vermessungsflüge, Inspektionsflüge, sowie Flüge über Menschenansammlungen oder im urbanen Raum durchführen – auch im BVLOS-Betrieb. Wie der Genehmigungsprozess im Detail zu bewerkstelligen ist, wird im Leitfaden des LBA für die Spezielle Kategorie erläutert.⁶

Die zulassungspflichtige Kategorie

In der zulassungspflichtigen Kategorie unterliegen die Drohnen und Betreibenden einem aufwendigem Zulassungsverfahren. Unter diese Kategorie fallen z. B. Personentransporte und schwere Lastendrohnen.

⁶ https://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/B/B5_UAS/Leitfaden_Betriebsgen_LUC.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (letzter Zugriff am 29.04.2024)



Wo darf ich mit einer Drohne fliegen?

GEOGRAPHISCHE ERLAUBNIS NACH LUFTVO §21H

Bei der Prüfung der Flugvorhaben spielt der jeweils angedachte Aufstiegsort eine wichtige Rolle. Denn für die Durchführung von Flugvorhaben muss parallel geprüft werden, ob nationale Vorschriften zu berücksichtigen sind und wie diese eingehalten werden können. Im Folgenden wird eine Übersicht über aktuelle Gegebenheiten und gesetzlichen Regelungen gegeben. Die zentrale Fragestellung lautet: „**Wo darf mit einer Drohne geflogen werden?**“ bzw. wo sollte das besser unterlassen werden, um eine Fluggenehmigung zu erhalten.



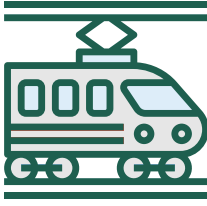
FLUGHÄFEN UND FLUGPLÄTZE

- Für **Flughäfen** (etwa im Bereich von Großstädten) gilt nicht mehr der bisherige Pauschalabstand von 1,5 Kilometern. Seitlich (zur Eingrenzung) gilt ein Abstand von 1 Kilometer. In der Verlängerung der Landebahn (in beiden Richtungen – also im Flug-Korridor) gilt ein Flugverbot für Drohnen von jeweils 5 Kilometern Länge und 2 Kilometern Breite in beide Richtungen jeder Landebahn.
- Für **Flugplätzen** (die keine Flughäfen sind) gilt weiterhin ein allgemeiner Abstand von 1,5 Kilometern ringsherum beginnend ab der Absperung des Flugplatzes. Nach der allgemeinen Auffassung sind offiziell genehmigte und abgenommene Helikopterlandeplätze gleichwertig zu behandeln wie ein Flugplatz.
- **Ausnahmeregelung:** Will man näher an einem Flugplatz oder Flughafen fliegen oder gar unmittelbar darüber, so benötigt man eine Ausnahmegenehmigung:
 - Für Flughäfen muss dies weiterhin die zuständige Landesluftfahrtbehörde erteilen
 - Für Flugplätze und Heliports genügt eine Freigabe der Flugleitung/vom Betreiber des Flugplatzes – also quasi vom Tower. Dies ist eine große Vereinfachung.

WOHNGBIETE

- Drohnen, die in der **Kategorie OPEN A3** betrieben werden, müssen einen Abstand von 150 Metern zu **Wohngebieten**, Gewerbe-, Industrie- oder Erholungsgebieten halten.
- In der Kategorie A1 und A2 gibt es keinen Mindestabstand zu Wohngebieten.
- In der Kategorie A2 gibt es aber einen Mindestabstand zu Menschen (mind. 30 / 50 Meter je nach Drohne/Klasse und ggf. 5 Meter im Langsam-Modus) – siehe [EU Drohnenverordnung](#)
- Für den Überflug von Wohngrundstücken muss dennoch das Einverständnis des Eigentümers vorliegen.
- Die Privatsphäre muss stets gewahrt bleiben, d. h. ohne vorherige Erlaubnis dürfen keine personenbezogenen Daten mit der Drohne erfasst werden – wiegt die Drohne unter 250 Gramm und hat keine Kameras oder andere Sensoren zur Erfassung personenbezogener Daten ist der Einsatz ebenfalls möglich.
- Es darf das Wohngebiet und auch Wohngrundstück in einer Höhe zwischen 100 bis 120 Metern überflogen werden, wenn:
 - ein Überflug zwingend erforderlich ist und nicht über öffentlichen Flächen (z. B. Straßen) durchgeführt werden kann,
 - ein berechtigtes Interesse besteht (z. B. ein Auftrag für eine Reportage),
 - das Einholen der Genehmigungen unzumutbar ist (z. B. zu viele Anwohnende in einem Hochhaus/Reihenhaus-Siedlung),
 - der Flug zwischen 6:00 – 22:00 Uhr stattfindet,
 - keine erhöhte Lärmbelästigung stattfindet,
 - die Privatsphäre gewahrt bleibt
 - und die Anwohner (soweit möglich) informiert wurden.





VERKEHRSWEGE WIE AUTOBAHNEN/BUNDES-AUTOBAHNEN/BUNDESFERN-STRASSEN/BAHNANLAGEN/EISENBAHNSCHIENEN UND WASSERSTRASSEN

- Ein Abstand von mindestens 100 m ist einzuhalten
- Der Mindestabstand von 100 Metern darf auch unterschritten werden, wenn
 - ein Mindestabstand von 10 Metern immer gewahrt bleibt
 - und die 1:1 Regel angewandt wird. Dies bedeutet: Der seitliche Abstand muss mindestens so groß sein, wie die aktuelle Höhe. Bei 50 Metern Höhe darf man sich also bis auf 50 Meter nähern.
 - bei Schifffahrtswegen/Bundeswasserstraßen gilt noch eine weitere Ausnahme: Diese dürfen in einer Höhe zwischen 100–120 Metern zügig überflogen werden, wenn keine Schiffe oder Schleusen/Einrichtungen etc. in der Nähe sind.

NATURSCHUTZGEBIETE

- Es besteht ein generelles Verbot des Überflugs von Naturschutzgebieten
- Ausnahmen:
 - wenn die Drohne ausschließlich in einer Höhe zwischen 100 bis 120 Metern fliegt;
 - wenn aus einem berechtigten Interesse und mit gewerblichem Hintergrund geflogen wird (nicht ausschließlich Hobbyflüge);
 - wenn die Hintergründe/der Schutzgedanke des Naturschutzgebietes gewahrt bleiben und
 - der Überflug für den „Auftrag“ (Betriebszweck) auch tatsächlich erforderlich ist.





SCHWIMMBÄDER, FREIBÄDER UND STRÄNDE

- Über Schwimmbädern, Freibädern und Stränden darf mit einer Drohne **nur** außerhalb der Öffnungszeiten und Betriebszeiten geflogen werden.

SONSTIGE ABSTÄNDE FÜR DROHNEN

- 100 Meter seitlicher Abstand (zur Eingrenzung) mit einer Drohne ist u. a. einzuhalten zu:
 - Unfallstellen und Einsatzorten
 - Industrieanlagen, Justizvollzugsanstalten, Einrichtungen des Maßregelvollzugs, militärischen Anlagen und Organisationen, Anlagen der zentralen Energieerzeugung und Energieverteilung
 - Polizei/Verfassungsorganen, Militär und Manövern
 - Krankenhäusern



FLUGKONTROLLZONEN

- Der Flug in Flugkontrollzonen ist nach wie vor verboten.
- Ausnahmegenehmigung:
 - Das Fliegen einer Drohne in einer Kontrollzone ist möglich, wenn eine Flugverkehrskontrollfreigabe gemäß LuftVO § 21 h eingeholt wurde

ZUSAMMENFASSUNG

Bereits heute werden Drohnen in unterschiedlichen Einsatzbereichen erfolgreich als Hilfsmittel eingesetzt. Ist die Drohne sehr leicht (unter 250 g), kann diese in Verbindung mit wenigen zu erfüllenden Voraussetzungen ohne Fluggenehmigung eingesetzt werden. Je größer und schwerer die einzusetzende Drohne wird, desto umfassender wird der Genehmigungsprozess. Überschreitet das Gewicht der Drohne die Grenze von 500 g, sind die Anforderungen der speziellen Kategorie zu erfüllen.

Bei den in diesem Kapitel genannten Informationen handelt es sich lediglich um eine Zusammenfassung der zum Zeitpunkt der Leitfadenerstellung geltenden Bestimmungen. Für mehr Details und mögliche Änderungen/Anpassungen der geltenden Vorschriften beachten Sie bitte die Informationen des Luftfahrt Bundesamt (LBA, https://www.lba.de/DE/Drohnen/Drohnen_node.html) und der Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA, <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/drones>) ! Websites wie www.drohnen.de fassen die aktuellen Richtlinien sehr gut verständlich zusammen und dienen der Erstinformation. Allerdings besteht keine Garantie für Korrektheit und Aktualität.

Ein Nachschlagewerk zum Thema Drohnenführerschein finden Sie unter den Titel „Drohnenführerschein kompakt: Das Lehrbuch zum Drohnenflug“*

* <https://vsmedien-shop.de/buecher/nachschlagewerk/10883/drohnenfuehrerschein-kompakt-das-lehrbuch-zum-drohnenflug>

VON DER FLUGGENEHMIGUNG BIS ZUM FLUG MIT DEM ENTWICKELTEN MESSSYSTEM IN DER SPEZIELLEN KATEGORIE

DIE FLUGGENEHMIGUNG IN DER SPEZIELLEN KATEGORIE

Für die geplanten Flugvorhaben im Forschungsprojekt UnLuBW wurde der Genehmigungsprozess, nach der Zusammenstellung des Messsystem sowie der Identifizierung möglicher Maßnahmen gestartet. Aufgrund der Größe und des Gewichtes der Drohne, der ausgewählten Örtlichkeiten (innerstädtischer Raum) und der geplanten Aufstiegshöhen, fielen die Flugvorhaben in die spezielle Kategorie (Das System mit NO₂ Sensor und ohne Fallschirm hatte eine MTOW von knapp 8,7 kg – das System ohne NO₂ Sensor aber mit Fallschirm hatte eine MTOW von etwa 7,4 kg). Für den Erhalt der Fluggenehmigung war die Erarbeitung eines Betriebskonzeptes mithilfe einer Risikoanalyse (SORA) und die Erstellung eines Betreiberhandbuches (ConOps) notwendig. Der große Vorteil war, dass unabhängig von der zu genehmigenden Anzahl an Standorten, das Regierungspräsidium für die Prüfung und Erteilung der Genehmigung Zuständig war.

Abbildung 4 zeigt das angewandte Prüfschema bei der Beantragung der Fluggenehmigung in der speziellen Kategorie im Forschungsprojekt UnLuBW.

Zunächst musste für jeden geplanten Standort beschrieben werden, wo sich dieser befindet und wie hoch dort jeweils geflogen werden soll. Außerdem wurde erläutert, ob innerhalb (VLOS) oder außerhalb der Sichtweite (BVLOS) geflogen werden soll. Für die Begleitung der Maßnahmen wurde nach geeigneten Standorten in deren direktem Umfeld gesucht. Ziel war es, so nah wie möglich an der jeweiligen Emissionsquelle zu messen. Nachdem alle geplanten Standorte beschrieben waren, musste die Bewertung des Risikos erfolgen. Aufgrund der

sehr unterschiedlichen Standorte war eine umfassendere Risikoanalyse in Form einer SORA erforderlich. Innerhalb des SORA wurden für jeden Standort die potenziellen Gefahren skizziert und mögliche Auswirkungen auf Dritte bewertet. Eine Einordnung des Risikos wurde mithilfe der SAIL-Levels durchgeführt. Es berücksichtigt Faktoren wie die Art der Operation, die Umgebung, in der geflogen wird und die möglichen Auswirkungen von Störungen oder Fehlern auf die Sicherheit von Personen und Infrastrukturen. Je höher das SAIL-Level, desto umfassender sind die Anforderungen an Technologie und Prozesse, um eine sichere Durchführung des geplanten Flugvorhabens (der Drohnenmission) am jeweiligen Standort sicherzustellen. Ausschlaggebend für die Bewertung des SAIL-Levels sind das Bodenrisiko und das Luftrisiko. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, beschreibt das Bodenrisiko das Risiko für unbeteiligte Personen in einem gewissen Radius um den Startpunkt der Drohne (bei vertikalem Aufstieg). Dieser Radius hängt von der sogenannten 1:1-Regel ab, die besagt, dass der Abstand zum Aufstiegsplatz mindestens der Flughöhe über Grund entsprechen muss. Das Bodenrisiko kann mit geeigneten Sicherheitsmaßnahmen minimiert werden. Beispiele für solche Sicherheitsmaßnahmen sind die Verwendung von Technologien zur Kollisionserkennung und -vermeidung, die Einhaltung von Mindestabständen zu Menschen und Gebäuden, sowie die Festlegung von Flugbeschränkungen und Notfallverfahren.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen genehmigten Aufstiegsort in der Stadt Lörrach zwischen einer befahrenen Straße und einer Gleisanlage auf einem

7 https://www.iba.de/SharedDocs/Downloads/DE/B/B5_UAS/Leitfaden_Betriebsgen_LUC.pdf (letzter Zugriff am 19.04.2024)

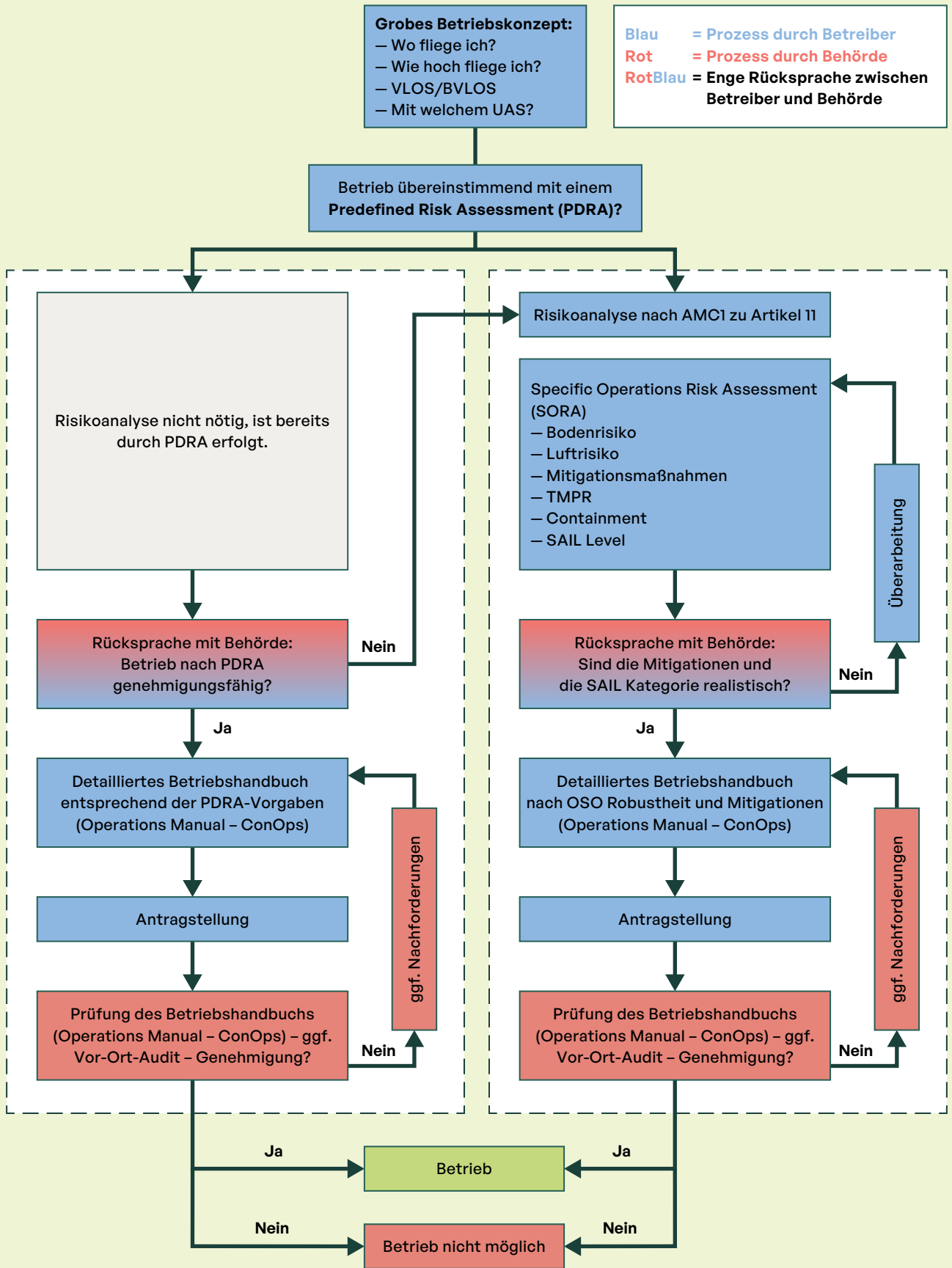


Abbildung 4: Prüfschema Beantragung Fluggenehmigung in spezieller Kategorie (eigene Darstellung ISME nach Leitfaden zur Antragstellung Betriebsgenehmigung in der speziellen Kategorie Luftfahrtbundesamt (LBA))⁷

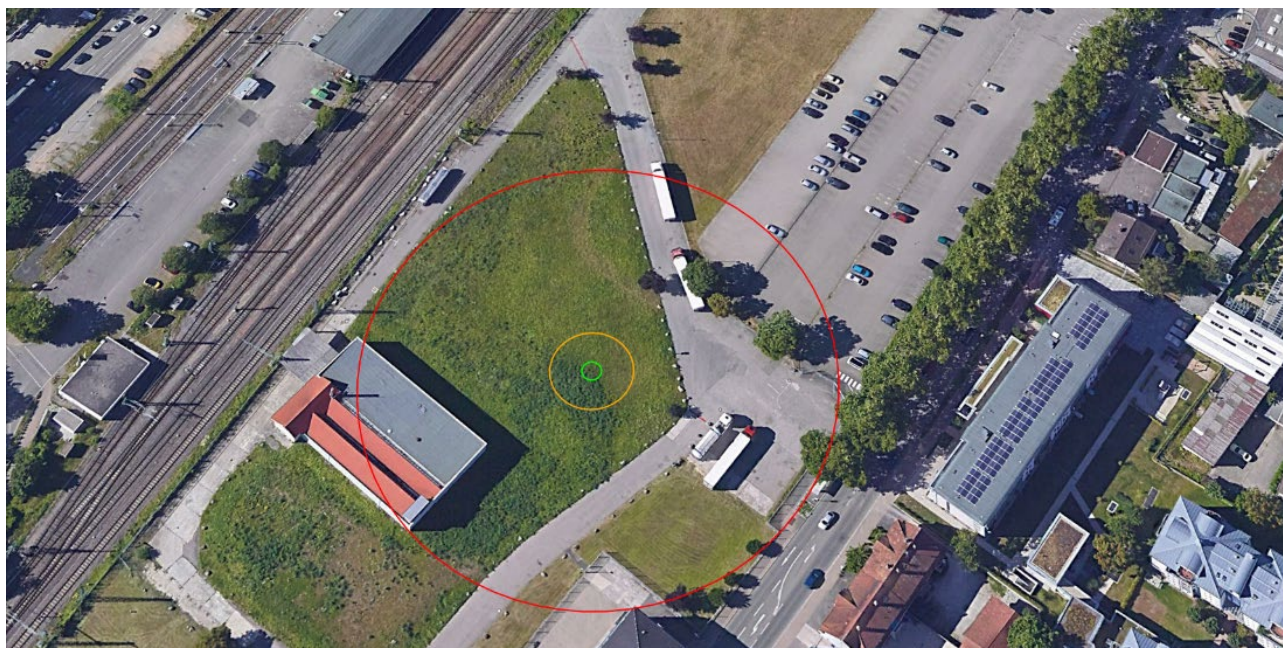


Abbildung 5: Darstellung geplanter Flugstandort inkl. Markierung der notwendigen Radien auf einem Firmengelände in Lörrach für den Erhalt der Fluggenehmigung (Eigene Darstellung ISME, Kartengrundlage Google Earth)

privaten Firmengrundstück. Der kleine grüne Kreis zeigt den geplanten Aufstiegsstandort, der rote Kreis den Durchmesser, welcher sich aus der Flughöhe ergibt. Um diesen Flug durchzuführen, musste die Höhe auf 50 m über Grund begrenzt werden, da der rote Kreis ansonsten aufgrund der 1:1 Regel über der Straße oder den Bahnschienen gelegen hätte. Der private Parkplatz und die Grünfläche stellen kein Sicherheitsrisiko dar. Des Weiteren befindet sich der Aufstieg im Anflug auf das Helipad des Klinikum Lörrach, weswegen § 21 LuftVo beachtet werden musste. Die Fluggenehmigung wurde unter der Bedingung ausgegeben, dass mit den entsprechenden Stellen, in dem Fall mit dem Klinikum Lörrach, Kontakt vor Beginn des Flugvorhabens aufgenommen werden musste. Abschließend wurden geeignete Sicherheitsmaßnahmen benannt, um das SORA abschließen zu können.

Ergänzend zum SORA wurde ein Operator Manual, auch bekannt als Concept of Operations (ConOps) erstellt. Es ist ein detailliertes Dokument, das die operationellen Aspekte einer Drohnenmission beschreibt und die Verfahren und Prozesse festlegt, die während des Flugbetriebs eingehalten werden müssen.

In dem ConOps wurden verschiedenen z. T. bereits erläuterten Elemente zusammengefasst, darunter:

1. Ziele und Zweck der Mission, des Flugvorhabens: Hier wird beschrieben, warum die Drohnenmission durchgeführt wird, welche Ziele sie verfolgt und welchen Nutzen sie bringt. Im Fall des Forschungsprojektes, war es die Messung von Luftschadstoffen.
2. Missionsparameter: Dies umfasst Angaben zur geografischen Lage, zum Zeitpunkt des Fluges, zur Flughöhe, zur Flugdauer und zur geplanten Flugroute.
3. Betriebsverfahren: Das ConOps legt detaillierte Verfahren fest, wie die Drohne gestartet und gelandet wird, wie die Kommunikation mit den Flugbehörden erfolgt und wie mit Notfällen umgegangen wird.
4. Technische Anforderungen: Das Dokument beschreibt die technischen Spezifikationen der verwendeten Drohne (DJI Matrice 300), einschließlich der Sensoren, Kommunikationsmittel und Sicherheitssysteme.
5. Sicherheitsmaßnahmen: Das ConOps enthält eine Übersicht über die Sicherheitsmaßnahmen, die während der Mission ergriffen werden, um Risiken zu minimieren.
6. Angaben zum/zur Piloten:in und deren Zertifikate („Drohnenführerschein“).

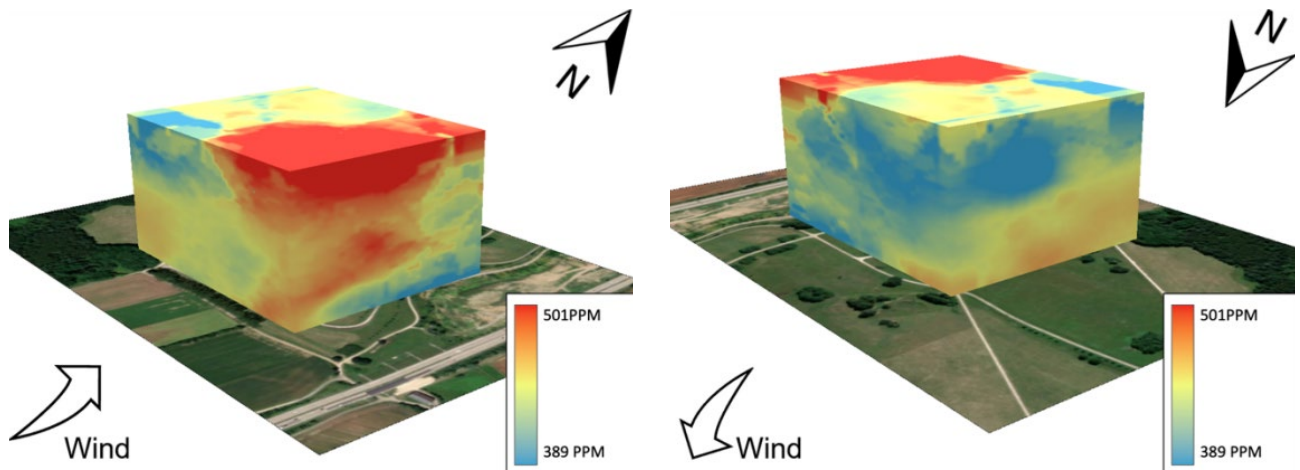


Abbildung 6: Voxelvisualisierung interpolierter CO₂-Messungen stromabwärts der A7 bei Erlangen (Jagst) bis 100 m über Grund, zweifach überhöht (Darstellung von André Wolf)

7. Angaben zum Betreiber. Im Projekt waren die Betreiber die beiden Arbeitsgruppen der Universität Tübingen.

Das ConOps dient als Referenzdokument für das Flugpersonal und ermöglicht eine klare Kommunikation und Koordination während des jeweiligen Fluges. Es sollte regelmäßig überprüft und aktualisiert werden, um Änderungen in den Betriebsanforderungen und den Technologien gerecht zu werden und sicherzustellen, dass das jeweilige Flugvorhaben weiterhin sicher und effizient durchgeführt wird.

Nachdem sowohl das SORA als auch das ConOps erstellt waren, konnte der Antrag zum Erhalt der Fluggenehmigung beim zuständigen Amt eingereicht werden. In Deutschland sind dies im Normalfall die

Landesluftfahrtbehörden der einzelnen Bundesländer. Diese prüfen den Antrag, genehmigen diesen oder bitten um Nachbesserungen für eine erneute Beantragung. Nach einer ersten Risikobewertung der jeweiligen geplanten Standorte kann bereits vor Antragstellung mit dem jeweiligen Regierungspräsidium in den Austausch getreten werden. Wurde eine Fluggenehmigung ausgestellt, ist zu beachten, dass mit der Drohne ausschließlich an den Standorten geflogen werden kann, für welche ein SORA und ConOps vorliegt und genehmigt wurde. Abweichungen von den geplanten Flugstandorten oder der Austausch der Drohne durch ein anderes Modell mit anderen Maßen und Sicherheitsfeatures muss erneut beantragt und genehmigt werden. Die Fluggenehmigungen sind somit sehr individuell und nicht allgemein gültig.

DIE MESSSTRATEGIE

Mit Erhalt der Fluggenehmigung ist die jeweilige Messstrategie, also die Art der Durchführung des jeweiligen Flugvorhabens, zu planen. Wie bereits erwähnt, bieten Multikoptersysteme mit ihrem hohen Maß an Mobilität einen großen Vorteil gegenüber stationären Messstationen. Damit können an unterschiedlichen Standorten zu unterschiedlichen Zeiten Messdaten erhoben werden. Ziel war es, das neu entwickelte System auf Funktionalität zu testen und eine möglichst umfassende Anzahl an unterschiedlichen Daten zu sammeln. Grundsätzlich

sind unterschiedliche Messstrategien in Form von Aufstiegsszenarien und Flugprofilen denkbar. Diese reichen von Vertikalprofilen in unterschiedlichen Höhen bis hin zu Flugmanövern, in welchen die Messpunkte im Messvolumen räumlich gestreut verteilt gesetzt werden können. Damit erhält man ein Netz an dreidimensionalen Informationen. Bei solchen weiträumigen, flächendeckenden Messungen können Aussagen über die Verteilung der jeweiligen Schadstoffe getätigt werden, z. B. durch eine Gradientenberechnung. Wichtig zu berücksichtigen

ist hierbei die Frage, woher die Emissionen herkommen und wohin sie geweht werden.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Verteilung von CO₂ im Abwind der Autobahn 7 bei Ellwangen (Jagst). Die Auswertung der großflächigen Messdaten verdeutlicht die Ausbreitung der Verkehrsemissionen in bestimmten Höhen und Abständen zur Autobahn.

Die Fluggenehmigung für die Aufstiegsstandorte Im Forschungsprojekt UnLuBW wurden ausschließlich für das vertikale Aufsteigen erteilt. Hierbei ließ der/die Pilot:in am jeweils ausgewählten Standort die Drohne bis in die genehmigte Höhe aufsteigen. Aufgrund der gewählten Örtlichkeiten (nahe an Emissionsquellen) sowie der Größe und des Gewichtes des Messsystems war die Durchführung von Flugmanövern, in welchen die Messpunkte im Messvolumen räumlich gestreut verteilt gesetzt werden, nicht möglich. Allgemein sollte bei jedem Flugvorhaben darauf geachtet werden, dass die Vertikalprofile von unten nach oben befliegen werden. Andernfalls wird die Luftsäule durch den „Downwash“ d. h. der Windbewegung der Rotoren verfälscht.

Je nach Flughöhe können unterschiedliche Daten erfasst werden. Ein zentrales Ziel der Drohnenmissionen war es, möglichst hoch mit der Drohne aufzusteigen. Eine geringe Flughöhe limitiert die Aussagekraft der Messdaten etwas, da die Vergleichsluftmassen weiter oben nicht erreicht werden. Auf der anderen Seite bieten niedrigere Höhen den Vorteil, dass die eigentlichen Messhöhen und somit die erhobenen Daten dichter beieinander liegen. Bei einem 100 m hohen Flug sind bspw. Stopps auf den Höhen 5, 15, 25, 45, 55, 75 und 100 m mit jeweils 2 Minuten auf jeder Höhe möglich, während bei einem Flug bis in 50 m Höhe Stopps auf 5, 10, 15, 20, 25, 35 und 50 m gemacht werden können. Die Messdichte in der Vertikalen ist so deutlich erhöht. Pro Messpunkt sollte im Raum eine angemessene Mittelungszeit eingehalten werden. Für die Datenauswertung hat sich ein Mess- bzw. Mittelungsintervall von ca. 1–3 min als ausreichend herausgestellt. Hinsichtlich der Gesamtdauer einer Flugmessung, gab es unterschiedliche Ansätze. Im Rahmen der Ausarbeitung der Messstrategie wurden im Forschungsprojekt UnLuBW zwei Varianten erprobt.

Zum einen wurden Messungen über einen Tag verteilt an einem Standort durchgeführt. Zum anderen wurden Messungen an mehreren Standorten durchgeführt, an welche nach einem halben Tag der jeweilige Standort gewechselt wurde. Hierbei zeigte sich, dass ein Standortwechsel, um an möglichst vielen verschiedenen Standorten je Kommune Messungen durchzuführen, für die Aussagekraft der Messergebnisse kontraproduktiv sein kann. Die Umgebungsbedingungen wie bspw. Temperatur, Luftschichtung verändern sich im Tagesverlauf unter Umständen drastisch, was sich stark auf die Vergleichbarkeit der jeweils erhobenen Daten auswirkt. Nimmt man die Daten hingegen kontinuierlich über einen Tag hinweg an einem Standort (zwei Standorte bei zwei Drohnen) auf, ist in diesen Daten auch der Tagesverlauf enthalten. Mit dem Tagesverlauf findet auch ein natürlicher Verlauf von meteorologischen Werten wie Lufttemperatur, Luftfeuchte und Wind statt. Zum Beispiel nimmt in der Nacht die Temperatur typischerweise ab, während sie am Tag mit Sonnenaufgang ansteigt. Auch der Wind nimmt in der Nacht typischerweise ab. Dies gilt für stationäre Wetterlagen, bei einziehenden Tiefdruckgebieten kann sich dieser Tagesverlauf entsprechend verändern (ein Regengebiet bspw. erhöht Feuchtigkeit und senkt Temperatur). Im Mittel über das Jahr betrachtet kann aber dennoch ein typischer meteorologischer Tagesverlauf beobachtet werden.

Aufgrund der z. T. doch sehr großen einzuhaltenen Abstände von der jeweiligen Emissionsquelle wurden neben den Drohnenmessungen in der Vertikalen, weitere ergänzende Messungen am Boden durchgeführt. Hierfür wurden mittels Verkehrszählungen (manuell und später mit Verkehrskamera), einer kleinen Messstation zur Messung von Partikeln (PM₁, PM_{2,5} und PM₁₀) und einem Schallpegelmessgerät nahe der Straßeninfrastruktur ergänzende Messungen durchgeführt. Ziel war es, Veränderungen im Straßenverkehr und erfasste Veränderungen in den gemessenen Emissionen in Verbindung zu bringen. Die so gesammelten Daten können schlussendlich bei der Interpretation der Ergebnisse aus den Drohnenmessungen helfen.



Steuerung der UAS im Rosensteinpark Stuttgart

DIE GENEHMIGUNG ZUM BETRETEN DES JEWELIGEN FLUGSTANDORTES

Nach dem Erhalt der Fluggenehmigung folgte der Prozess zur Abfrage der Genehmigungen zum Betreten der jeweiligen Flugstandorte. Hierfür mussten, sofern nicht bereits bekannt, die Grundstückseigentümer:innen der zu befliegenden Standorte in Erfahrung gebracht werden. Grundsätzlich ist es möglich, dass die zu überfliegende Fläche entweder in öffentlicher Hand oder in Privatbesitz liegen. Um das herauszufinden, stellten wir eine Anfrage zu den zu überfliegenden Standorten beim jeweils

zuständigen Ordnungsamt bzw. dem Liegenschaftsamt. Diese können Auskunft darüber geben, ob sich die Fläche in öffentlichem Besitz befindet. Die Schwierigkeit liegt darin, dass Kommunen aufgrund der Regelungen hinsichtlich der DSGVO keine Personendaten an Dritte weitergeben dürfen. Somit ist bei der Identifizierung der privaten Eigentümer:innen Kreativität gefragt, denn ohne eine entsprechende Genehmigung zur Betretung und Nutzung des jeweiligen Standorts ist das Flugvorhaben nicht möglich.

WEITERE ZU INFORMIERENDE STELLEN

Befindet sich der jeweils geplante Flugstandort in einem Umkreis von 1,5 km um Helipads oder Flugplätze muss der Drohnenflug mit diesen Parteien zusätzlich geprüft und abgestimmt werden.

Bei Erhalt der Fluggenehmigung wird die verpflichtende Kontaktaufnahme mit den jeweils betreffenden Flugplatzbetreibern, Kliniken, etc. vermerkt. Für die Kontaktaufnahme mit den genannten Institutionen gibt es bisher noch keine einheitliche Handhabung. Manche Kliniken bieten bereits Antragsformulare an, um das betreffende Flugvorhaben anzumelden ohne großen Aufwand anzumelden. Liegt der geplante Flugstandort außerhalb des 1,5 km Umkreises, sollten das Vorhaben dennoch frühzeitig (mindestens zwei Wochen im Vorfeld) kommuniziert

werden. Außerdem ist die örtliche Polizei ebenfalls frühzeitig in Kenntnis zu setzen, sofern dies nicht bereits vom jeweiligen Ordnungsamt übernommen wurde.

Die in diesem Leitfaden formulierten Handlungsschritte und Empfehlungen resultieren aus den Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt UnLuBW und dienen als Erfahrungsaustausch. Deshalb kann bei Verwendung der hier zusammengetragenen Informationen kein Rechtsanspruch geltend gemacht werden. Bei Unklarheiten sollte in jedem Fall direkt die EASA, die zuständige Luftfahrtaufsichtsbehörde oder ein Fachanwalt konsultiert werden.

HILFREICHE TIPPS IN DER KOMMUNIKATION MIT RELEVANTEN INSTITUTIONEN

Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt und der damit einhergegangenen Beantragung unterschiedlicher Genehmigungen (s. Fluggenehmigung und Betrittsgenehmigung der jeweiligen Flugstandorte) zeigt eindrücklich, wie wichtig die frühzeitige Kommunikation mit den unterschiedlichen Institutionen ist.

Das Forschungsprojekt außerhalb des Projektes wurde mit unterschiedlichen Institutionen über Ihre Herausforderungen und Tipps im Umgang mit Drohnenflugvorhaben gesprochen. Herausgekommen sind dabei vier kurzweilige Erfahrungsberichte, welche einen Perspektivwechsel ermöglicht.

Austausch mit Regierungspräsidium Stuttgart:

Im Gespräch mit dem Regierungspräsidium Stuttgart, welches ebenfalls die Fluggenehmigung für das Vorhaben im Projekt UnLuBW genehmigt hat, wurde deutlich, dass die Nutzung von Drohnen für unterschiedlichste Einsatzzwecke kontinuierlich zunimmt. Grundsätzlich steht das Regierungspräsidium bei der Beantragung von Fluggenehmigung mit Informationen zur Seite und ist bestrebt, das geplante Flugvorhaben unter Berücksichtigung

des geltenden Rechts auch zu genehmigen. Dennoch zeigt sich bei der Bearbeitung von Anfragen eine große Bandbreite an Fragen mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad. Ziel des Regierungspräsidiums Stuttgart ist es, die alltäglichen Anfragen zu überblicken und möglichst Hilfestellung bei der Beantragung der Fluggenehmigungen zu geben.

Eine Bearbeitung von Anfragen ist deshalb immer einfacher, wenn die anfragenden Personen bereits die Grundlagen des Drohneinsatzes verstanden haben. Manchmal fehlt es noch an fixen Prozessen, wer mit wem wann kommunizieren muss. Hierbei sind vor allem die unterschiedlichen Akteure gefragt,

Prozesse zu etablieren. Je nach geplanten Flugvorhaben sind oft viele verschiedene Akteur:innen zu beteiligen. Eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit den zu beteiligenden Personen wird empfohlen. Das oberste Ziel ist es immer, die Antragstellenden so gut wie möglich zu unterstützen. Sollten die Kenntnisse der Antragstellenden für das geplante Flugvorhaben nicht ausreichen oder eine rechtliche Absicherung notwendig erscheinen, rät das Regierungspräsidium dazu, sich mit Unternehmen zusammenzuschalten, die sich mit der Antragstellung auskennen.

„Mittlerweile gibt es online bereits viele Informationen, was im Umgang und Einsatz von Drohnen verschiedener Größen zu berücksichtigen ist. Diese vermitteln einen guten ersten Überblick und helfen enorm für eine erste Einschätzung.“

*Christoph Geserer,
Regierungspräsidium Stuttgart*

Austausch mit dem Amt für öffentliche Ordnung Landeshauptstadt Stuttgart:

Für den Erhalt der Bodenbetrittsgenehmigung spielen Ordnungsämter eine zentrale Vermittlerrolle. Aufgrund der noch nicht etablierten Prozesse wird der Kommunikationsfaden von den Betreibenden häufig spät, manchmal sogar gar nicht, aufgenommen. Dabei könnte das mit etwas Aufklärung der verantwortlichen Pilot:innen bzw. Betreibenden verhindern lassen. Bisherige Erfahrungswerte des Amtes für öffentliche Ordnung Stuttgart zeigen, dass das Flugvorhaben häufig sehr spät kommuniziert werden. Das wiederum erschwert eine geregelte Absprache mit weiteren Ämtern und der Polizei deutlich.

Gerade bei kleineren Kommunen kann es jedoch sein, dass es keine klaren Zuständigkeiten gibt und dadurch Anfragen hinsichtlich des Einsatzes von Drohnen nicht geprüft werden können. Die Kontaktaufnahme mit den örtlichen Ämtern für öffentliche Ordnung ist dabei dennoch empfehlenswert. Ein guter Lageplan sollte zur Erleichterung der Sichtung der Unterlagen beigelegt werden. Unterstützen können hierbei auch Apps wie bspw. von droniq. Hängt das Flugvorhaben maßgeblich vom Wetter ab, sollten mehrere Tage bspw. eine Woche angefragt also quasi „reserviert“ werden, um sicher zu gehen, dass an einem der ausgewählten Tage das Flugvorhaben auch stattfinden kann. Die Unterlagen bspw. der zu überfliegenden Flächen werden gemäß des § 21 LuftVO geprüft und die Grundstückseigentümer:innen ermittelt. Sofern diese einer öffentlichen Institution entsprechen, werden die Informationen an die anfragenden Personen weitergeben. Die Kontaktdaten von Privatpersonen dürfen allerdings aus Datenschutzgründen nicht an Dritte kommuniziert werden. Abschließend wird gemeinsam mit der Polizeibehörde das Flugvorhaben abgesprochen. Hat diese keine Einwände und fällt die Prüfung des Vorhabens positiv aus, wird eine Erlaubnis per Mail erteilt und eventuelle Auflagen kommuniziert (bspw. einzuhaltende Abstandsregelungen). Wichtig zu beachten ist, dass positive Rückmeldung des Amtes für öffentliche Ordnung nicht gleichzusetzen sind mit der Genehmigung des Grundstückseigentümers. Diese müssen separat bei den Flächeneigentümer:innen angefragt werden.

„Wenn es um den Einsatz von Drohnen im Stadtgebiet geht, empfehlen wir eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit der Ortspolizeibehörde. Am besten gleich mit uns Kontakt aufnehmen, sobald die Fluggenehmigung ausgestellt wurde. Somit bleibt ausreichend Zeit für unseren Prüfprozess inkl. Kontaktaufnahme mit Polizei und weiteren Fachämtern.“

*Franziska Piesiur,
Amt für öffentliche Ordnung,
Landeshauptstadt Stuttgart*

Austausch Amt für Umweltschutz, Landeshauptstadt Stuttgart:

Eine Behörde, welche bei Flugvorhaben im Bereich naturschutzrelevanter Flächen ebenfalls eingebunden werden sollte, ist die Naturschutzbehörde. Diese Institutionen beschäftigt sich mit jeglichen naturschutzrechtlichen Belangen wie im Bereich des Artenschutzes oder auch Gebietsschutzes (bspw. Landschaftsschutzgebiet). Bei Drohnenflugvorhaben wird dort in einem eigenen Verfahren eine mögliche Beeinträchtigung dieser Belange geprüft.

Grundsätzlich hängt die Prüfung von verschiedenen Kriterien ab. Je nach naturschutzrechtlichem Schutzgebiet können unterschiedliche Vorgaben/Schutzzwecke gelten. Beispielsweise sind Drohnenflüge in Landschafts-

schutzgebieten aufgrund des etwas weniger strengen Schutzcharakters häufiger bzw. leichter umsetzbar als in Naturschutzgebieten (NSG). Denn in Naturschutzgebieten ist neben den Hürden der grundsätzlich sehr streng geltenden Schutzgebietsregelungen auch ein aufwendigeres Verwaltungsverfahren erforderlich, was in aller Regel mit deutlich längeren Bearbeitungszeiten verbunden ist. Ursächlich hierfür ist, dass neben der unteren Naturschutzbehörde auch das Regierungspräsidium beteiligt werden muss.

Generell kann aber pauschal gesagt werden, dass ein Drohnenvorhaben außerhalb jeglicher naturschutzrechtlicher Schutzgebiete die größten Chancen auf eine Zustimmung der Naturschutzbehörde hat, da hier keine Belange bzw. Schutzzwecke dieser Gebiete entgegenstehen können und allein der Artenschutz geprüft werden muss. Herausfordern

ist aber die kurzfristige Absprache der Behörde zu geplanten Vorhaben. Eine fristgerechte Prüfung ist so oft sehr schwierig und in einzelnen Fällen nicht möglich. Es wird daher immer empfohlen, geplante Drohnenflüge bereits einige Wochen im Voraus mit der Naturschutzbehörde und evtl. weiteren betroffenen Behörden abzustimmen.

„Wir als untere Naturschutzbehörde kommen bei der Prüfung von Drohnenflugvorhaben dann zum Einsatz, wenn sich die Frage stellt, ob am jeweiligen geplanten Standort geschützte Arten beeinträchtigt werden könnten oder Regelungen der naturschutzrechtlichen Schutzgebiete oder auch der Luftverkehrs-Ordnung eine Prüfung bzw. Zustimmung erfordern.“

*Hannes Schwarz,
Amt für Umweltschutz*

„Anhand der vergangenen Jahre gehe ich stark davon aus, dass die Anzahl von Flugvorhaben in Zukunft eher noch zunehmen wird. Deshalb kann ich anderen Kliniken und Krankenhäusern nur raten sich mit Einsatz von Drohnen zu beschäftigen. Mindestens ein Merkblatt für Anfragende sollte es geben.“

*Stefan Wirth, Stv. Leiter der Stabsstelle
Sicherheitsmanagement*

geht so deutlich schneller. Die Schwierigkeit lag darin, Kapazitäten für die Bearbeitung des Themas und Verantwortliche zu benennen, welche sich mit dem Thema Drohnen auseinandersetzen können. Fehlen diese Kapazitäten, wissen Verantwortliche oft nicht, unter welchen Bedingungen Drohnenflüge erlaubt sind und wie damit umgegangen werden soll.

In erster Linie geht es darum, die Sicherheit der Krankentransporte per Luft zu jeder Zeit sicher zu stellen. Auch können sich mit einer geregelten Organisation der Drohnenflüge Krankenhäuser oder Kliniken absichern, da im Schadensfall die Schuldfrage im Vorfeld bereits eindeutig geklärt wurde. Zwar gibt es auch Unterstützung des Regierungspräsidiums, dennoch sollten sich Verantwortliche selbst mit dem Thema auseinandersetzen, um zu verstehen, was für sie selbst gilt. Im Forschungsprojekt UnLuBW erleichterte das Formular des Klinikums Böblingen deutlich die Durchführung des Flugvorhabens zur Messung von Luftschadstoffen. Das Informationsschreiben zum Einsatz von Drohnen finden Sie auf der Webseite des Klinikverbund Südwest.⁵

Austausch mit dem Sicherheitsmanagement des Klinikverbund Südwest:

Das Thema Drohneneinsatz und der richtige Umgang damit stellt vor allem Betreibende von Helipads vor Herausforderungen. Die Schwierigkeit besteht vor allem darin, überhaupt erst einmal zu wissen, was zu beachten ist, welche rechtlichen Regelungen gelten und wie sich Verantwortliche damit auseinandersetzen. Der Klinikverbund Südwest hat sich aufgrund vermehrter Anfragen zum Einsatz von Drohnen, welche im direkten Umfeld der beteiligten Kliniken geplant waren, mit der Frage beschäftigt, wie die Abwicklung von Anfragen strukturiert und zielführend umgesetzt werden kann. Hierfür wurde ein Prüfprozess entwickelt. Für diesen Prozess wurde ein Formular erarbeitet, welches alle Fragen aufführt die im Vorfeld geklärt werden sollten und die Kommunikation zwischen Klinikverbund und Anfragenden stark vereinfacht. Auch das Prüfen der Anfragen

Zusammenfassend kann aus den Gesprächen mit den unterschiedlichen Institutionen geschlussfolgert werden, dass

- eine frühzeitige Kontaktaufnahme (also nach Erhalt der Fluggenehmigung) mit Ordnungsämtern, Krankenhäusern und Kliniken sowie weiteren Behörden wie bspw. Naturschutzbehörden sinnvoll ist und den Genehmigungsprozess für alle Seiten vereinfacht
- es noch keine etablierten Prozesse zur Kontaktaufnahme gibt
- dass die Bearbeitung des Themas Drohneneinsatz Ressourcen und Kapazitäten bei den Institutionen erfordert, welche es zum Teil (noch) nicht gibt.

⁵ <https://www.klinikverbund-suedwest.de/der-klinikverbund-suedwest/ansprechpartner/sicherheitsmanagement/> (letzter Zugriff am 19.03.2024)

AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE

Mithilfe der durchgeführten Flugmessungen in den beteiligten Partnerkommunen Stuttgart, Böblingen, Kehl und Lörrach wurden verschiedene meteorologische (Standard-) Parameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck gemessen. Zusätzlich dazu wurden Luftschadstoffe wie CO₂, O₃ und NO₂ erfasst.

LUFTEMPERATUR/POTENTIELLE TEMPERATUR

Die potentielle Temperatur ist eine thermodynamische Eigenschaft eines Luftmassenpunktes, die unabhängig von Änderungen des Luftdrucks ist. Sie wird oft verwendet, um Luftmassen zu charakterisieren und Vergleiche zwischen verschiedenen Höhen und Orten zu ermöglichen. Die potentielle Temperatur wird in Kelvin gemessen. Durch diese Eigenschaften kann sie als Maß für die thermische Schichtung der unteren Atmosphäre und daraus resultierend auch für den Turbulenzgrad verwendet werden.

RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT

Die relative Luftfeuchtigkeit (RH) ist ein Maß dafür, wie viel Wasserdampf die Luft im Vergleich zu der maximal möglichen Menge bei einer bestimmten Temperatur enthält. Sie wird in Prozent ausgedrückt und gibt an, wie gesättigt die Luft mit Wasserdampf ist.

WINDRICHTUNG & WINDGESCHWINDIGKEIT

Die Windrichtung gibt an, aus welcher Richtung der Wind weht. Die Angaben erfolgen oft in Grad (zum Beispiel im Uhrzeigersinn gemessen von Norden) oder in Himmelsrichtungen (wie Nord, Süd, Ost, West). Die Windrichtung wird normalerweise als der Punkt angegeben, aus dem der Wind kommt. Beispielsweise bedeutet eine Windrichtung von Norden, dass der Wind aus nördlicher Richtung kommt. Die Windgeschwindigkeit gibt an, wie schnell sich die Luft in Bezug auf einen bestimmten Punkt bewegt. Sie wird in der Regel in Metern pro Sekunde (m/s).

PM₁, PM_{2,5} UND PM₁₀

PM₁ steht für Particulate Matter 1, was auf Deutsch als Feinstaub mit einem Durchmesser von 1 Mikrometer oder kleiner übersetzt werden kann. Feinstaub, auch als PM (Particulate Matter) bezeichnet, besteht aus kleinen Partikeln oder Tropfen in der Luft, die in unterschiedlichen Größenklassen eingeteilt werden, basierend auf ihrem Durchmesser.

Die verschiedenen Größenklassen von Feinstaub sind üblicherweise wie folgt unterteilt:

- PM₁ (Feinstaub mit einem Durchmesser von 1 Mikrometer und kleiner)
- PM_{2,5} (Feinstaub mit einem Durchmesser von 2,5 Mikrometern und kleiner)
- PM₁₀ (Feinstaub mit einem Durchmesser von 10 Mikrometern und kleiner)

PM₁ ist besonders feiner Staub, der aufgrund seiner geringen Größe tiefer in die Atemwege eindringen kann.

CO₂

CO₂, oder Kohlenstoffdioxid, ist ein Gas, das natürlicherweise in der Luft vorkommt. Es spielt eine wichtige Rolle im Kreislauf des Lebens, insbesondere in der Photosynthese von Pflanzen. Allerdings hat die menschliche Aktivität, wie das Verbrennen von fossilen Brennstoffen, zu einem Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre beigetragen, was wiederum den Treibhauseffekt verstärkt und signifikant zur globalen Klimaerwärmung beiträgt.

NO₂

NO₂ steht für Stickstoffdioxid und ist ein Gas, das durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entsteht, wie sie in Fahrzeugen, Kraftwerken und Industrieanlagen vorkommt. Gemäß dem Umweltbundesamt ist NO ein körpereigen gebildeter Botenstoff. Dieser von außen zugeführte NO-Mengen können in die Regelungsmechanismen des Körpers eingreifen und diesen stören. Stickstoffdioxid (NO₂) hingegen ist ein ätzendes Reizgas. Es schädigt das

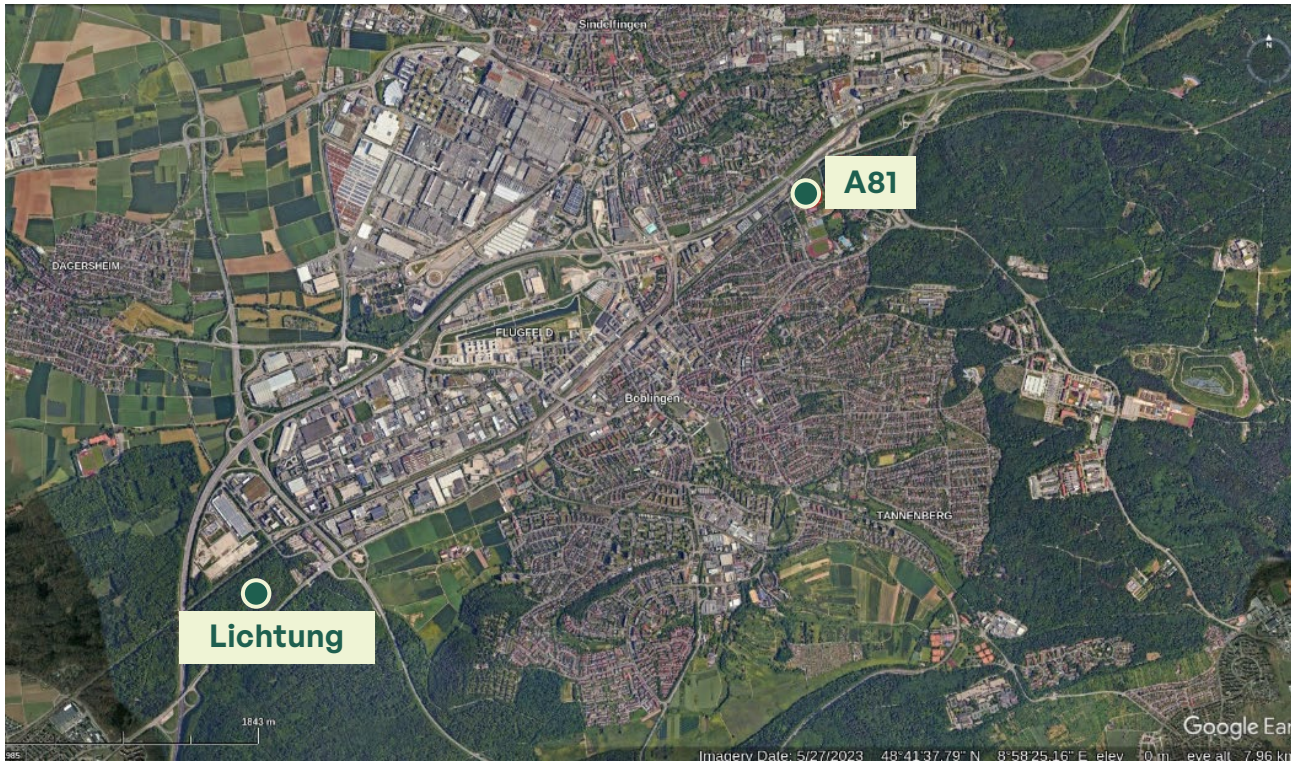


Abbildung 7: Übersicht der beiden Messstandorte in Böblingen aus dem Projekt UnLuBW (eigene Darstellung, Kartendarstellungen ©2024 GeoBasis-DE/BKG (©2009)Google)

Schleimhautgewebe im gesamten Atemtrakt und reizt die Augen. Stickstoffdioxid zeigt eine stärkere schädliche Wirkung als Stickstoffmonoxid (NO), weshalb NO₂ im Zentrum der Bemühungen um saubere Luft steht.⁸

Außerdem konnten aus den Lagedaten des Multikopters die Ausrichtung der Drohne (Strahlungsfehlerminimierung), Luftbewegungen und zuverlässige Höhendaten (GPS) ermittelt werden. Ergänzt wurden die Flugmessungen in Lörrach sowie in Kehl durch Schallpegel-, und Partikelmessungen sowie Verkehrszählungen am Boden. Ziel davon war es ggf. erhöhte Belastung der Luftschadstoffe bestimmten Verkehrssituationen zuzuordnen. Grund der ergänzenden Messungen war, dass aus Sicherheitsgründen ein Abstand zwischen Verkehr (Quelle) und Drohne eingehalten werden musste und somit keine eindeutige Zuordnung der Emissionsursache und den erfassten Daten möglich ist. Vor allem im innerstädtischen Bereich gibt es bodennah diverse turbulente Strömungseffekte, die eine Zuordnung erschweren. Pro Standort wurden mehrere Flugmessungen von jeweils 20 Minuten durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Anzahl

verfügbarer Messsysteme und unter Berücksichtigung der Datenqualität wurde die Anzahl an Standorten stark reduziert und je Kommune an max. zwei bis vier Standorten geflogen. Bei den ausgewählten Standorten wurde darauf geachtet, unterschiedliche örtliche Gegebenheiten und Emissionsquellen zu erfassen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Flugmessungen, welche über einen Flugtag hinweg an den beiden Standorten „Lichtung“ sowie „A81“ in Böblingen im Juli 2023 erfasst wurden, gegenübergestellt (Abbildung 7).

Die Abbildung 8 bis 11 zeigen die ausgewerteten und visualisierten Messergebnisse der Daten, welche mithilfe der vertikalen Aufstiege an den beiden Standorten „Lichtung“ und „A81“ erfasst wurden. Auf der jeweiligen X-Achse werden die Konzentrationen der untersuchten Emissionen (bspw. PM₁₀ sowie CO₂) aufgeführt. Die Y-Achse zeigt die jeweilige Flughöhe. Die verschiedenen farbigen Linien in den Diagrammen zeigen jeweils die gemittelten Messergebnisse je Flug und Standort. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die gemessenen

⁸ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/faq_nox.pdf

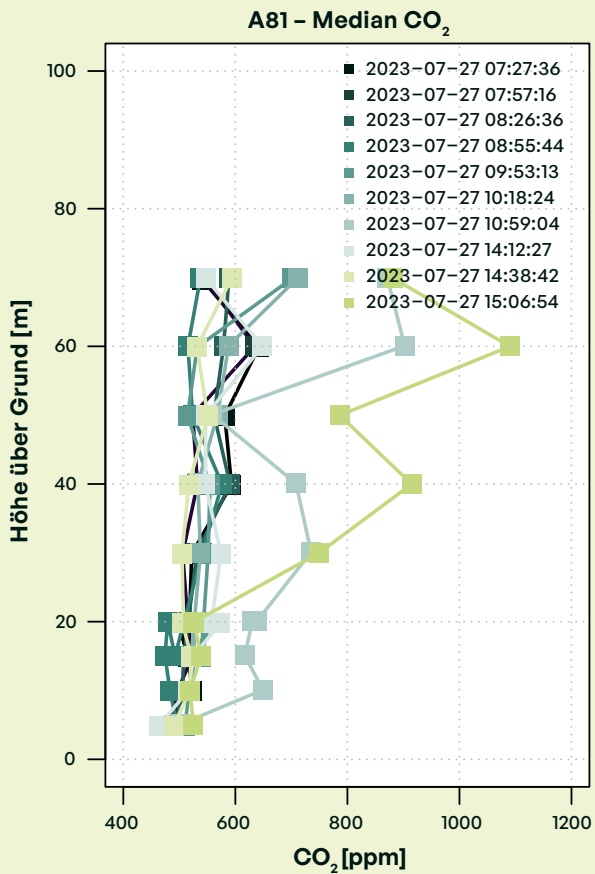


Abbildung 8: Aufbereitete Messergebnisse CO2 Standort A81 in Böblingen (eigene Darstellung Universität Tübingen)

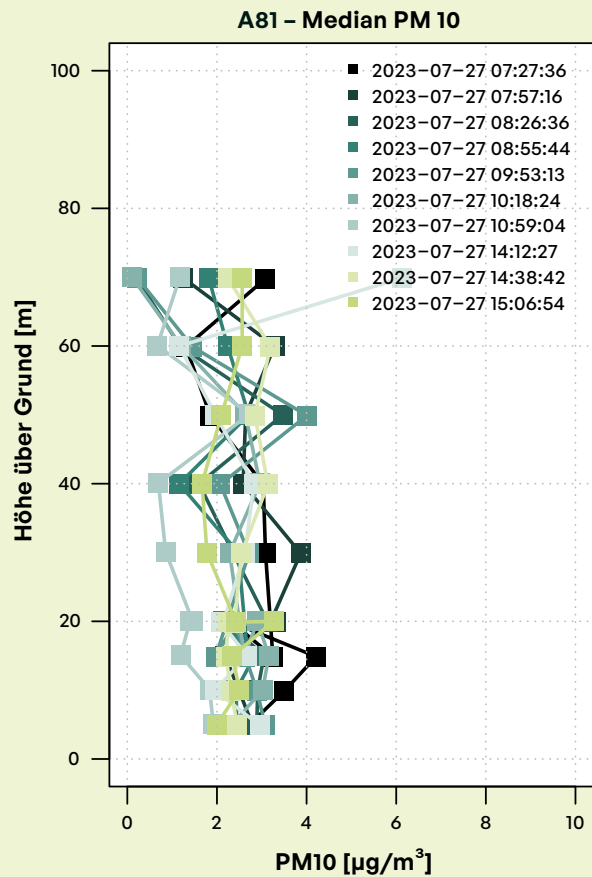


Abbildung 9: Aufbereitete Messergebnisse PM10 Standort A81 in Böblingen (eigene Darstellung Universität Tübingen)

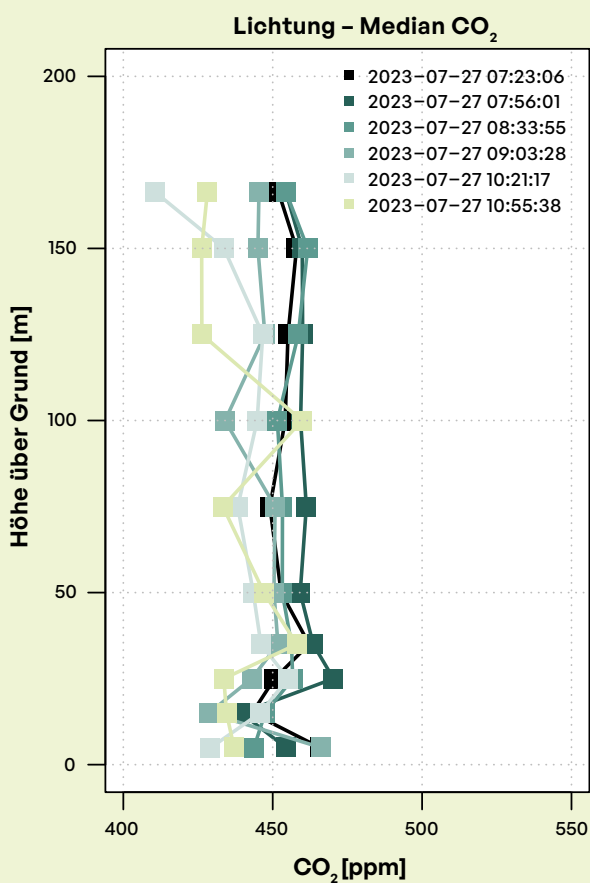


Abbildung 10: Aufbereitete Messergebnisse CO2 Standort Lichtung in Böblingen (eigene Darstellung Universität Tübingen)

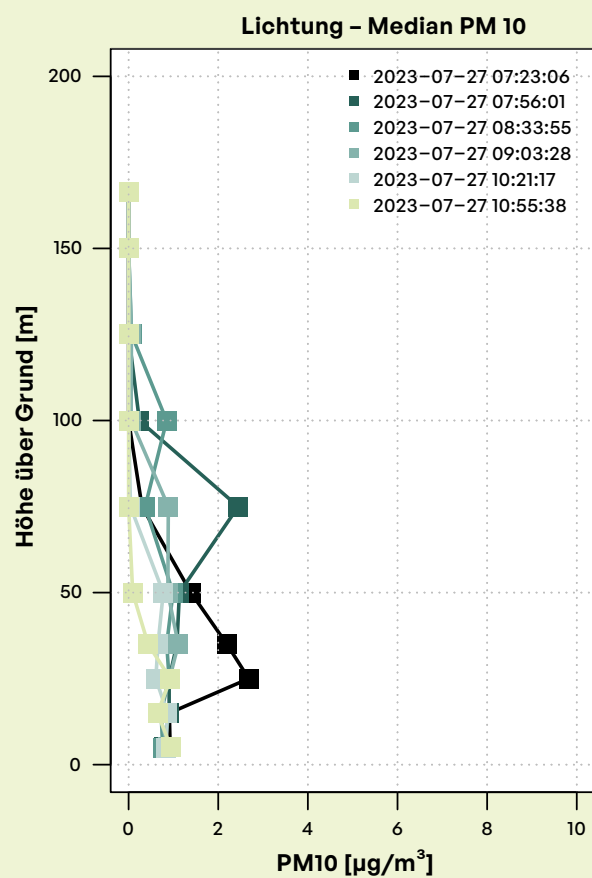


Abbildung 11: Aufbereitete Messergebnisse PM10 Standort Lichtung in Böblingen (eigene Darstellung Universität Tübingen)



Aufnahmen Drohnenflug in Stuttgart Herbst 2023

Mittelwerte (Mediane) Momentaufnahmen sind. Der Mittelwert eines dreiminütigen Messintervalls ist nicht mit einem Stundenmittelwert gleichzusetzen und dient auch nicht der Prüfung einer Einhaltung eines Tages- oder Stundengrenzwerts. Dennoch liefert die Messung ein ungefähres Bild des Schadstoffaufkommens an der ausgewählten Stelle im Tagesverlauf. Durch die hohe Mobilität des Multikoptermesssystems erhält man eine räumliche Abbildung zu verschiedenen Zeitpunkten auf Kosten einer zeitlichen Vollständigkeit. Wiederholt man z. B. innerhalb einer Stunde eine Messung auf selber Höhe mehrmals, kann man den errechneten Mittelwert unter Vorbehalt auch als Stundenmittel annehmen. Dabei ist aber zu beachten, dass sich die allgemeinen Umgebungsbedingungen nicht zu stark ändern dürfen.

Vergleicht man die beiden Messstandorte miteinander, wird ein direkter Unterschied in den Messungen der Partikelmasse PM_{10} und CO_2 erkennbar. Die CO_2 -Werte zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messstandorten. Während die Vertikalprofile am Standort „Waldlichtung“ um 450 ppm schwanken und auch mit der Höhe nur eine geringe Varianz aufweisen, liegen die Messwerte an der A81 mit 500–600 ppm deutlich höher. Zwei Flüge zeigen

mit knapp 1000 ppm sogar sehr hohe Werte. Worauf diese Ausreißer zurückzuführen sind, ist schwer zu sagen. Es könnte sich um ein deutlich höheres Verkehrsaufkommen auf der A81 zu diesem Zeitpunkt und etwas davor handeln, so dass sich in bestimmten Höhen größere Mengen CO_2 angesammelt haben. Am Standort „A81“ ist auch ein Anstieg der Konzentration mit der Höhe über Grund zu erkennen.

Die Partikelkonzentrationen der beiden Messstellen unterscheiden sich deutlich. Die PM-Werte am Standort „A81“ sind etwa doppelt so hoch. Auch die Streuung der Werte ist an der A81 größer. In Höhen über 120 m ist die Partikelkonzentration am Standort „Lichtung“ sehr gering. Der Großteil der gemessenen Partikel befindet sich dort unterhalb einer Höhe von 100 m über Grund. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die morgendlichen Messungen sowohl an der A81 als auch an der Waldlichtung die höchsten Konzentrationen aufweisen. Ein Tagesgang ist jedoch für diesen Messtag nicht erkennbar gewesen.

GEWONNENE ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNG AUS UNLUBW

Technische Anforderungen und Handhabung

Im Rahmen des Forschungsprojekts UnLuBW konnte ein mobiles Messsystem zur Montage auf Multikoptern zusammengestellt werden, mit dem, erfolgreich Messungen von Luftschadstoffen an unterschiedlichen Orten durchgeführt wurden. Der überwiegende Teil der eingesetzten Sensorik ist leicht (0,5–0,6 kg). Lediglich der professionelle NO₂ Sensor wiegt mit 1,8 kg deutlich mehr und erfordert eine hohe verfügbare Traglast der einzusetzenden Drohne. Die elektrochemischen Sensoren (NO₂ und O₃) wurden für den erprobten Einsatzbereich als nicht geeignet definiert. Diese sollten eher für die Messung von konstanten Umgebungen ohne eine größere Anzahl an beeinflussenden Faktoren verwendet werden. Die Akkulaufzeit war für das erprobte Vorhaben und die geflogenen Vertikalprofile ausreichend, dennoch waren mehrere Akkupakete notwendig, um einen über den Tagesverlauf dauernden Messeinsatz gewährleisten zu können. Aufgrund der Größe und des Gewichts der verwendeten Drohne sind bei der Ausbildung der einzusetzenden Piloten:innen und der daraus resultierenden Prüfklasse im Genehmigungsprozess gewisse Anforderungen zu erfüllen. Piloten:innen benötigen den Kompetenznachweis A2 und es ist eine Genehmigung der speziellen Kategorie erforderlich. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mobile Messsysteme wie das in UnLuBW, geeignet sind, um geplante Maßnahmen zur Reduzierung von Luftschadstoffen und deren Wirkungsweise zu begleiten. Dennoch muss auf eine ausreichend große Stichprobe an Messflügen geachtet und die Entfernung zur Maßnahme möglichst gering sein, damit Effekte auch tatsächlich repräsentativ erfasst werden können. Hierbei können begleitende bodennahe Messungen von Lärm, Partikelmengen oder dem Verkehrsaufkommen einen Beitrag leisten, um weitere Anhaltspunkte für die Ursache von möglichen Luftschadstoffen in Verbindung mit den Messdaten der Drohnen zu erhalten. Es bestehen

jedoch gute Chancen, dass in Zukunft mit leichteren professionellen Sensoren und dadurch Drohnen mit geringerer Abflugmasse sowie einer immer weiter voranschreitenden Integration des Drohnenflugverkehrs in den allgemeinen Luftverkehr solche Systeme operativ und voll autonom vertikale Schadstoffmessungen durchführen können.

Genehmigungsprozesse

Die größte Herausforderung des Genehmigungsprozesses war es, alle Ansprechpartner:innen zu eruiieren, die im Rahmen des Flugvorhaben involviert werden mussten. Die Einteilung in die jeweilige relevante Prüfkategorie bspw. „spezielle“ Kategorie ist mithilfe des vom LBO kommunizierten Prüfschemas zu ermitteln. Muss zum Erhalt der Fluggenehmigung eine Risikobewertung mithilfe eines SORA sowie eines ConOps erstellt werden, sollte der jeweilige Antragstellende mit dem Thema vertraut sein. Planen bspw. Kommunen eine Nutzung des beschriebenen Systems, sollte in jedem Fall eine feste Ansprechperson für die Bearbeitung des Genehmigungsprozesses vorgesehen werden. Bei der Auswahl geeigneter Messstandorte ist es vorteilhaft, wenn bereits vor Bearbeitung des Genehmigungsverfahrens eine enge Abstimmung mit dem zuständigen Liegenschafts- und Ordnungsamt stattfindet. Generell ist es ratsam, sich frühzeitig mit den örtlichen Behörden oder Expert:innen in Verbindung zu setzen, um genaue Informationen und Unterstützung für den Genehmigungsprozess zu erhalten. Somit können frühzeitig mögliche Herausforderungen abgeklärt werden. Die Erfahrungen aus UnLuBW haben gezeigt, dass mehr Parteien in den Genehmigungs- und Flugprozess zu involvieren waren als ursprünglich angenommen. Vor allem in der Zusammenarbeit mit Kliniken ist aufgefallen, dass einige im Umgang mit Drohneneinsätzen sehr verhalten reagieren und nicht genau über Ihre Rechte und Pflichten informiert sind. Deshalb sollten aus

Sicht des Projektkonsortiums frühzeitig das jeweilige Liegenschafts- und Ordnungsamt, das Umweltamt, Betreiber von Flugplätzen und Helipads bspw. Kliniken, Feuerwehr und Polizei sowie die jeweiligen Grundstückeigentümer:innen in den Prozess involviert werden. Die Flexibilität des Messsystems gegenüber den Bodenmessstationen ist vorhanden, allerdings verhindern der umfangreiche Genehmigungsprozess, die zu berücksichtigenden Vorschriften und die Beteiligung aller relevanten Personen kurzfristige Aufstiege der Drohne an beliebigen Orten.

Interpretation der Daten

Grundsätzlich konnte mit dem Forschungsprojekt gezeigt werden, dass mit dem zusammengestellten mobilen Messsystem valide Daten von Luftschadstoffen an unterschiedlichen Standorten und Höhen ermittelt werden konnten. Zur Analyse von Vorher-Nachher Effekten von Maßnahmen wie bspw. der Tempo-Reduktion sind sie, aufgrund der momentanen Verordnungen zum Drohnenflug, der damit einhergehenden Beschränkungen sowie den damit verbundenen Aufwand zur Durchführung von Messungen, nur bedingt geeignet. Aufgrund der großen Entfernung, die zu Infrastruktur und Bebauung entsprechend der 1:1-Regelung für Fluggenehmigungen der speziellen Kategorie eingehalten werden muss, sind Beurteilungen der Ergebnisse solcher Maßnahmen schwer durchführbar. Diese Regelung besagt, dass der Sicherheitsabstand zum Aufstiegsort der Drohne so groß sein muss, wie die Flughöhe ist, in die die Drohne aufsteigen soll. Sollen also Schadstoffemissionen nahe der Straße mit dem Messsystem erfasst werden, kann das aufgrund der derzeitigen gesetzlichen Vorgaben nicht innenstadtnah realisiert werden. Dieser Umstand sollte bei der Ausarbeitung einer Messstrategie unbedingt beachtet werden. Aufgrund der aufwändigen Genehmigungsprozesse sollte für ähnliche Messvorhaben eine

geringe Anzahl an Standorten ausgewählt und für die Ermittlung repräsentativer Daten über mehrere Tage hinweg unter unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen (bspw. Windrichtung o. ä.) gemessen werden.

Bürger:innenbeteiligung

Bürgerwissenschaft, auch als Citizen Science bekannt, spielt eine immer bedeutendere Rolle in der Schadstoffmessung in städtischen Gebieten. Dabei engagieren sich Bürger:innen aktiv in der Erfassung und Analyse von Umweltbelastungen, insbesondere in Städten, wo Luft- und Bodenverschmutzung häufig gesundheitliche Risiken darstellen. Durch die Nutzung von kostengünstigen Sensoren und mobilen Apps können Bürger:innen Messdaten in Echtzeit sammeln und somit eine breite, ständig aktualisierte Datenbasis schaffen. Diese Daten sind nicht nur wertvoll für die Identifikation von Schadstoffquellen und die Bewertung von Umweltauswirkungen, sondern fördern auch das Umweltbewusstsein in der Bevölkerung und ermöglichen kollektive Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität und Lebensqualität in städtischen Gebieten. Für das Forschungsprojekt UnLuBW war die Integration von Citizen Science nur bedingt möglich, da die gewonnenen Daten oftmals keiner Qualitätskontrolle unterliegen und deshalb auch starke Abweichungen haben können. Außerdem sind oft günstige Sensoren verbaut, die qualitativ nicht mit meteorologischen „state-of-the-art“ Technik mithalten können. Zudem können Mängel bei der Installation und der Auswahl der Messstandorte auftreten. Dennoch nahm die Beteiligung und Aufklärung in Form von Veranstaltungen zur Vorstellung des Projektes und dem Messsystem eine zentrale Rolle in der Kommunikation zu den Bürger:innen der jeweiligen Kommunen ein und wird in jedem Fall empfohlen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. (2019). *Saubere Luft. Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen*. Halle (Saale). Von https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/Leo_Stellungnahme_SaubereLuft_2019_Web_03.pdf (letzter Zugriff am 19.03.2024)
- Schulz, H., Karrasch, S., Bölke, G., Cyrus, J., Hornberg, C., Pickford, R. P., ... Hoffmann, B. (2018). *Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit*. Berlin: Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. Von <https://www.pneumologie.de/file-download/24> (letzter Zugriff am 19.03.2024)
- Max_Planck-Gesellschaft (2019): Luftverschmutzung verkürzt das Leben der Europäer um rund zwei Jahre. Online: <https://www.mpg.de/12808584/luftverschmutzung-verkuerzt-das-leben-der-europaeer-rund-zwei-jahre> (letzter Zugriff am 19.03.2024)
- Umweltbundesamt (2021): Trend der Luftschadstoffemissionen. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/trend-der-luftschadstoffemissionen> (letzter Zugriff am 19.03.2024)
- Science Media Center (2022): EU-Kommission schlägt neue Grenzwerte für Luftschadstoffe vor. Online: <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/rapid-reaction/details/news/eu-kommission-schlaegt-neue-grenzwerte-fuer-luftschadstoffe-vor/> – (letzter Zugriff am 19.04.2024)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen (RdSchr. D. BMUB v. 23.1.2017). Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/370/dokumente/lesefassung_bep_2018-26-04.pdf – letzter Aufruf am 19.03.2024
- Umweltbundesamt (2022): Luftmessnetz – Wo und wie wird gemessen? Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/messenbeobachtenueberwachen/luftmessnetz-wo-wie-wird-gemessen#gesetzliche-grundlagen> – (letzter Zugriff am 19.04.2024)
- Umweltbundesamt (2017): Luftschadstoffe im Überblick. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick> (letzter Zugriff am 19.03.2024)

ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Tabelle 1:	Darstellung der unterschiedlichen Luftschadstoffe, mögliche gesundheitliche Folgen und Entstehungsquellen	8
Tabelle 2:	Übersicht Grenzwerte für Luftschadstoffe und Empfehlungen von WHO sowie gegenübergestellt EU-Grenzwert	11
Tabelle 3:	Übersicht Drohnensystem	16
Tabelle 4:	Übersicht Auswahlkriterien für Maßnahmen zur Reduzierung von Luftschadstoffen	17
Abbildung 1:	Auswahl Sensorik für Drohne	13
Abbildung 2:	Risikobewertung Vorprüfung gemäß Betriebsdetails LBA-V2.3	20
Abbildung 3:	Vollständige Risikobewertung gemäß Betriebsdetails LBA-V2.3	21
Abbildung 4:	Prüfschema Beantragung Fluggenehmigung in spezieller Kategorie	29
Abbildung 5:	Darstellung geplanter Flugstandort inkl. Markierung der notwendigen Radien auf einem Firmengelände in Lörrach für den Erhalt der Fluggenehmigung	30
Abbildung 6:	Voxelvisualisierung interpolierter CO ₂ -Messungen stromabwärts der A7 bei Erlangen (Jagst) bis 100 m über Grund, zweifach überhöht	31
Abbildung 7:	Übersicht der beiden Messstandorte in Böblingen aus dem Projekt UnLuBW	39
Abbildung 8:	Aufbereitete Messergebnisse CO ₂ Standort A81 in Böblingen	40
Abbildung 9:	Aufbereitete Messergebnisse PM ₁₀ Standort A81 in Böblingen	40
Abbildung 10:	Aufbereitete Messergebnisse CO ₂ Standort Lichtung in Böblingen	40
Abbildung 11:	Aufbereitete Messergebnisse PM ₁₀ Standort Lichtung in Böblingen.	40
Abbildung 12:	Aufnahmen Drohnenflug in Stuttgart Herbst 2023	41

BILDER

DJI Matrice 300	4
Luftschadstoffemissionen aus Industrieanlage	6
DJI Matrice 300	7
DJI Matrice 300 mit Fallschirm ohne NO ₂ Sensor	15
DJI Matrice 300 mit Fallschirm mit NO ₂ Sensor	15
Vorbereitung des Messfluges im Rosensteinpark in Stuttgart	18
Steuerung der UAS im Rosensteinpark Stuttgart	33
Aufnahmen Drohnenflug in Stuttgart Herbst 2023	41

IMPRESSUM

Herausgeber:

Institut Stadt|Mobilität|Energie GmbH
Rotenwaldstraße 18
70197 Stuttgart
www.i-sme.de

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Jens Bange
Prof. Dr. Volker Hochschild
Dr. Andreas Platis
Kjell zum Berge
Moritz Mauz
Franziska Geske
Karsten Hager
Christoph Schlettig

Grafik

Renata Sas

Bildnachweis

Umschlag, S. 4, S. 6, S. 15, S. 18, S. 33,
S. 41: Olaf Kühl, artismedia GmbH; S. 6: freepik

© ISME

www.unlubw.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages