

TEXTE

06/2022

# Lärmauswirkungen des Einsatzes von Drohnen auf die Umwelt

Abschlussbericht



TEXTE 06/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 54 102 1

FB000695

# **Lärmauswirkungen des Einsatzes von Drohnen auf die Umwelt**

Abschlussbericht

von

Stefan Becker, Dominic Gutsche  
BeSB GmbH Berlin Schalltechnisches Büro, Berlin

Dr. Beat Schäffer, Dr. Kurt Heutschi  
Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH Dübendorf

Dr. Christian Eckart  
Redeker, Sellner, Dahs Rechtsanwälte PartG mbB, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

#### BeSB GmbH Berlin

Schalltechnisches Büro

Undinestr. 43  
12203 Berlin  
Deutschland

#### Empa,

Eidgenössische Materialprüfungs-  
und Forschungsanstalt  
Überlandstr. 129  
8600 Dübendorf  
Schweiz

#### Redeker Sellner Dahs

Rechtsanwälte PartG mbB

Leipziger Platz 3  
10117 Berlin  
Deutschland

### Abschlussdatum:

Oktober 2021

### Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 Lärminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen  
Julia Treichel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung: Lärmauswirkungen des Einsatzes von Drohnen auf die Umwelt**

Unbemannte Fluggeräte, sog. „Drohnen“, werden immer leistungsfähiger, was zu einer stetig steigenden Anzahl an möglichen Anwendungen führt. Über die Geräuschentwicklung von Drohnen sowie die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt liegen derzeit weder national noch international fundierte Erkenntnisse vor.

Aus diesem Grund sollte eine Literaturstudie durchgeführt werden, um den Wissensstand zum Themenbereich „Lärm“ zusammenzutragen. Darüber hinaus sollten Vorschläge für die Weiterentwicklung erarbeitet werden.

In der vorliegenden Studie werden die Ergebnisse einer systematischen Auswertung der vorhandenen Literatur zu zivilen, unbemannten Fluggeräten in Bezug auf die Entwicklung des Drohnenmarktes, die Geräuschemissionen und die Lärmwirkungen auf Menschen dargestellt.

Die Auswertung der derzeit vorliegenden Literatur legt den Schluss nahe, dass die Geräusche von Drohnen deutlich stärker belästigend sind, als sonstige Verkehrsgeräusche. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf ihre Geräuschcharakteristik, die durch eine starke Tonhaltigkeit sowie ein hochfrequentes, breitbandiges Geräusch gekennzeichnet ist.

Ergänzt wird die Studie durch eine Darstellung und Erörterung der derzeitigen (Stand 8-2021) rechtlichen Regelungen in Deutschland sowie eigener Berechnungen zur Höhe der Geräuschemissionen bei verschiedenen denkbaren Anwendungsfällen von Drohnen.

Die Ergebnisse der Studie beschränken sich im Wesentlichen auf Drohnen der Bauform Multicopter mit einer maximalen Startmasse bis 25 kg, da valide Literaturangaben für andere Bauformen und/oder höhere Startmassen derzeit kaum vorliegen. Aber auch für Drohnen mit einer maximalen Startmasse unter 25 kg ist die Datenlage derzeit sehr dünn. Es verbleiben daher für zukünftige Studien noch eine Reihe von offenen Fragen, die es zu klären gilt.

### **Abstract: Noise effects of Unmanned Aircraft Vehicles (UAV) on the environment**

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), commonly referred to as "drones", are becoming more and more powerful, which will lead to an increasing number of possible applications. With regard to noise effects of the operation of these devices, there are currently no well-founded findings.

A literature study should therefore be done to compile the current state of knowledge especially in terms of noise. Furthermore, proposals for further development should be presented.

The current study shows the results of a systematic evaluation of the existing literature on civil, unmanned aerial vehicles in relation to the development of the drone market, noise emissions and the effects of noise on humans.

Current literature suggests that drone noise is substantially more annoying than other traffic noise due to special acoustic characteristics such as high tonality and high-frequency broadband noise.

The study is supplemented by a presentation and discussion of the current (status 8-2021) legal regulations in Germany as well as our own calculations on the noise level in the neighborhood in various conceivable applications of drones.

The results are essentially limited to "multicopter" type drones with a maximum take-off mass of up to 25 kg, since there are currently hardly any valid literature references for other types of construction and / or a higher take-off mass. But even for drones with a maximum take-off mass of less than 25 kg, available data is currently very rare. Therefore, a range of open questions remain to be tackled by future studies.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	22
1 Begriffsbestimmung.....	26
1.1 Der Begriff „Drohne“.....	26
1.2 Einteilung von Drohnen.....	26
2 Entwicklung des Drohnenmarktes und Beschwerdefälle.....	29
2.1 Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. -ausschluss.....	29
2.2 Formalismus der Literaturrecherche.....	29
2.2.1 Suchstrategien.....	29
2.2.1.1 Elektronische Datenbanksuche.....	30
2.2.1.2 Suchstrings.....	30
2.2.1.3 Titel-Abstract- und Volltextscreening.....	30
2.2.1.4 „händische“ Suche im Internet.....	31
2.2.1.5 Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	32
2.3 Ergebnisse der Literaturrecherche zum Themenbereich „Marktanalyse“.....	32
2.3.1 Entwicklung des Drohnenmarktes.....	32
2.3.2 Einsatzbereiche.....	38
2.4 Beschwerdefälle (national).....	40
3 Geräuschmessungen von Drohnen.....	43
3.1 Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. ausschluss.....	43
3.2 Formalismus der Literaturrecherche.....	43
3.2.1 Suchstrategien.....	43
3.2.1.1 Elektronische Datenbanksuche.....	43
3.2.1.2 Suchstring.....	44
3.2.1.3 Trefferzahlen.....	44
3.2.1.4 Screening.....	44
3.2.1.5 „händische“ Suche im Internet und Ergänzungen von einzelnen Referenzen.....	45
3.2.1.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	45
3.2.1.7 Dokumentation der Literaturrecherche.....	46
3.3 Ergebnis der Literaturrecherche zum Themenbereich Geräuschmessungen.....	49

3.3.1	Messverfahren .....	49
3.3.1.1	Labormessungen.....	49
3.3.1.2	Feldmessungen .....	51
3.3.1.3	Zusammenfassung der in den Studien eingesetzten Labor- und Feldmessverfahren..	52
3.3.2	Emissionswerte .....	53
3.3.3	Vertikale Richtcharakteristik.....	58
3.3.4	Exemplarische Spektren.....	59
3.3.5	Folgerungen für die Vermessung von akustischen Drohnenemissionen .....	62
4	Literaturrecherche zu psychoakustischen Untersuchungen .....	65
4.1	Genereller Ansatz und Methodik.....	65
4.2	Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. ausschluss .....	65
4.3	Formalismus der Literaturrecherche .....	66
4.3.1	Suchstrategien .....	66
4.3.1.1	Elektronische Datenbanksuche .....	66
4.3.1.2	Suchstring .....	67
4.3.1.3	Trefferzahlen.....	68
4.3.1.4	Titel-Abstract- und Volltextscreening.....	68
4.3.1.5	"händische" Suche im Internet.....	69
4.3.1.6	Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	69
4.3.2	Datenextraktion und Qualitätsbewertung.....	70
4.4	Ergebnisse der Literaturrecherche zum Themenbereich „psychoakustische Untersuchungen“ .....	71
4.4.1	Potenziell störende Geräuschcharakteristiken von Drohnen.....	71
4.4.2	Psychoakustische Untersuchungen .....	72
4.4.2.1	Lästigkeit des Lärms von Drohnen.....	76
4.4.2.2	Einfluss von Design und Betrieb von Drohnen auf die Lästigkeit .....	78
4.4.2.3	Weitere Wirkungsaspekte .....	79
4.4.2.4	Limitationen der Studien .....	79
4.4.3	Akzeptanz von Drohnen.....	81
4.4.4	Diskussion des systematischen Reviews.....	82
4.4.5	Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen .....	85
5	Rechtliche Rahmenbedingungen .....	87
5.1	Derzeitige Situation (Stand 8-2021).....	87
5.1.1	Einleitung .....	87

5.1.2	Vorgaben über die Zulassung und Luftraumnutzung für Drohnen im Unionsrecht .....	87
5.1.2.1	Die EASA-Grundverordnung 2018/1139 .....	87
5.1.2.2	Verordnungen der EU-Kommission .....	88
5.1.2.3	Spielräume für Mitgliedstaaten: Geografische UAS-Gebiete .....	92
5.1.3	Der deutsche Rechtsrahmen für den Luftverkehr .....	94
5.1.3.1	Das Luftverkehrsgesetz .....	94
5.1.3.2	Fluglärmschutzgesetz und Landeplatz-Lärmschutz-Verordnung .....	95
5.1.3.3	Die Luftverkehrs-Ordnung .....	96
5.1.3.4	Der Regelungsrahmen für sonstigen Lärm .....	99
5.1.3.5	Fahrzeuge zur Teilnahme am Verkehr im Einzelfall sind keine Anlagen .....	99
5.1.3.6	Fahrzeuge als Arbeitsmittel .....	99
5.1.3.7	Fahrzeuge, die dem Betrieb einer Anlage zuzurechnen sind .....	100
5.1.3.8	Keine Anwendung auf Flugplätze .....	100
5.1.4	Gebietsbezogene Naturschutz-Vorgaben .....	100
5.1.5	Auswirkungen auf den Betrieb von Drohnen mit Blick auf spezifische Anwendungen .....	100
5.1.5.1	Anwendungsfall 1: Inspektion von technischen Anlagen und landwirtschaftlichen Flächen .....	101
5.1.5.2	Anwendungsfall 2: Flüge zur Erlangung von Geoinformationen (z. B. Baufortschritt auf Baustellen oder Erstellung von Thermobildern) .....	101
5.1.5.3	Anwendungsfall 3: Lieferung von kleineren Paketen bis zu 5 kg .....	102
5.1.5.4	Anwendungsfall 4: Lichtshows .....	103
5.2	Vorschläge für eine Weiterentwicklung des Rechtsrahmens .....	104
5.2.1	EU-Vorgaben .....	104
5.2.2	Mitgliedstaaten .....	104
5.2.2.1	Infrastruktur .....	104
5.2.2.2	Betrieb .....	105
5.2.2.3	Fallbezogene Erlaubnisse .....	105
5.2.2.4	Gebietsbezogene Nutzungsvorgaben .....	105
5.2.2.5	Bündelung auf „Flugrouten“ .....	106
6	Auswirkungen auf Mensch und Umwelt .....	107
6.1	Berechnungsmethoden .....	107
6.1.1	DIN 45684-1 .....	107
6.1.2	DIN ISO 9613-2 .....	108
6.2	Modellierung und Berechnungsergebnisse .....	108

6.2.1	Allgemeines.....	108
6.2.2	Szenario A – Auslieferung von Waren .....	112
6.2.2.1	Modellierung .....	112
6.2.2.2	Ergebnisse.....	114
6.2.3	Szenario B – Geoerkundung.....	116
6.2.3.1	Modellierung .....	116
6.2.3.2	Ergebnisse.....	117
6.2.4	Szenario C – Drohnen-Lichtshow .....	118
7	Fazit und Ausblick.....	120
8	Quellenverzeichnis .....	122

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Beispiele für Drohnen verschiedener Bauformen.....	28
Abbildung 2	Prisma-Flow-Diagramm, Marktentwicklung.....	32
Abbildung 3	Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA gem. Jahresberichte FAA, Mittelwerte der Schätzungen für private kleine Drohnen (sUAS).....	33
Abbildung 4	Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA gem. Jahresberichte FAA, Mittelwerte der Schätzungen für professionelle kleine Drohnen (sUAS) .....	34
Abbildung 5	Vergleich der Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA und in Deutschland, privat genutzte Drohnen .....	36
Abbildung 6	Vergleich der Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA und in Deutschland, professionell genutzte Drohnen.....	37
Abbildung 7	Einsatzbereiche von Drohnen im professionellen Bereich, USA, 2018 .....	38
Abbildung 8	Übersicht der Literaturrecherche.....	46
Abbildung 9	Freifeldemissionswerte von Drohnen der Bauform „Multicopter“ als A-bewerteter Schalldruckpegel in 1 m Abstand für einen Abstrahlwinkel von -30° in Abhängigkeit des Drohnengewichts für den Betriebszustand Schweben.....	57
Abbildung 10	Freifeldemissionswerte von Drohnen der Bauform „Multicopter“ als A-bewerteter Schalldruckpegel in 1 m Abstand für einen Abstrahlwinkel von -30° in Abhängigkeit des Drohnengewichts für den Betriebszustand Vorwärtsflug. ....	58
Abbildung 11	Vertikale Schallabstrahlungscharakteristik von Multicoptern. ....	59
Abbildung 12	Beispielhaftes Leistungsdichtespektrum einer im Zustand Schweben im Labor untersuchten DJI Mavic 2 Pro Drohne.....	60
Abbildung 13	Beispielhafte Terzbandspektren der Emission von verschiedenen Drohnen bei maximaler Leistung im Labor unter -30° .....	61
Abbildung 14	Beispielhafte Oktavbandspektren der Emission von verschiedenen Drohnen bei maximaler Leistung im Labor unter -30° .....	62
Abbildung 15	Prisma-Fließdiagramm zu psychoakustischen Untersuchungen.....	70

Abbildung 16	Illustration der psychoakustischen Pegeldifferenz ( $\Delta L$ ) zwischen Drohnen und einer Referenzschallquelle: Generische (hypothetische) Lärmwirkungskurven für die Lästigkeit in Abhängigkeit des Schalldruckpegels für eine Drohne und eine Referenzschallquelle, und $\Delta L$ als Verschiebung der beiden Kurven zueinander auf der Abszisse. ....	77
Abbildung 17	Ausschnitt aus dem verwendeten 3D-Modell (verwendet für Szenarien A und B) .....	109
Abbildung 18	Beispiel Eingabefeld Flugroute in CADNA A .....	109
Abbildung 19	Beispiel Eingabefeld Fluggruppe in CADNA A.....	110
Abbildung 20	3D-Darstellung der in CADNA/A berücksichtigten Richtcharakteristik eines Multicopters .....	111
Abbildung 21	Berechnete vertikale Raster nach DIN ISO 9613-2 Szenario A – Auslieferung.....	114
Abbildung 22	Berechnungsergebnisse Szenario A – Auslieferung, energetischer Mittelwert $L_{Aeq,Tag}$ bei einer Auslieferung pro Tag .....	115
Abbildung 23	Berechnete vertikale Raster nach DIN ISO 9613-2 Szenario B - Geoerkundung ...	117
Abbildung 24	Berechnungsergebnisse Szenario B - Geoerkundung energetischer Mittelwert $L_{Aeq,Tag}$ .....	118
Abbildung 25	Szenario C – Drohnen-Lichtshow, Prinzipielle Anordnung und 3D-Darstellung des Berechnungsmodells .....	118

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Quantitatives Ergebnis der Literaturrecherche, Anzahl „Treffer“ bei der Datenbanksuche und Anzahl relevanter Artikel oder Berichte je Themengebiet...14
Tabelle 2	Schätzung der Anzahl sowie der Flüge von Drohnen > 25 kg MTOM (IUAS) in den USA .....38
Tabelle 3	Baumuster und typische Kenngrößen (Herstellerangaben) von derzeit eingesetzten Drohnen .....39
Tabelle 4	Beschwerdefälle zu Drohnenbetrieb, Ergebnisse der Recherche bei Landesbehörden .....40
Tabelle 5	Wichtigste Aspekte der in die Detailanalyse eingeschlossenen Referenzen .....46
Tabelle 6	In der gefundenen Literatur dokumentierte Messdaten für den Zustand Schweben .....53
Tabelle 7	In der gefundenen Literatur dokumentierte Messdaten für den Zustand Vorwärtsflug .....54
Tabelle 8	Ein- und Ausschlusskriterien gemäß Population-Exposure-Outcome (PEO) Schema .....65
Tabelle 9	In das systematische Review zu psychoakustischen Untersuchungen eingeschlossene Studien. ....74
Tabelle 10	Delegierte VO 2019/945: Maximale Schallleistungspegel je UA-Klasse (einschließlich Übergangszeiträumen) .....90
Tabelle 11	Vor- und Nachteile der untersuchten Berechnungsmethoden im Falle einer Anwendung auf Drohnengeräusche.....112

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BVLOS</b>	Beyond Visual Line of Sight
<b>BAF</b>	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
<b>BGBI</b>	Bundesgesetzblatt
<b>BauNVO</b>	Baunutzungsverordnung
<b>BImSchG</b>	Bundes-Immissionsschutzgesetz
<b>BMVI</b>	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
<b>BNatSchG</b>	Bundesnaturschutzgesetz
<b>dB(A)</b>	Hilfsmaßeinheit für den A-bewerteten Schalldruckpegel
<b>dB(Z)</b>	Hilfsmaßeinheit für den unbewerteten (linearen) Schalldruckpegel
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DFS</b>	Deutsche Flugsicherung GmbH
<b>EASA</b>	European Union Aviation Safety Agency
<b>EPNL</b>	Effective Perceived Noise Level
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>eVTOL</b>	Electric Vertical Take-Off and Landing (wird auch für elektrisch angetriebene Starrflügler mit VTOL-Eigenschaften verwendet)
<b>Empa</b>	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration (USA)
<b>FluglärmG</b>	Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm
<b>F55</b>	Schwankungsstärke (fluctuation strength), 5%-Perzentil, in 5% der Zeit überschritten
<b>HA</b>	Highly annoyed
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization
<b>ICBEN</b>	International Commission on Biological Effects of Noise
<b>IFR</b>	Instrument Flight Rules (instrumentenflugregeln)
<b>ISO</b>	International Standard Organization
<b>IUAS</b>	Large Unmanned Aircraft System(s), (MTOM > 25 kg)
<b>LuftVG</b>	Luftverkehrsgesetz
<b>LuftVO</b>	Luftverkehrs-Ordnung
<b>LuftVZO</b>	Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung
<b>L<sub>A5</sub></b>	5%-Perzentilpegel, A-bewertet, Schalldruckpegel, der in 5% der Zeit überschritten wird
<b>L<sub>AE</sub></b>	Einzelereignispegel (Single Event Level), A-bewertet
<b>L<sub>Aeq</sub></b>	Äquivalenter Dauerschallpegel, A-bewertet
<b>L<sub>Amax</sub></b>	Maximalpegel
<b>L<sub>CE</sub></b>	Einzelereignispegel, C-bewertet
<b>L<sub>E</sub></b>	Einzelereignispegel (Single Event Level)
<b>L<sub>eq</sub></b>	Äquivalenter Dauerschallpegel
<b>L<sub>WA</sub></b>	Schallleistungspegel, A-bewertet
<b>L<sub>pA,1m</sub></b>	Schalldruckpegel in 1 Meter Abstand, A-bewertet
<b>LUC</b>	Leicht-AUS gem. DurchführungsVO 2019/947 Anhang C
<b>MTOM</b>	Maximum Take-off Mass, maximale Startmasse
<b>N, N5</b>	Lautheit (loudness), N5: 5%-Perzentil, Lautheit, die in 5% der Zeit überschritten wird
<b>NAS</b>	National Airspace (USA)
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration (USA)
<b>RP</b>	Remote Pilot
<b>RPA</b>	Remote Pilot Authorization
<b>RPAS</b>	Remotely Piloted Aircraft System(s) (ferngeführtes Luftfahrzeug, die dazugehörige(n) Kontrollstation(en), die erforderlichen Steuerungs- und Kontrolllinks und ggf. weitere für die Musterbauart festgelegte Komponenten)
<b>PEO</b>	Population-Exposure-Outcome

<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>R, R5</b>	Rauheit (roughness), R5: 5%-Perzentil, Rauheit, die in 5% der Zeit überschritten wird
<b>S, S5</b>	Schärfe (sharpness), S5: 5%-Perzentil, Schärfe, die in 5% der Zeit überschritten wird
<b>SESAR JU</b>	Single European Sky ATM Research Joint Undertaking
<b>StVZO</b>	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
<b>sUAS</b>	Small Unmanned Aircraft System(s), (MTOM ≤ 25 kg)
<b>TA Lärm</b>	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
<b>T, T5</b>	Tonalität (tonality), T5: 5%-Perzentil, Tonalität, die in 5% der Zeit überschritten wird
<b>UA</b>	Unmanned Aircraft (Luftfahrzeug, das ohne einen an Bord befindlichen Piloten autonom oder ferngesteuert betrieben wird oder dafür konstruiert ist)
<b>UAM</b>	Urban Air Mobility
<b>UAS</b>	Unmanned Aircraft System(s) (unbemanntes Luftfahrzeug sowie die Ausrüstung für dessen Fernsteuerung)
<b>UAV</b>	Unmanned aircraft vehicle
<b>USA</b>	United States of America
<b>U-Space</b>	Europäisches Verkehrsmanagementsystem für die Integration von unbemannten Luftfahrzeugen in das System zur Luftraumnutzung
<b>UTM</b>	Unmanned Aircraft Traffic Management
<b>VFR</b>	Visual Flight Rules (Sichtflugregeln)
<b>VO</b>	Verordnung
<b>VLOS</b>	Visual Line of Sight
<b>VTOL</b>	Vertical Take-Off and Landing

## Zusammenfassung

Unbemannte Fluggeräte, sog. „Drohnen“, werden immer leistungsfähiger. Die zudem stetig zunehmenden Einsatzmöglichkeiten werfen daher die Frage nach den Geräuschauswirkungen des Betriebs dieser Geräte auf. Hierüber liegen derzeit weder national noch international fundierte Erkenntnisse vor.

Durch eine Literaturstudie sollte daher der aktuelle Wissensstand zu den folgenden Themenbereichen zusammenzutragen und Vorschläge für die Weiterentwicklung erarbeitet werden:

- ▶ Entwicklung des Drohnenmarktes
- ▶ Geräuschemissionen von Drohnen
- ▶ Lärmwirkung von Drohnen
- ▶ Geltende rechtliche Regelungen
- ▶ Auswirkungen auf Menschen und Umwelt

Ausgangspunkt für die Bearbeitung war eine systematische Literaturrecherche in mehreren wissenschaftlichen Datenbanken. Zum Themenbereich „Auswirkungen auf Mensch und Umwelt“ ergab die Literaturrecherche keine belastbaren Ergebnisse, zumal bei der Bewertung auch die geltenden rechtlichen Regelungen zu berücksichtigen sind. Es wurden daher im Rahmen des Forschungsprojektes eigene Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde im ersten Schritt nach einer geeigneten Berechnungsmethodik gesucht, mit der die durch den Drohnenbetrieb in der Nachbarschaft erzeugten Geräuschemissionen realitätsnah berechnet werden können. Im zweiten Schritt wurden exemplarisch Berechnungen für einige vorstellbare Anwendungsfälle durchgeführt. Die rechtlichen Regelungen wurden mit Stand 6-2021 analysiert und kommentiert.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden zunächst in eine Literaturdatenbank (Endnote X9) eingelesen. Im ersten Schritt wurden alle doppelten Einträge entfernt. Anschließend wurden mittels Titel/Abstract-Screenings nicht-relevante Dokumente von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Insgesamt führte die systematische Auswertung der wissenschaftlichen Datenbanken nur zu wenigen relevanten Artikeln oder Berichten. Aus diesem Grunde wurden zusätzlich auch „händische“ Recherchen durchgeführt und ggf. relevante Artikel und Berichte mit in die Auswertung aufgenommen. Insgesamt ergab sich in quantitativer Hinsicht das folgende Ergebnis:

**Tabelle 1 Quantitatives Ergebnis der Literaturrecherche, Anzahl „Treffer“ bei der Datenbanksuche und Anzahl relevanter Artikel oder Berichte je Themengebiet**

Themenbereich	Anzahl „Treffer“ (ohne Duplikate)	Anzahl relevanter Artikel oder Berichte (incl. Ergebnis händischer Suchergebnisse)
Drohnenmarkt	1084	34
Geräuschemessungen	4987	24
Psychoakustik	838	8

Zurückzuführen ist die geringe Quote an relevanten Artikeln oder Berichten vor allem darauf, dass sich die bei der Datenbanksuche erzielten Treffer vielfach auf die dem eigentlichen Thema des Artikels oder Berichts vorangestellten einleitenden Sätze beziehen. In diesen einleitenden Sätzen wird vielfach in allgemeiner Form ausgeführt, dass die Bedeutung von Drohnen zunehmen wird und mit einem Anstieg der Nutzung dieser Geräte zu rechnen ist bzw. Lärm ein gewichtiger Aspekt beim Betrieb von Drohnen ist und zu negativen Reaktionen bei betroffenen Personen führen kann. Nach diesen einleitenden Sätzen werden Einzelaspekte aus dem weiten Spektrum des Themas „Drohnen“ behandelt.

In fachlicher Hinsicht lassen sich die bisherigen Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

### **Entwicklung des Drohnenmarktes**

Die Auswertungen zeigen, dass die Schätzung der zukünftigen Anzahl an eingesetzten Drohnen großen Unsicherheiten unterworfen ist. So fehlte z. B. in Europa bislang eine Stelle zur Registrierung von Drohnen oder Nutzern von Drohnen. Eine Registrierung von Nutzern von Drohnen ist erst seit Inkrafttreten der EU Verordnung 2019/947 am 01.01.2021 vorgesehen. Demgegenüber ist eine derartige Registrierung in den USA bereits seit 2015 vorgeschrieben. Die aus den Jahresberichten der US-amerikanischen Luftaufsichtsbehörde FAA entnehmbaren Schätzungen deuten darauf hin, dass nicht sofort mit Einführung einer Registrierung eine geeignete Basis zur Erstellung valider Schätzung besteht. Vielmehr braucht es einige Zeit des Vorlaufs, bis valide Schätzungen erstellt werden können. Die von FAA veröffentlichten Daten zeigen darüber hinaus, dass Schätzungen, die vor der Einführung der Registrierung der Drohnen erstellt wurden, den Drohnenmarkt viel zu optimistisch einschätzten.

Hinsichtlich der Größe der eingesetzten Drohnen deuten die Auswertungen darauf hin, dass der Einsatz von Drohnen mit einer maximalen Startmasse von mehr als 25 kg auf absehbare Zeit (mindestens bis 2025) die Ausnahme bleiben wird. Diesbezüglich bestehen neben technischen auch rechtliche und zulassungstechnische Hürden.

Eine ganz wesentliche rechtliche Hürde, die allerdings für alle Arten von zivilen unbemannten Drohnen (UAS) gilt, besteht darin, dass ein Betrieb von Drohnen außerhalb des Sichtbereichs der die Drohne kontrollierenden Person (Beyond visual line of sight, sogenannter BVLOS-Betrieb) in der EU derzeit nur mit einer Einzel-Sondergenehmigung möglich ist. Das führt dazu, dass viele, derzeit bereits technisch mögliche Anwendungen nicht stattfinden.

Wann ein BVLOS-Regelbetrieb möglich sein wird, ist derzeit nicht abzusehen. Da ein BVLOS-Betrieb insbesondere im professionellen Bereich von Bedeutung ist, sind somit alle Schätzungen zum Umfang des Einsatzes von Drohnen im professionellen Bereich mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Unterstellt man, dass die Voraussetzungen für einen BVLOS-Regelbetrieb vorhanden sind, so lassen sich für den professionellen Bereich aus heutiger Sicht die folgenden Einsatzbereiche von Drohnen mit einer maximalen Startmasse bis ca. 25 kg erkennen:

- ▶ Inspektion von technischen Anlagen und landwirtschaftlichen Flächen
  - Linienförmige Anlagen (Strom-, Gasleitungen),
  - Flächenhafte Anlagen (ganze Werksgelände),
  - Landwirtschaftliche Flächen

- ▶ Flüge zur Erlangung von Geoinformationen (z. B. Baufortschritt auf Baustellen oder Erstellung von Thermobildern)
- ▶ Lieferung von kleineren (max. ca. 5 kg) Paketen
- ▶ Lichtshows

### **Geräuschemissionen**

In allen, als relevant eingestuften Untersuchungen, wurden Drohnen der Bauform „Multicopter“ untersucht. Insofern beziehen sich alle Angaben in dieser Studie zu Geräuschemissionen von Drohnen ausschließlich auf diese Bauform.

Eine große Vielfalt gab es hingegen in Bezug auf die Durchführung der Untersuchung selber. Unterschiede finden sich in Bezug auf die Messumgebung (im Freien, in speziellen Schallmessräumen, im Windkanal, in „normalen“ Räumen), die Anzahl und die Anordnung von Messmikrofonen, die ermittelte Messgröße (Schalldruck, Schallintensität), und die Anordnung des Messobjekts (schwebend, fixiert, in Bewegung).

Die sehr unterschiedliche Vorgehensweise bei der Ermittlung der Geräuschemissionen erschwert naturgemäß den Vergleich der in den einzelnen Untersuchungen dargestellten Ergebnisse. Hinzu kommt, dass die Messungen nicht immer so genau beschrieben wurden, dass eine Umrechnung auf einheitliche Geräuschparameter möglich wäre. Es konnten daher nicht alle prinzipiell relevanten Artikel für die Auswertung herangezogen werden. Für die Auswertung wurden daher nur Studien herangezogen, die

- ▶ das untersuchte Drohnenmodell mindestens durch Angabe der Masse genügend gut beschreiben,
- ▶ als Betriebszustand der Drohne "Schweben" und/oder "Vorwärtsflug" untersuchten und
- ▶ die Geometrie der Drohnen- und Mikrofonposition ausreichend genau beschreiben.

Aus den insgesamt 10 Studien, die die o.g. Bedingungen erfüllen, konnten für den Betriebsfall „Schweben“ für den Massebereich von ca. 0,5 bis ca. 5 kg sowie für den Betriebsfall „Vorwärtsflug“ für den Massebereich von ca. 0,5 bis ca. 20 kg Geräuschemissionswerte für Multicopter abgeleitet werden. Dabei zeigte sich nur eine geringe Abhängigkeit vom Betriebszustand. Typischerweise sind die Geräuschemissionen im Betriebszustand „Vorwärtsflug“ ca. 1-2 dB höher, als im Betriebszustand „Schweben“.

Die weiteren Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Bei Multicoptern ist in der Vertikalen von einer bedeutenden Winkelabhängigkeit der abgestrahlten Geräuschemissionen auszugehen. In der Horizontalen ist aus Symmetriegründen von einer gleichmäßigen Abstrahlung auszugehen.
- ▶ Es wurde ein Zusammenhang zwischen Betriebszustand und Rotordrehzahl beobachtet. Damit wäre es prinzipiell möglich, ein drehzahlabhängiges Emissionsmodell zu entwickeln. (Bei Multicoptern ergibt sich diesbezüglich allerdings die Problematik, dass die einzelnen Propeller im Betrieb i.d.R. unterschiedliche Drehzahlen aufweisen.)

## **Psychoakustische Untersuchungen**

Das systematische Review zeigt, dass bislang (Stand: Datenbanken ca. Anfang September 2020; Handsuche ca. Ende November 2020) nur wenige Laborstudien mit psychoakustischen Untersuchungen zu Drohnenlärm durchgeführt wurden. In allen Fällen handelt es sich um Laborstudien, in welchen die akute Lärmwirkung eines Drohnenbetriebs mit Hilfe akustischer oder visuell-akustischer Stimuli untersucht wurde. Feldstudien gibt es noch nicht. Die bislang vorliegenden Studien liefern jedoch ein recht einheitliches Bild und reihen sich gut in die allgemeine Literatur zu Umweltlärmwirkungen ein.

Bislang wurde hauptsächlich die Wirkung von Multicoptern (insb. Quadcopter) bei gradlinigem Vorbeiflug oder im Schweben untersucht. Hinsichtlich der Auswertung lag ein deutlicher Fokus auf der Wirkungsdimension Lästigkeit. Daneben wurden auch die subjektiv empfundenen Aspekte wie Lautheit, Annehmlichkeit, Sprachverständnis, sowie die Präferenz verschiedener Schallquellen untersucht.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Die Lästigkeit von Drohnenlärm hängt stark vom erzeugten Schalldruckpegel ab. Diesbezüglich bilden Drohnen keine Ausnahme zu anderen Verkehrslärmarten.
- ▶ Drohnen unterscheiden sich aber in ihren akustischen und psychoakustischen Charakteristiken stark von anderen (Verkehrs-)Lärmquellen. So weisen die Geräusche von Drohnen i.d.R. eine deutlich ausgeprägte Tonhaltigkeit auf. Hinzu kommen breitbandige, hochfrequente Geräusche.
- ▶ Drohnen wirken im Mittel deutlich lästiger als Kraftfahrzeuge. Der quellspezifische Lästigkeitsunterschied kann als psychoakustische Pegeldifferenz quantifiziert werden. Die psychoakustische Pegeldifferenz gibt an, um wieviel der A-bewertete Schalldruckpegel einer Vergleichsquelle lauter (oder leiser) sein müsste, um den gleichen Lästigkeitseffekt wie die untersuchte Geräuschquelle zu erzielen. Basierend auf den heute greifbaren Studien lassen sie sich solche Korrekturterme noch nicht zuverlässig quantifizieren. Aus den vorliegenden Studien lässt sich zwar eine psychoakustische Pegeldifferenz von rund 5 dB herauslesen. Da diese Aussage aber nur auf der Auswertung einer sehr geringen Anzahl an Studien beruht, ist es zu früh, die o.g. Differenz als gesichert anzusehen.
- ▶ Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere tonale Komponenten sowie hochfrequente breitbandige Geräusche (Schärfe) zur Lästigkeit beitragen. Um die Lästigkeit von Drohnen zu verringern, sollten somit insbesondere diese Geräuschcharakteristiken vermindert werden.
- ▶ Eine im Vergleich zu anderen Verkehrsarten langsame Fluggeschwindigkeit scheint die Lästigkeit zu verstärken.

Einschränkend ist zu sagen, dass die vorstehend genannten Ergebnisse ausschließlich aus Laborstudien entstammen, mit einer (für Laborstudien üblichen) begrenzten Anzahl (25–50) von Versuchspersonen. In wie weit diese Ergebnisse auf die Langzeit-Lärmbelastigung im Feld und auf die Gesamtbevölkerung übertragbar sind (ökologische Validität), kann zurzeit nicht beantwortet werden. Auch stellt sich die Frage, inwieweit die Resultate zum Flugzustand „Schweben“ auf andere Flugzustände (insb. Über- und Vorbeiflüge) übertragbar sind.

Zur Akzeptanz von Drohnen in der Öffentlichkeit ist bereits eine Reihe von Studien verfügbar. Ein abschließender Überblick kann hier jedoch nicht gegeben werden; dies wäre Gegenstand eines separaten systematischen Reviews.

Generell scheint heute eine eher neutrale bis sogar eher positive öffentliche Einstellung bzw. Akzeptanz zu Drohnen zu bestehen, wobei die Öffentlichkeit ihre Meinungsbildung wahrscheinlich noch nicht abgeschlossen hat. Bezüglich Akzeptanz zeigt sich jedoch eine deutliche Abhängigkeit vom Einsatzzweck der Drohnen. Einsätze für Forschung, Rettung und Zivilschutz/öffentliche Sicherheit genießen eine deutlich höhere Akzeptanz als die Verwendung von Drohnen zu hobbymäßigen oder zu kommerziellen Zwecken wie für Foto/Videoaufnahmen oder Paketlieferungen.

### **Rechtlicher Rahmen**

Der rechtliche Rahmen wird zum einen durch Vorgaben der EU und zum anderen durch nationale Regelungen bestimmt. Dabei wird der rechtliche Rahmen für die Zulassung der Geräte und die Luftraumnutzung durch diese Geräte durch Vorgaben der EU geregelt. In Bezug auf den Themenkomplex „Lärm“ ist insbesondere die Delegierte Verordnung 2019/945<sup>1</sup> zu nennen, in dessen Anhang in Teil 15 Anforderungen an höchstzulässige Schallleistungspegel für Drohnen mit einer maximalen Startmasse von 0,25 bis 4 kg definiert sind, die keine Starrflügler sind. Drohnen mit einer maximalen Startmasse von 4 bis 25 kg müssen zwar den Schalleistungspegel angeben, doch wurde kein Grenzwert festgelegt. Gestaltungsspielräume der Mitgliedstaaten bestehen nach den Vorgaben der EU-Verordnungen insbesondere bei der Bestimmung der Bereiche, in denen Drohnen zum Einsatz kommen sollen. Daneben können die Mitgliedsstaaten Regelungen z. B. zum Schutz vor Lärm erlassen.

So wie die Entwicklung der Drohnen noch lange nicht abgeschlossen ist, ist auch der Rechtsrahmen nicht fertig. Es bedarf der Fortentwicklung, Anpassung und Erprobung, um angemessene Vorgaben für ein Produkt zu schaffen, das den Luftverkehr grundlegend umgestalten könnte.

Aktuell dreht sich die regulatorische Debatte zur Weiterentwicklung des rechtlichen Rahmens primär um die Sicherheit des Luftverkehrs. Umwelt- und Lärmschutz spielen derzeit zwar kaum eine Rolle. Doch ist zu erwarten, dass sich dies mit Zunahme des Betriebs von Drohnen ändert.

Die maßgeblichen Vorgaben in Bezug auf die Konstruktion, aber auch hinsichtlich des Betriebs und der Betriebsbedingungen der Drohnen werden dabei wie bislang von der Europäischen Union kommen und über die EASA vorbereitet und abgestimmt werden. Den Mitgliedsstaaten obliegt es, dafür Sorge zu tragen, dass

- ▶ im Rahmen der zulassungspflichtigen Nutzung Umwelt- und Lärmschutz vor Ort beachtet werden und
- ▶ vorzugeben, wie und wo ihr Luftraum von Drohnen genutzt werden kann.

Mit der Novellierung der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) vom Juni 2021<sup>2</sup> erfolgte bereits eine Anpassung an die unionsrechtlichen Vorgaben. Insbesondere aber wurde die bestehende Verbot-Ausnahme-Systematik überarbeitet und an die Möglichkeit, geographische Gebiete für den Betrieb von Drohnen auszuweisen, angepasst. Von besonderer Bedeutung ist dabei der neu eingeführte § 21h Abs. 1 LuftVO. Eingeschränkt ist der Betrieb in der Nähe von Flugplätzen und Flughäfen, Industrieanlagen, Justizvollzugsanstalten, Grundstücken der Verfassungsorgane oder

---

<sup>1</sup> Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12.03.2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme, ABl. L 152/1 vom 11.06.2019.

<sup>2</sup> Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1766) geändert worden ist

oberen Bundes- und Landesbehörden oder über und innerhalb eines seitlichen Abstandes von 100 Metern von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen, Freibädern, Badestränden, Krankenhäusern ebenso wie Unfall- und Einsatzorten etc.

Während bei den vorstehenden Beispielen die Lärmauswirkungen (mit Ausnahme der Krankenhäuser) weniger im Mittelpunkt stehen als die Sicherheitserwägungen, werden Lärmbelange u.a. bei Flügen mit Bezug zu den durch das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)<sup>3</sup> besonders geschützten Gebieten und über Wohngrundstücken besonders berücksichtigt.

Für den Betrieb *über Wohngrundstücken* (nicht über Wohngebieten in Gänze) sieht die LuftVO nunmehr zudem u.a. ausdrücklich vor, dass nicht zu erwarten sein darf, dass durch den Betrieb die Immissionsrichtwerte nach Nummer 6.1 der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm)<sup>4</sup> überschritten werden. Eine genauere Konkretisierung findet sich nicht. So bleibt insbesondere unklar, wie mit Geräuscheinwirkungen durch mehreren Drohnenflüge während eines Tages sowie mit der Vorbelastung durch andere Geräuschquellen, die unter den Geltungsbereich der TA Lärm fallen, umzugehen ist. Geht man vom Bewertungsgrundsatz der TA Lärm aus, demzufolge die Immissionsrichtwerte für die Summe aller Geräuschimmissionen gelten, die unter den Geltungsbereich der TA Lärm fallen, so wären zumindest die Geräusche aller Drohnenflüge, die auf einen Immissionsort einwirken, zusammen zu bewerten. So lange alle Drohnenflüge durch den gleichen Betreiber erfolgen, wäre dies eventuell noch leistbar. Finden jedoch Drohnenflüge verschiedener Betreiber statt, so wäre eine auch lärmtechnische Koordination notwendig.

Dass die in mit der novellierten LuftVO erlassenen Vorgaben u.U. der Überarbeitung bedürfen, scheint auch dem Gesetzgeber bewusst zu sein. So sollen gem. § 21h Abs. 5 die naturschutz- und wohngebietsbezogenen Vorgaben „insbesondere mit Blick auf den Lärmschutz“ über einen Zeitraum von zwei Jahren evaluiert werden.

Unabhängig davon kann die Luftfahrtbehörde eines Landes in begründeten Fällen auch Ausnahmen von den in §21h Absatz 3 und 4 genannten Gebieten zulassen. Dies setzt neben einer Sicherheitsbewertung auch voraus, dass der Schutz vor Fluglärm angemessen berücksichtigt wird. Die zuständige Luftfahrtbehörde des Landes kann daher auch vor Erteilung der Ausnahmegenehmigung eine fachspezifische Bewertung oder ein Gutachten, insbesondere zum Natur- und Lärmschutz einfordern.

### **Auswirkungen auf Mensch und Umwelt**

Um die Auswirkungen eines Drohnenbetriebs auf Mensch und Umwelt darzustellen, wurde geprüft, inwieweit die DIN ISO 9613-2 sowie die DIN 45684-1 so auf den Flugbetrieb von Drohnen anwendbar sind, dass realitätsnahe Ergebnisse zu erwarten sind.

Die DIN 45684-1 enthält eine speziell auf den (derzeitigen) Flugbetrieb an Landeplätzen angepasste Berechnungsmethode. Die DIN ISO 9613-2 enthält eine universell anwendbare Berechnungsmethodik, die in Deutschland insbesondere im Anwendungsfall der TA Lärm verwendet wird.

Grundsätzlich lassen sich mit beiden Berechnungsmethoden plausible Ergebnisse erzielen, doch ergeben sich auch in beiden Fälle Limitationen, die einer universellen Anwendbarkeit der einen

---

<sup>3</sup> Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist

<sup>4</sup> TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 28. August 1998 (GMBl Nr. 26/1998 S. 503) zuletzt geändert durch Bekanntmachung des BMU vom 1. Juni 2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5) in Kraft getreten am 9. Juni 2017

oder der anderen Berechnungsmethode entgegenstehen. So ist im Berechnungsverfahren der DIN 45684-1 die Berücksichtigung von Reflexionen sowie einer vertikale Richtcharakteristik nicht vorgesehen, was insbesondere im Nahbereich von Gebäuden zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Geräuschimmissionen führen kann. Dafür können spezielle flugbetriebliche Aspekte wie Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie statistische Abweichungen von einer vorgegebenen Flugroute in einfacher Weise berücksichtigt werden. Insbesondere aufgrund der Vernachlässigung von Reflexionen ist das Berechnungsverfahren so schnell, so dass auch größere Gebietsumgriffe in angemessener Zeit berechnet werden können. In DIN ISO 9613-2 ist die Berücksichtigung von Reflexionen nach dem Prinzip der Spiegelquellen explizit vorgesehen. Werden Reflexionen berücksichtigt, so kann dies dazu führen, dass sich die Rechenzeit so stark verlängert, dass die Berechnung größerer Umgriffe nur eingeschränkt möglich ist. Grundsätzlich besteht aber die Möglichkeit, die beiden Berechnungsverfahren zu kombinieren, und so die Limitationen zu umgehen. So könnte z. B. für den Streckenflug oberhalb von Gebäuden oder über freiem Gelände die DIN 45684-1 verwendet werden, während für diejenigen Abschnitte der Flugroute, die z. B. zwischen Gebäuden verlaufen, die DIN ISO 9613-2 verwendet wird. Anschließend würden die Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden energetisch addiert. Langfristig erscheint es jedoch sinnvoll, ein speziell auf den Anwendungsfall angepasstes Berechnungsverfahren zu entwickeln. Diesbezüglich wird angeregt, das Verfahren so zu gestalten, dass die Möglichkeit besteht, eine Lärmoptimierung bereits in der Planungsphase einer Flugroute vorzunehmen. Zur Optimierung der Rechenzeit erscheint die Definition eines Verfahrens mit unterschiedlichen Genauigkeitsklassen sinnvoll.

Wie in Zusammenhang mit dem rechtlichen Rahmen ausgeführt, ist vorgesehen, die Zulässigkeit eines Drohnenbetriebs über Wohngrundstücken u.a. davon abhängig zu machen, dass die Immissionsrichtwerte nach Nr. 6.1 der TA Lärm nicht überschritten werden. Um diesbezüglich zu einer Einschätzung zu kommen, inwieweit diese Anforderung bei Betrieb mit den heute vorhandenen Drohnenmodellen realistisch ist, wurden für einige denkbare Betriebsfälle Musterberechnungen durchgeführt.

Einschränkend muss allerdings gesagt werden, dass aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei der Angabe von Geräuschemissionen für Drohnen einer bestimmten Größe sowie den Unsicherheiten bei der Berechnungsmethodik gesicherte quantitative Aussagen derzeit nur eingeschränkt möglich sind. Insofern verstehen sich die nachstehenden Aussagen als erste grobe Einschätzung der Situation.

Unterstellt man die Lärmschutzanforderungen eines allgemeinen Wohngebiets, so zeigen die Berechnungsergebnisse, dass bei Überflügen von Wohngrundstücken mit der gem. LuftVO minimal vorgeschriebenen Höhe von 100 m über Boden eine Überschreitung des Immissionsrichtwertes für die Tageszeit nur dann zu erwarten ist, wenn sehr viele (>100) Überflüge stattfinden. (Zur Nachtzeit ist ein Betrieb von Drohnen über Wohngrundstücken gem. LuftVO nicht zulässig).

Auch die Geoerkundung einer Fläche dürfte, sofern ein gewisser Mindestabstand zur Wohnbebauung eingehalten wird und die Erkundung nur während eines kleineren Teils der Tageszeit stattfindet, in Bezug auf die Einhaltung der Immissionsrichtwerte tendenziell eher unkritisch sein.

Findet hingegen ein Drohnenbetrieb in geringer Entfernung zu einer wohnmäßigen Nutzung statt, wie dies beispielsweise im Falle einer Warenauslieferung vorkommen könnte, so hängt die Einhaltung des Immissionsrichtwertes stark von den jeweiligen Randbedingungen und der Häufigkeit der Warenausliefernorgängen ab.

Über Naturschutzgebieten im Sinne des § 23 Absatz 1 des Bundesnaturschutzgesetzes und vergleichbaren Gebieten ist gem. LuftVO eine Mindestüberflughöhe von 100 m einzuhalten. Es ist

nicht zu erwarten, dass die Geräusche eines vereinzelt Betriebs in dieser Höhe zu einer wesentlichen Störung der dort lebenden Population (insbes. Vögel) führt. Im Vergleich zur derzeit geübten Praxis, ggf. notwendige Inspektionsflüge mit Hubschraubern durchzuführen, würde die Verwendung von Drohnen sogar zu einer Entlastung führen, da die Drohnen wesentlich leiser sind.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Arbeiten Recherchen zu Umfang und Art von Beschwerden über Drohnen bei den hierfür zuständigen Landesbehörden durchgeführt. Derzeit liegen die Ergebnisse von 13 Bundesländern vor. Demzufolge sind den Landesbehörden bislang so gut wie keine Beschwerden über Drohnen bekannt.

Wie zuvor ausgeführt, weisen alle bislang untersuchten Drohnengeräusche eine ausgeprägte Tonhaltigkeit auf. Damit ist der Betrieb von Drohnen leicht aus den sonstigen Geräuschen heraushörbar und damit lästiger als andere Verkehrsgeräusche.

Zur Verminderung der Lästigkeit von Drohnengeräuschen ist es daher wesentlich, die Tonhaltigkeit der Geräusche zu vermindern. Des Weiteren sollte die Tonhaltigkeit einer Drohne bei der Festsetzung von schalltechnischen Anforderungen berücksichtigt werden. Damit gäbe es auch einen Anreiz zur Entwicklung von Geräten mit einer geringeren Tonhaltigkeit und somit Lästigkeitswirkung.

## Summary

Unmanned Aerial Vehicles (UAV)<sup>5</sup>, commonly referred to as "drones", are becoming more and more powerful, which will lead to an increasing number of applications. With regard to the noise effects of the operation of these devices, there are currently no well-founded findings.

A literature study should therefore be done to compile the current state of knowledge on the following topics. Furthermore, proposals for further development should be presented.

- ▶ Development of the Drone Market
- ▶ Noise Measurements
- ▶ Noise effects of drones
- ▶ Legal Framework
- ▶ Impact on humans and environment

The starting point of the process was a systematic literature search in several scientific databases. Originally, the impact of noise emissions of drone operations on the population and environment was to be determined through a literature search as well. But this topic is strongly influenced by the legal requirements. In addition, relevant articles could not be found. Therefore own investigations were carried out as part of the research project. In a first step, a suitable calculation methodology was sought for to realistically calculate the noise exposure generated by drone operations in the neighborhood. In the second step, exemplary calculations were carried out for some conceivable applications.

The existing EU legal requirements as well as German national legal requirements were analyzed and commented on as of 8-2021. -

Overall, the systematic evaluation of the scientific databases resulted in only a few relevant articles or reports. For this reason, a "manual" research was carried out and relevant articles and reports were included in the evaluation as well.

The reason for the finally resulting small number of relevant articles or reports found in the scientific databases is that the keywords were only mentioned in the introduction but not in the main article.

The results of the project can be summarized as follows:

### **Development of the Drone Market**

The main result of the literature search evaluation show that an estimation of the number of operated drones in the future is subject to great uncertainties. In Europe, user registration of drones was implemented just at the beginning of 2021. Before that, no registration was possible. In comparison, in the US a registration has been mandatory since 2015. The published evaluations in the annual reports of the FAA (Federal Aviation Administration) indicate that the database was not sufficient in the beginning to elaborate a valid estimate of the drone market development. Some time is required for the production of a valid estimation. The data showed as well that all evaluations prior to the mandatory registration were far too optimistic in their assessment of the drone market development.

---

<sup>5</sup> Also common: UAS (Unmanned Aerial Systems)

In terms of drone size and weight the results imply that only drones up to a take-off mass of 25 kg are going to be used. Heavier drones will be the exception, at least until 2025. The reasons are of technical and legal nature as well as difficulties in the permission process.

A very important legal obstacle in the EU at the moment is that an operation of civil drones beyond visual line of sight (so called BVLOS-Operation) is only possible with an individual special permit. That is why many technically possible operations are not taking place. To date it is not foreseeable when BVLOS-Operations without special permission will be possible.

Assuming that the prerequisites of a regular BVLOS-Operation exist, there are several different professional operations with drones up to a take-off mass of 25 kg identifiable from today's perspective:

- ▶ Inspection of technical installations and agricultural land
- ▶ Flights to obtain geographic information (e.g. construction progress on construction sites or creation of thermal images)
- ▶ Delivery of smaller (up to approx. 5 kg) packages
- ▶ Light Shows

### **Noise Emissions**

The vast majority of the investigations documented in the literature refers to the drone type multicopter. Consequently, all discussed aspects in this report regarding the measurement of noise emissions refer exclusively to drones of multicopter design.

In contrast to the fact that with multicopters only just one drone type was considered, the methods of conducting measurements of noise emission varied greatly. The different methods and the varying accuracy of descriptions of these methods made it quite difficult to compare them. Not all studies allowed to derive a unified indicator to describe the emission strength. In the evaluation, only studies were considered which fulfilled the following criteria:

- ▶ the mass of the analyzed drone is specified,
- ▶ the maneuvers "hover" and/or "straight flyover" were studied with different payloads, and
- ▶ the description of the test setup in its dimensions and positions of the microphones and the drone itself had to be sufficiently accurate.

Based on 10 studies which fulfilled the criteria stated above, noise emission indicators could be derived. Noise emissions could be determined for the maneuver „hover“ for drones with a mass between 0,5 to 5 kg, and for the maneuver „straight flyover“ for drones with a mass between 0,5 to 20 kg. Only a small dependency on the operation condition was observed. Typically, the maneuver „forward flight“ is 1–2 dB louder than the maneuver „hover“. Further results can be summarized as follows:

- ▶ In the vertical plane, a significant angle dependency of the radiated noise can be detected. In the horizontal plane, noise emission can be expected as independent of the radiation angle due to symmetry reasons.
- ▶ A correlation between the rotational speed of the rotors and the emission strength was observed. It may be advantageous to derive an rpm dependent emission model.

### **Psychoacoustic Noise Analysis**

To date, only a few laboratory experiments on the acute, short-term effects of acoustic or visual-acoustic drone stimuli on humans were carried out, and no field studies on long-term effects of drones are available. With one exception on a fixed-wing propeller aircraft, all studies assess the noise effects of multicopters (mainly quadcopters). However, the available studies provide a fairly uniform picture and fit well into the general literature on environmental noise effects.

The results can be summarized as follows:

- ▶ The annoyance to drone noise strongly depends on the generated sound pressure level. In this respect, drones are not different from other types of traffic noise.
- ▶ Conversely, drone noise is very different to other types of traffic noise regarding its acoustic and psychoacoustic properties. Drone noise exhibits a significant tonality as well as a broadband noise in higher frequencies.
- ▶ On average, drones are much more annoying than motor vehicles. The source-specific difference in annoyance can be quantified as a psychoacoustic level difference. Based on the current literature, such correction terms cannot be reliably quantified yet. From the available studies, a psychoacoustic level difference of around 5 dB may be deduced, but since this result is based on a very small number of studies, this difference cannot be regarded as certain.
- ▶ Research shows that tonality in particular as well as a broadband noise in the higher frequency range contribute to annoyance.
- ▶ The lower airspeed compared to other types of traffic seems to increase annoyance

In general, there seems to be a rather neutral to even rather positive public attitude or acceptance of drones today, although the public has probably not yet finished forming its opinion. Acceptance, however, clearly depends on the purpose of the drones.

### **Legal Framework**

The legal framework is based on EU requirements and national regulations. Here the device permission process and the use of airspace is regulated by EU requirements. In particular the Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 (EU 2019/945) defines requirements for maximum permissible sound power levels for drones with a maximum take-off mass of 0,25 to 4 kg which are not for fixed-wing aircrafts. Member States can specify how and where their airspace can be used by drones (e. g. by defining geo-fences). In addition, the member states can adopt regulations to protect against noise exposure in the neighbourhood of drone traffic.

The legal framework is continuously developing but by now the discussion revolves mainly around air traffic safety. However it is to be expected that this will change with the growing use of drones.

With the amendment of the Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO 2021) of June 2021, an adaptation to the requirements of EU law has already taken place. In particular, however, the existing prohibition-exception system was revised and adapted to the possibility of defining geographical areas for the operation of drones. As a result, the possibilities of operation is restricted in the vicinity of many areas (e. B. airfields and airports, industrial plants, prisons, federal waterways and railway facilities, outdoor swimming pools etc.). Operation above residential areas may not exceed the requirements of the of the German national technical instructions for noise protection

(TA Lärm 2017), but the regulations are still very vague. In particular, it remains unclear how to deal with noise effects from drone flights by independent operators as well as with the pre-exposure by other noise sources.

Just as the development of drones is far from complete, the legal framework also requires further development, adaptation and testing in order to create appropriate specifications for the operation of drones.

### **Impact on humans and environment**

To illustrate the impact of a drone operation on humans and environment, calculations according to DIN ISO 9613-2 (edition 10-1999) and DIN 45684-1 (edition 07-2013) were tested.

In principle, plausible results can be obtained with both calculation methods. However, both methods have their own limitations. Neither method is suitable for universal use. According to DIN 45684-1, reflections on buildings or any other reflecting surface are not taken into account. These restrictions could lead to an underestimation of the actual noise exposure. But DIN 45684 allows considering aspects of special flight operations, such as acceleration, deceleration and deviation from the predefined airway. Due to the neglect of reflections, the calculation method is so fast that even larger areas can be calculated in a reasonable time.

DIN ISO 9613-2 contains a universally applicable calculation method, which is used in Germany, especially in the application of TA-Lärm. While all aspects of relevance can be taken into account, a special adaptation to flight operations is missing.

There might be the possibility to combine both methods and to use DIN 45684-1 for drone operations in greater altitudes above buildings and DIN ISO 9613-2 for operations near the ground between buildings. However, on a long-term basis developing a calculation method specifically adapted to drone operations would be desirable.

As stated in relation to the legal framework, the permissibility of drone operations over residential properties will depend, among other things, on the noise exposure limits of the TA-Lärm. To determine if this requirement is realistic in terms of operations with today's drone models, calculations for some conceivable operating cases were performed.

However, it must be said that due to the current uncertainties in the specification of noise emissions for drones of a certain size, as well as the uncertainties in the calculation method, reliable quantitative statements are currently only possible to a very limited extent. In this respect, the following statements are to be understood as an initial rough assessment of the situation.

According to the TA-Lärm, the calculation results show that, for overflights of residential properties at a height of 100 m above ground, the noise emission limits will only be exceeded if a large number (> 100) of overflights take place. In general, if a certain minimum distance to residential properties is provided, drone operations tend to be rather uncritical. On the other hand, if drone operations take place in a short distance to a residential property, it depends on the frequency of drone operations if the noise exposure limits will be exceeded.

As explained above, all drone sounds studied so far have a pronounced tonality. This makes the operation of drones easily audible and therefore more annoying than other sounds.

In order to reduce the annoyance of drone noise, it is therefore essential to reduce the tonality of the sounds. Furthermore, the tonality of a drone should be taken into account when determining acoustic requirements. This would provide an incentive to develop drones with a less tonal sound and therefore less annoying.

# 1 Begriffsbestimmung

## 1.1 Der Begriff „Drohne“

Unter dem Begriff „Drohne“ sollen im Rahmen dieses Berichtes unbemannte Luftfahrzeugsysteme im Sinne von § 1 des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG)<sup>6</sup> und Abschnitt 5a der Luftverkehrsverordnung (LuftVO)<sup>7</sup> verstanden werden.

Insbesondere in der englischsprachigen Literatur werden für unbemannte Luftfahrzeuge neben der englischen Übersetzung (drone) nahezu synonym die folgenden Begrifflichkeiten verwendet:

UA: Unmanned aircraft

UAS: unmanned aircraft system

UAV: unmanned aircraft vehicle

RPAS: remotely piloted aircraft system

Aufgrund der unscharfen Begriffsbestimmung des Begriffs „Drohne“ erscheint uns der Begriff „UAS“ am sinnvollsten, da er die gesamte Bandbreite unbemannter Luftfahrzeuge abdeckt. Dieser Begriff wird im Rahmen dieses Berichtes synonym mit dem Begriff „Drohne“ verwendet.

Anmerkung:

*Prinzipiell würden unter die obigen Beschreibungen auch ferngesteuerte Modellflugzeuge und Modellhubschrauber fallen. Diese Gruppe von Luftfahrzeugen wird im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht behandelt.*

## 1.2 Einteilung von Drohnen

Drohnen oder UAS existieren in verschiedenen Bauformen. Aus technischer Sicht wesentlich für die Flugeigenschaften ist die Anordnung von Tragflächen und/oder die Anordnung der Antriebe. Nach Dieckert und Eich 2018 können diesbezüglich folgende Unterscheidungen getroffen werden:

- ▶ Fixed Wings
- ▶ Multicopter
- ▶ Rotary Wings (Helicopter)
- ▶ Tilt Rotor / Tilt Wings
- ▶ Blimp (Luftschiff)

Die rasante Entwicklung unbemannter Luftfahrzeuge in den letzten Jahren ist vor allem auf die Bauform „Multicopter“ zurückzuführen. Multicopter weisen mehrere (i.d.R. mindestens 4) horizontal ausgerichtete Propeller aus, die für die einzelnen Betriebszustände mit verschiedenen Drehrichtungen und mit i.d.R. unterschiedlicher Drehzahl angesteuert werden. Diese Geräte sind mittlerweile einfach zu steuern und in der Lage, fix an einem Punkt in der Luft zu stehen. Sie

<sup>6</sup> Luftverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 698), das zuletzt durch Artikel 340 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

<sup>7</sup> Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 9. März 2021 (BGBl. I S. 338) geändert worden ist

sind aber darauf angewiesen, den benötigten Auftrieb permanent und ausschließlich durch die rotierenden Propeller zu erzeugen. Dadurch sind sie im Vergleich zu Luftfahrzeugen mit Flügeln in der Fortbewegung langsamer. Darüber hinaus benötigen sie in der Fortbewegung mehr Energie, da der Auftrieb komplett durch die sich drehenden Rotoren erzeugt werden muss. Aus diesem Grunde haben UAS mit Flügeln (Fixed Wing) grundsätzlich Vorteile, wenn es gilt, größere Strecken zurückzulegen. Flugobjekte mit starren Flügeln verfügen aber i.d.R. nicht über Senkrechtstart- oder Senkrechtlandeeigenschaften (Vertical Take-Off and Landing, VTOL). Für den Betrieb benötigen sie eine Start-Landebahn oder spezielle Abschuss- und Auffangeinrichtungen.

In jüngster Zeit wurden auf dem Markt für zivile Drohnen Geräte vorgestellt, die versuchen, die Vorteile beider Bauformen miteinander zu kombinieren. Allen gemeinsam ist, dass sie mit Flügeln ausgestattet sind, gleichzeitig aber auch über VTOL-Eigenschaften verfügen. Hierzu wird entweder die Ausrichtung der Flügel geschwenkt (Tilt Wings) oder die Propeller schwenkbar ausgeführt (Tilt-Rotor<sup>8</sup>) oder verschieden ausgerichtete Propeller montiert. (Für Beispielansichten dieser Bauformen siehe Abbildung 1). Für diese Geräte sind in der Literatur bislang nahezu keine Informationen zu finden. Informationen zu den Eigenschaften dieser Geräte finden sich ausschließlich über händische Suchen. Diese Gerätegruppe kann daher im Rahmen dieses Berichtes nur am Rande betrachtet werden. Die allermeisten, in diesem Bericht angegebenen Ergebnisse beziehen sich daher auf die Bauform „Multicopter“.

Unbemannte Luftfahrzeuge werden auch im militärischen Bereich eingesetzt, sind jedoch nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Ebenfalls nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind Blimps (Luftschiffe).

Die amerikanischen Luftaufsichtsbehörde FAA (Federal Aviation Administration) unterscheidet die Menge aller unbemannten Luftfahrzeuge grob in zwei Kategorien (vgl. z. B. FAA 2019):

sUAS: small unmanned aircraft system (maximale Abflugmasse  $\leq 25$  kg)

Unter diese Gruppe fallen die meisten der in den letzten 10 Jahren entwickelten Geräte. Sie werden zumeist elektrisch angetrieben. Für diese Gruppe unbemannter Luftfahrzeuge existieren für den Einsatz in der Europäischen Union (EU) sowie in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) spezielle Vorgaben, die von den Luftfahrzeugen erfüllt werden müssen. Hierzu zählen für den Bereich der EU unter anderem Vorgaben hinsichtlich der maximal zulässigen Geräuschentwicklung.

IUAS: large unmanned aircraft system (maximale Abflugmasse  $> 25$  kg)

Unter diese Gruppe fallen derzeit vor allem militärische Luftfahrzeuge. Daneben fallen in diese Gruppe auch die sich derzeit in Entwicklung befindlichen unbemannten Luftfahrzeuge für den Personentransport. Einheitliche Vorgaben, die von den zivilen Luftfahrzeugen dieser Gruppe erfüllt werden müssen, existieren bislang nur in Ansätzen.

Da die Unterscheidung auch in Europa mit Hinblick auf die EU-Verordnungen 2019/945<sup>9</sup> und 2019/947<sup>10</sup> von entscheidender Bedeutung ist, wird auch im Rahmen dieses Projektes im ersten

<sup>8</sup> Insbesondere in Firmen- und Imagedarstellungen wird für diese Bauform der auch die wenig spezifische Bezeichnung „eVTOL“ verwendet.

<sup>9</sup> Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter (ABl. L 152 vom 11.6.2019, S. 1), geändert durch die delegierte Verordnung (EU) 2020/1058 der Kommission vom 27. April 2020 (ABl. L 232 vom 20.7.2020, S.1)

<sup>10</sup> Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (ABl. L 152/45 vom 11.6.2019)

Schritt nach sUAS und IUAS unterschieden. Im zweiten Schritt erfolgt eine Unterscheidung innerhalb der beiden Gruppen nach Anwendungsbereichen.

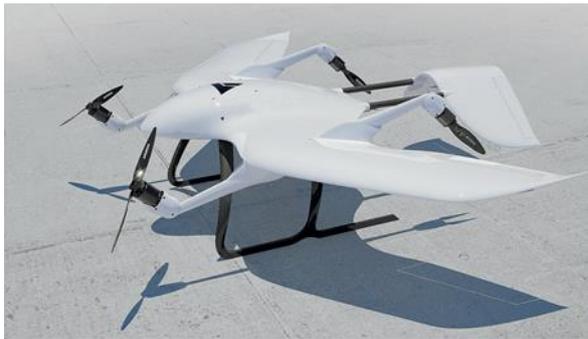
**Abbildung 1 Beispiele für Drohnen verschiedener Bauformen**



Multicopter



Fixed Wing mit verschieden  
ausgerichteten Propellern



Tilt-Rotor



Tilt-Wing

Quellen: eigene Bearbeitung unter Verwendung von Material von unsplash.de (links oben) sowie Herstellern (rechts oben: wing, links unten: wingcopter GmbH, rechts unten: Airclip Service GmbH & Co. KG)

Wie später noch genauer gezeigt, ist der Markt für zivile Drohnen mit einer maximalen Abflugmasse von mehr als 25 kg derzeit sehr klein, so dass sich für die Gruppe der IUAS derzeit kaum belastbare Angaben finden. Aus diesem Grunde konzentriert sich die vorliegende Studie auf Aussagen auf die Gruppe der sUAS, d.h. auf zivile Drohnen mit einer maximalen Abflugmasse bis 25 kg.

## 2 Entwicklung des Drohnenmarktes und Beschwerdefälle

### 2.1 Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. -ausschluss

Gemäß Aufgabenstellung des Umweltbundesamtes sollte zur Beantwortung der Fragestellung eine Literaturrecherche durchgeführt werden, die auf der systematischen Auswertung von Artikeln und Berichten beruht, die in den einschlägigen wissenschaftlichen Datenbanken gelistet sind.

Des Weiteren sollte national nach Beschwerdefällen recherchiert und die Beschwerdethemen nach Inhalt kategorisiert werden.

Neben der Entwicklung des Drohnenmarktes umfasste die Aufgabenstellung auch die aus dem Drohnenbetrieb resultierenden Lärmauswirkungen auf Mensch und Umwelt. Hierzu ließen sich jedoch keine validen Ergebnisse finden. Hinzu kommt, dass die Bewertung von Geräuschmissionen stark vom jeweils geltenden rechtlichen Rahmen abhängig ist. Zum Themengebiet „Lärmauswirkungen“ wurden daher im Rahmen des Projektes eine eigene Untersuchung durchgeführt. Weitere Erläuterungen und die diesbezüglichen Ergebnisse finden sich in Kap. 6.

### 2.2 Formalismus der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wurde gemäß PRISMA-Methodik (Moher et al., 2015; Ziegler et al., 2011) nach folgendem Ablauf vorgenommen:

1. Forschungsfrage erarbeiten
2. Kriterien Studien-Ein- und Ausschluss (*Population-Exposure-Outcome* (PEO)), sowie weitere Ein- und Ausschlusskriterien)
3. Suchstring erarbeiten
4. Suchzeitraum definieren
5. Elektronische Datenbanksuche: Literaturdatenbanken, Konferenzen
6. Screening
7. Title/Abstract-Screening
8. Volltext-Screening
9. Volltextbeschaffung
10. Handsuche (z. B. Websites)
11. Daten-/Informations-Extraktion der inkludierten Studien inkl. Qualitätsbewertung.
12. Resultate und Diskussion

*Anmerkung:*

*Der vorstehende Ablauf wird für alle Literaturrecherchen verwendet, die im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden. Basierend auf dem generellen Ablauf wird das detaillierte Protokoll des Reviews spezifisch auf die einzelnen Themenbereiche angepasst.*

#### 2.2.1 Suchstrategien

Bei der Durchführung der Arbeiten stellte sich heraus, dass eine alleinige Auswertung der wissenschaftlichen Datenbanken nicht zu einem ausreichend fundierten Ergebnis führt, da die Ergebnisse der Recherchen in den diversen Datenbanken in Bezug auf das Thema „Marktanalyse“ nur wenig verwertbare Treffer ergaben. In der Regel behandeln die in den wissenschaftlichen Datenbanken eingestellten Artikel und Berichte lediglich Einzelaspekte des Einsatzes von Drohnen (z. B. Berichte über eine Methode zur Erkennung des gesunden Wachstums bestimmter Pflanzen mit Hilfe von Drohnen).

Für fundierte Ergebnisse ist es daher notwendig, die systematische Literaturrecherche durch eine „händische“ Suche im Internet zu ergänzen, was insgesamt zu einem Mixed-Methods-Ansatz führt.

Dabei zeigte sich, dass die für die Fragestellung dieses Themengebietes fundiertesten und damit relevantesten Artikel und Berichte durch staatliche Stellen erstellt oder in deren Auftrag erstellt wurden. Die Veröffentlichung erfolgte jeweils im Internet. Ein Eintrag in eine der einschlägigen wissenschaftlichen Literaturdatenbanken erfolgte dabei nicht, da letztere nur wissenschaftliche Artikel berücksichtigen. Insofern lassen sich derartige Artikel und Berichte nur durch eine händische Suche finden (obwohl sich aus den Literaturverzeichnissen relevanter Artikel vielfach Verweise auf derartige Quellen finden).

Nachfolgend werden daher sowohl die Vorgehensweise und die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche als auch bei der „händischen“ Internetsuche dargestellt.

Schwerpunktmäßig wurden die Publikationen der letzten fünf Jahre berücksichtigt, da aufgrund der sich rasant entwickelnden Technik die Wahrscheinlichkeit, in älteren Publikationen wesentliche, relevante Aussagen zu finden, sehr klein ist.

#### **2.2.1.1 Elektronische Datenbanksuche**

Die elektronische Datenbanksuche erfolgte in:

- ▶ ScienceDirect,
- ▶ Web of Science und
- ▶ Scopus

#### **2.2.1.2 Suchstrings**

Für die elektronische Datenbanksuche wurden die folgenden Suchstrings verwendet:

- ▶ (Drone) AND (market) AND (forecast)
- ▶ (UAS OR UAV OR RPAS OR UTM) AND (forecast OR (future AND trend)) AND (application OR purpose))
- ▶ (UAS OR UAV OR RPAS OR UTM) AND (forecast OR future trend)

#### **2.2.1.3 Titel-Abstract- und Volltextscreening**

Die vorstehend genannten Suchstrings führten zu Treffern bei 1133 Publikationen (Stichtag: 28.7.2020). Die gefundenen Artikel wurden in das Literaturdatenbankprogramm EndNote Version X9 eingeladen. Nach Aussortierung der doppelten Artikel verblieben 1083 Artikel als Ergebnis der Literaturrecherche. Um die Anzahl der Treffer auf relevante Artikel zu reduzieren, wurden die Artikel nach den nachstehenden Stichworten gefiltert. Die grundlegende Überlegung dabei war, dass im Falle des Auftretens der nachfolgend angegebenen Stichworte in der Zusammenfassung (abstract) davon ausgegangen werden kann, dass der betreffende Artikel lediglich spezielle Aspekte eines Einzelthemas behandelt und keine relevanten Informationen zum Thema „Marktanalyse“ enthält und somit von einer vertieften Analyse ausgenommen werden kann. Zur Sicherheit wurden die Titel und ggf. auch die Zusammenfassung vor dem Aussortieren nochmals durchgeschaut.

- ▶ diverse Feldfrüchte (wheat, rape, rice, strawberry, etc.)

- ▶ Weather inspection
- ▶ forest fire
- ▶ breeding birds
- ▶ Swarm algorithm
- ▶ Aerial position
- ▶ meteorological
- ▶ crowd sourcing
- ▶ 3D Movement
- ▶ Pipeline
- ▶ Cancer
- ▶ Collision avoidance
- ▶ Navigation (nur Titel)
- ▶ Application (nur Titel)
- ▶ Mapping (nur Titel)

Nach Filterung mit den vorstehend genannten Stichworten blieben ca. 200 Artikel übrig, deren Abstract einer genaueren Analyse bezüglich der Relevanz für das Thema „Marktanalyse“ unterzogen wurde. Nach Durchsicht der Zusammenfassungen wurden 48 Artikel als vermutlich relevant eingestuft und der Volltext von 45 Artikeln beschafft (3 Artikel konnten nicht beschafft werden).

Die hohe Anzahl an Treffern zu den verwendeten Suchbegriffen liegt vor allem daran, dass viele Artikel einleitende Sätze enthalten, in denen pauschal ausgeführt wird, dass davon auszugehen ist, dass Drohnen in der Zukunft vermehrt auftreten und/oder eine immer größere Rolle spielen werden. Eine Konkretisierung dieser pauschalen Aussage oder ein zahlenmäßiger Beleg für die Aussagen in den einleitenden Sätzen finden sich jedoch nur in wenigen Fällen.

Wenn relevante Informationen zum Thema Marktentwicklung enthalten sind, stammen diese nicht selten aus den Jahresberichten der Luftaufsichtsbehörde der USA, FAA.

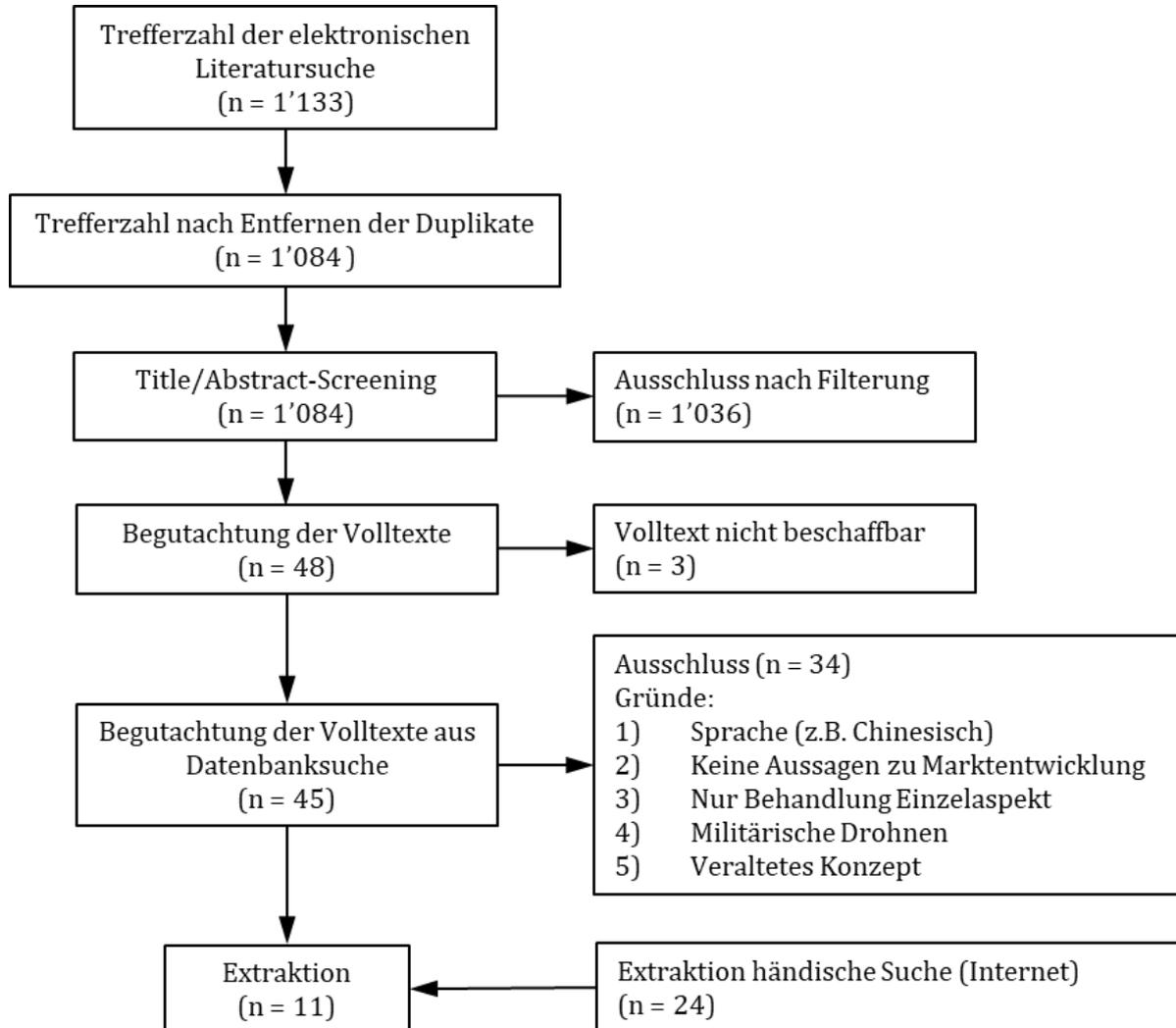
#### **2.2.1.4 „händische“ Suche im Internet**

Die „händische“ Suche im Internet erfolgte unter Zuhilfenahme der Internetsuchmaschine Bing. Zusätzlich wurden die in den einzelnen Publikationen aufgeführten Literaturangaben nach für das Thema relevanten Publikationen durchsucht und ggf. über das Internet gesucht und eingesehen. Insgesamt wurden 24 für das Thema relevante Artikel und Berichte gefunden und händisch in das Literaturdatenbankprogramm eingegeben. (Nicht als relevant eingestufte Artikel und Berichte wurden nicht aufgenommen.)

### 2.2.1.5 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Eine Zusammenfassung der Recherche nach relevanten Artikeln und Berichten gemäß des PRISMA-Fließdiagramms zeigt die nachfolgende Abbildung 2.

**Abbildung 2 Prisma-Flow-Diagramm, Marktentwicklung**



Quelle: eigene Darstellung BeSB GmbH

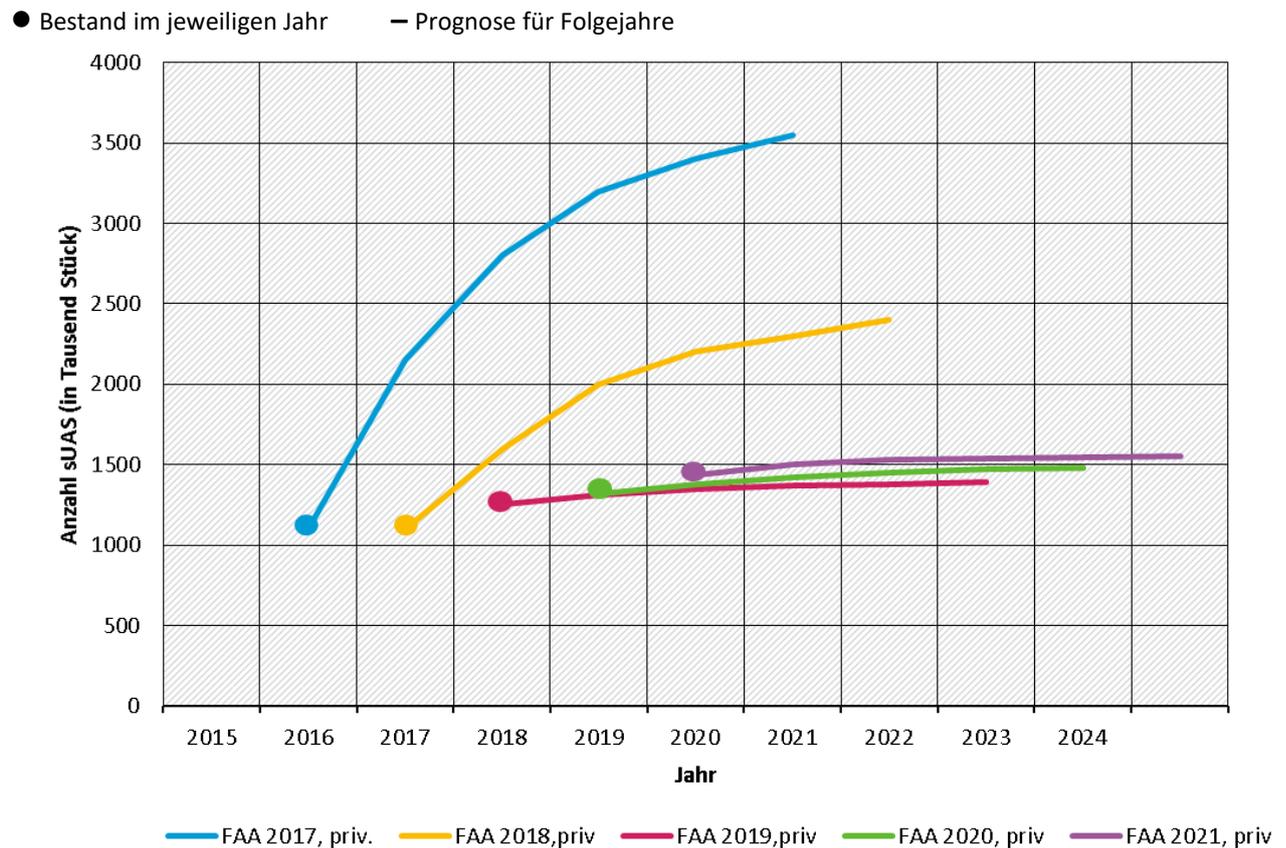
## 2.3 Ergebnisse der Literaturrecherche zum Themenbereich „Marktanalyse“

### 2.3.1 Entwicklung des Drohnenmarktes

Die Luftaufsichtsbehörde der USA, FAA legt jährlich einen Bericht zur Lage und Entwicklung des Luftverkehrs in den USA vor (siehe z. B. FAA 2019). Seit einiger Zeit enthält dieser auch Aussagen zum Stand und zu der zu erwartenden Entwicklung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAS). In Bezug auf kleine Drohnen (sUAS), d.h. unbemannte Luftfahrzeuge mit einer Abflugmasse  $\leq 25$  kg finden sich in den Jahresberichten jeweils eine Angabe zum Bestand in den USA im Vorjahr des Veröffentlichungsjahres sowie eine Schätzung bezüglich der Entwicklung in den nächsten fünf Jahren. Die Schätzung wurde jeweils für drei unterschiedliche Szenarien (Low, Base und High entsprechend pessimistisch, mittel, optimistisch) durchgeführt. Die Ergebnisse werden nach privat und professionell genutzten sUAS getrennt angegeben.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die in den Jahresberichten 2017–2020 enthaltenen Angaben für das jeweils mittlere Szenario graphisch dargestellt. Der für die jeweilige Prognose zu Grunde gelegte Bestand ist jeweils durch einen farbigen Punkt gekennzeichnet. Die sich hieran anschließende Linie stellt das Ergebnis der Prognose. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für die privat genutzten und Abbildung 4 für die professionell genutzten sUAS.

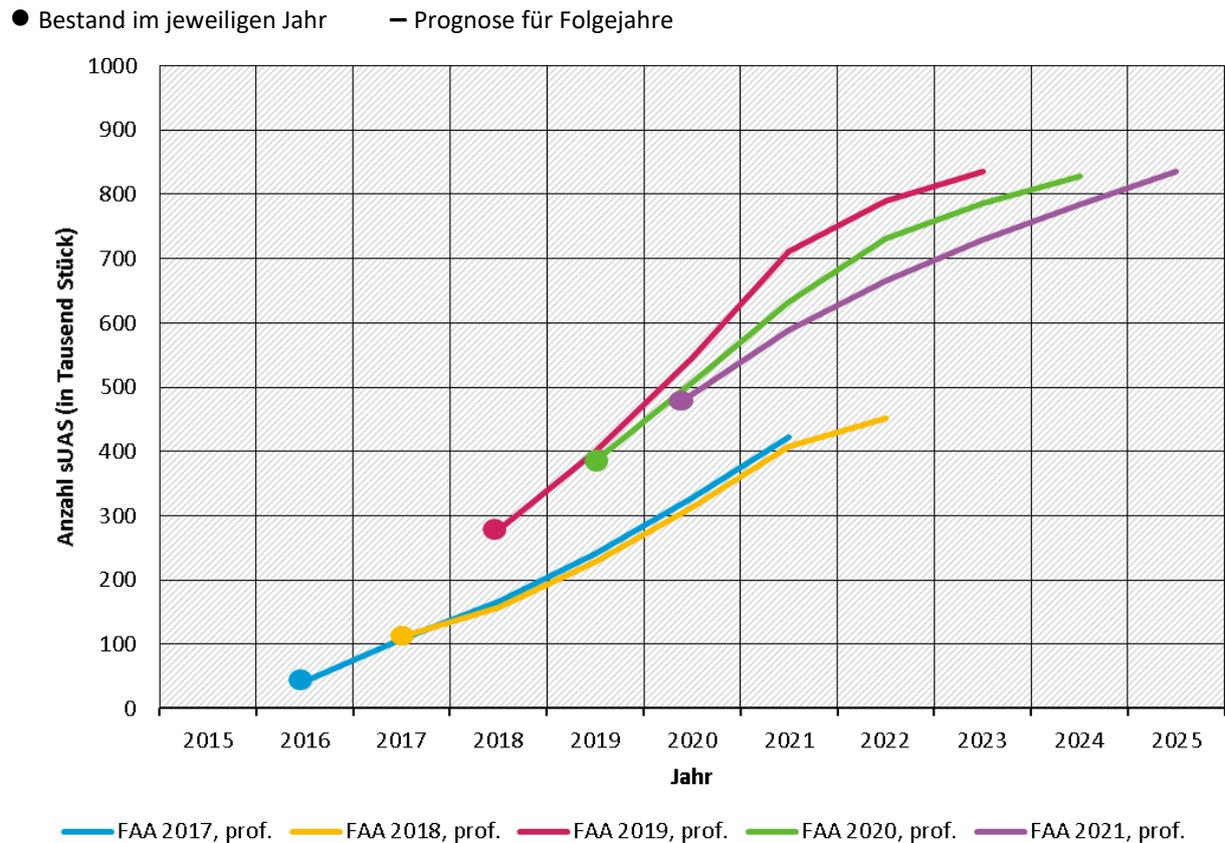
**Abbildung 3 Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA gem. Jahresberichte FAA, Mittelwerte der Schätzungen für private kleine Drohnen (sUAS)**



Quellen: Jahresberichte FAA 2017 – 2021, jeweils für mittlere Entwicklung (Base)<sup>11</sup>

<sup>11</sup> In den Jahresberichten der FAA wird die Entwicklung jeweils für drei Szenarien (Low, Base und High) angegeben. Die Angaben in der Abbildung beziehen sich jeweils auf die mittlere Entwicklung (Base)

**Abbildung 4 Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA gem. Jahresberichte FAA, Mittelwerte der Schätzungen für professionelle kleine Drohnen (sUAS)**



Quellen: Jahresberichte FAA 2017 – 2021, jeweils für mittlere Entwicklung (Base)<sup>11</sup>

Wie die vorstehenden Abbildungen zeigen, weichen die Schätzungen in den Jahresberichten 2017 und 2018 deutlich von der tatsächlichen Entwicklung ab. Während die Entwicklung im Bereich privater Nutzungen deutlich überschätzt wurde, wurde die Entwicklung im Bereich professioneller Nutzungen in den Jahresberichten 2017 und 2018 deutlich unterschätzt. Erst ab dem Jahresbericht 2019 zeigen die Schätzungen eine bessere Übereinstimmung, wobei auch hier nicht auszuschließen ist, dass sich die Prognosen in späteren Jahren wieder deutlich ändern. Dies gilt insbesondere für den Fall einer Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

Dennoch ist die Ausgangslage in den USA bezüglich der Erstellung von Prognosen insofern besser als in anderen Ländern und Regionen, da in den USA die Registrierung der Betreiber unbemannter Luftfahrzeuge bereits Ende des Jahres 2015 eingeführt wurde<sup>12</sup>. Damit existiert für den Bereich der USA mittlerweile eine stabile Ausgangsbasis für die Durchführung von Prognosen. Eine derartige Registrierungspflicht gilt gemäß EU Verordnung 2019/947 in der EU erst ab dem 01.01.2021. Insofern ist die Datenlage in der EU derzeit deutlich schlechter.

<sup>12</sup> FAA Jahresbericht 2020: „FAA’s online registration system for recreational/model sUAS went into effect on Dec. 21, 2015. This required all UAS weighing more than 0.55 pounds (250 grams) and fewer than 55 pounds (or 25 kilograms) to be registered using the on-line system ([https://www.faa.gov/uas/getting\\_started/registration/](https://www.faa.gov/uas/getting_started/registration/)) or the existing (paper-driven) aircraft registry. Following a temporary halt in registration due to an order from the U.S. Court of Appeals in Washington, D.C. in May, 2017, the registration requirement for all model aircraft was reinstated in December, 2017 with the National Defense Authorization Act (NDAA). Despite the temporary halt, registration pace continued beyond May, 2017. On October 5, 2018, the President signed the FAA Reauthorization Act of 2018 that formalized new conditions for recreational use of drones. With the continuing registration, almost 990,000 recreational UAS owners had already registered with the FAA by December, 2019“.

Schätzungen zur Entwicklung des Drohnenmarktes, welche aus der Zeit vor 2018 stammen, sollten daher besser nicht verwendet werden. Das schließt auch nahezu alle Artikel ein, die im Ergebnis der Literaturrecherche gefunden wurden. Begründet ist dies darin, dass die für einen Artikel ausgewerteten Prognosen naturgemäß aus der Zeit vor Erscheinen des Artikels stammen. So berücksichtigt (Japertas 2017) beispielsweise Prognosen, die aus den Jahren 2010 bis 2016 stammen, wobei der Hauptteil der berücksichtigten Arbeiten aus den Jahren 2012 und 2015 stammt. Im Ergebnis der Auswertung meint Japertas daher auch, in Bezug auf die Entwicklung des Marktes für zivile Drohnen einen klaren, exponentiellen Anstieg erkennen zu können. Ausweislich der Zählraten der FAA (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4) ist ein exponentieller Anstieg tatsächlich jedoch nicht vorhanden. So wird für den privaten Bereich von einer Stagnation ausgegangen. Nur für den professionellen Bereich wird von einem anhaltenden Wachstum ausgegangen.

Eine Schätzung zur Entwicklung des Drohnenmarktes in Deutschland findet sich in der vom Hamburger Marktforschungsunternehmen Drone Industry Insights (droneii.com) im Auftrag des deutschen Verbandes unbemannte Luftfahrt erstellten und im Februar 2019 vorgelegten „Analyse des deutschen Drohnenmarktes“ (VUL 2019). Wie in den Jahresberichten der FAA wird auch in dieser Studie zwischen Drohnen in privater und Drohnen in professioneller Nutzung unterschieden. Im Unterschied zum relativ kurzen Vorhersagezeitraum in den Jahresberichten der FAA (5 Jahre) enthält die Analyse des deutschen Drohnenmarktes eine Schätzung für den Zeitraum bis 2030. Leider sind die Grundlagen, auf denen die Prognose beruht, in der frei im Internet erhältlichen Version der Studie nicht angegeben. Es werden lediglich einige allgemein gehaltenen Hinweise zur Vorgehensweise angegeben<sup>13</sup>.

Von dieser Studie wurde im März 2021 eine Aktualisierung vorgelegt (VUL 2021). Wie in der Vorgängerstudie aus dem Jahre 2019 finden sich auch in der aktualisierten Studie keine genauen Hinweise zur Vorgehensweise bei der Durchführung der Prognose.

Die nachfolgenden Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen einen Vergleich der Schätzungen für die USA und für den deutschen Raum. Generell sind die Ergebnisse der beiden Schätzungen vom Grundsatz her ähnlich.

Erkennbar ist, dass die FAA für die USA und die VUL Studie des Jahres 2019 für Deutschland in Bezug auf die privat genutzten Drohnen ab ca. 2023 nur noch von einer geringen Steigerung der Anzahl ausgehen (jährliche Steigerungsrate 1–2%). Demgegenüber geht die aktuelle VUL Studie aus dem Jahre 2021 davon aus, dass die Anzahl privat genutzter Drohnen in Zukunft deutlich sinken wird. So wird für den Zeitraum von 2019 bis 2025 von einer Abnahme des Bestandes an Drohnen um ca. 25 % ausgegangen. Dies führt dazu, dass sich die beiden VUL Prognosen für das

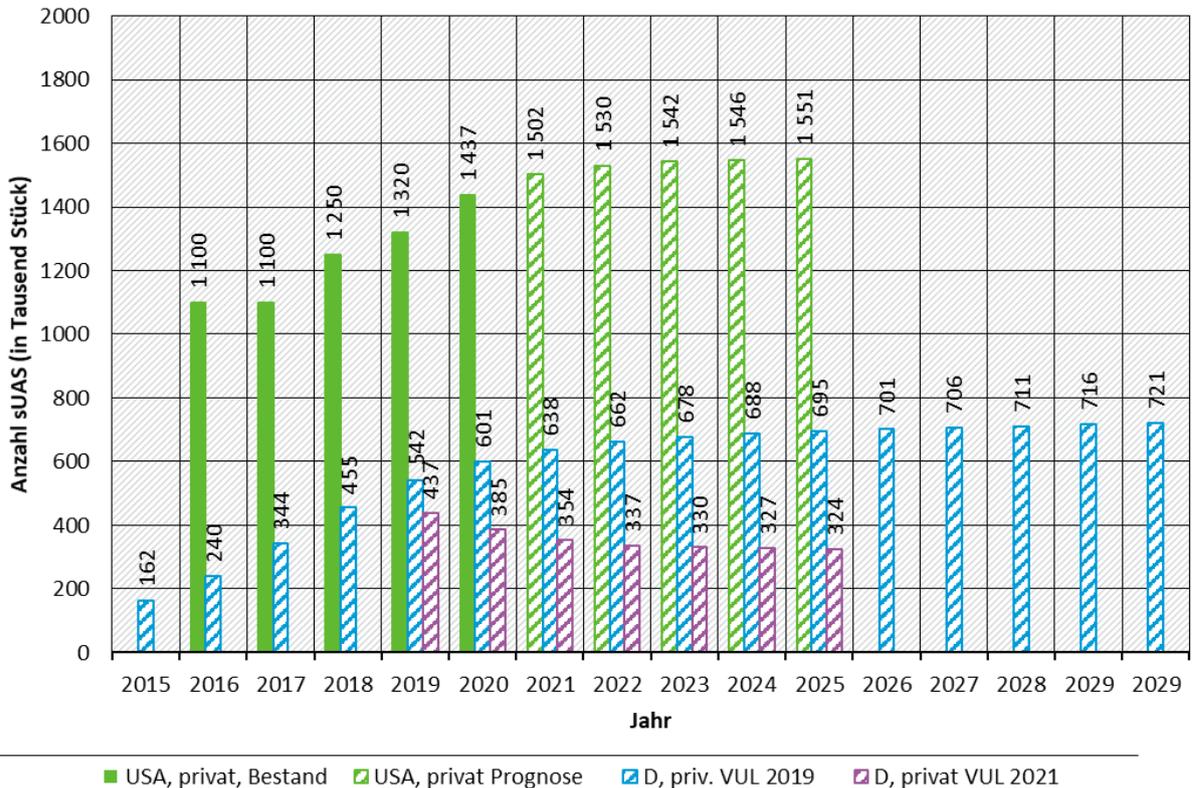
---

<sup>13</sup> VUL 2019: „Der kommerzielle Drohnenmarkt wurde über sekundäre Quellen wie Verkaufszahlen, Registrierungen, und Genehmigungen sowie über die Unternehmensgröße der Anwender und Anbieter quantifiziert. Der private Drohnenmarkt beinhaltet die Nachfrage von Hardware und Software für die private Nutzung und wurde anhand von Verkaufszahlen, Verkaufspreisen und Marktanteilen bestimmt. Das Marktwachstum wurde anhand von aktuellen Wachstumsraten berechnet. Qualitative Faktoren wie steigender Bekanntheitsgrad, technologische Innovationen, bessere Produktionsmöglichkeiten und gesetzliche Änderungen wurden zusätzlich berücksichtigt. Diese Daten wurden zueinander in Verhältnis gebracht, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Die Ergebnisse wurden durch Expertenumfragen verifiziert. Qualitative Aussagen zur Marktbeschaffenheit wurden ebenfalls abgefragt, um einen möglichst aktuellen Stand des deutschen Drohnenmarktes zu liefern. Die Interviewpartner stammten aus den Unternehmen: 3rd Element, Airbus Defence and Space, Cooper Copter, Cyberhawk, Deutsche Bahn, DEDrone, Doks.Innovation, Esteburg, Flynex, Multicopter, Quantum Systems, Rotorkonzept, Sky-Futures, Skylab, Skytec Dornhoh, Strabag, TeAx, Tholeg Robotics, UPS, Yuneec“

Jahr 2025 um mehr als 100 % voneinander unterscheiden. Zu den Gründen finden sich in der aktuellen VUL-Studie keine Angaben. Es ist jedoch zu vermuten, dass die pessimistische Einschätzung der aktuellen Studie aus den Betriebseinschränkungen und der Erhöhung der Anforderungen an die Piloten zu sehen ist, die sich aus den aktuellen Vorgaben der EU und der deutschen Luftverkehrsordnung ergeben (genauerer siehe Kap. 5)

**Abbildung 5 Vergleich der Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA und in Deutschland, privat genutzte Drohnen**

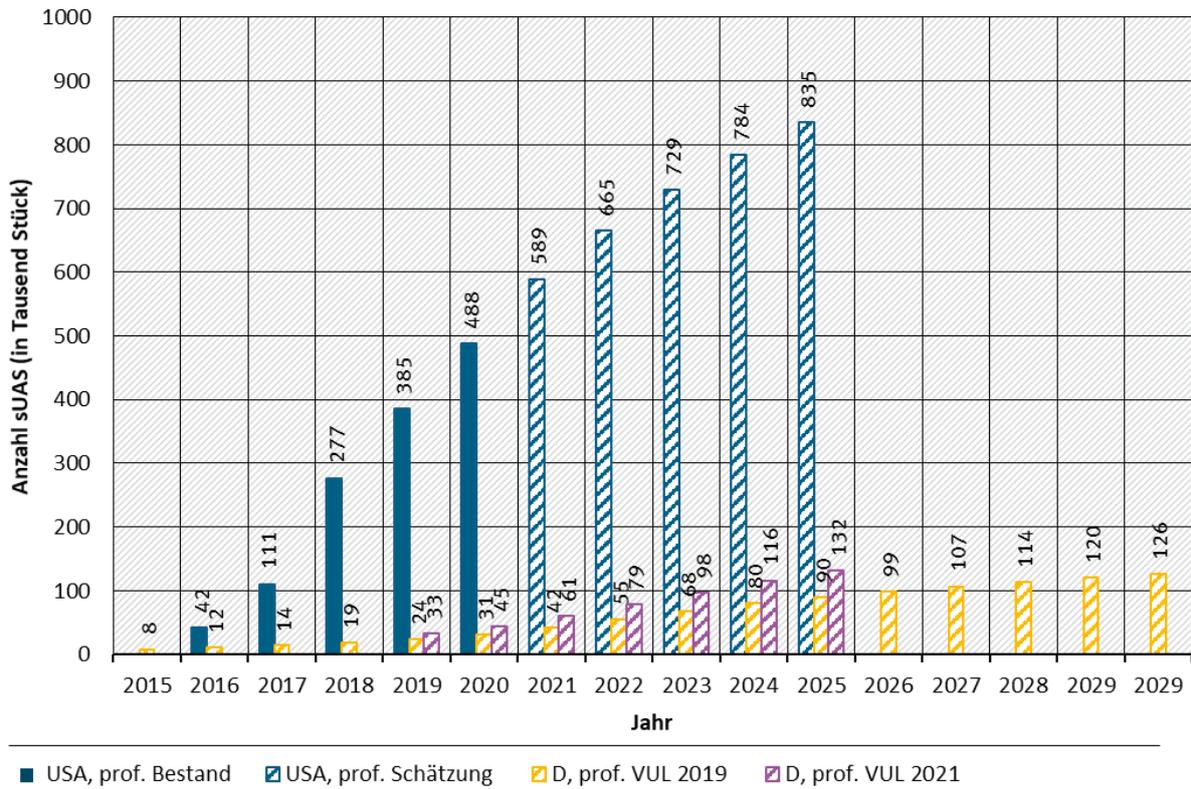


Quellen: Angaben USA: Jahresberichte FAA 2017 – 2021, jeweils mittlere Entwicklung (Base);  
 Jahre 2016 – 2020: jeweils Angabe für Bestand, Jahre 2021 und später: Ergebnis Prognose, Stand 2021;  
 Angaben Deutschland: Verband unbemannte Luftfahrt (VUL) Schätzung 2019 und 2021

Demgegenüber wird in Bezug auf professionelle Drohnen in beiden Schätzungen von einer stetigen Zunahme ausgegangen, wobei die prognostizierte Zunahme an Drohnen für die USA deutlich stärker ausfällt als für den deutschen Bereich.

In Bezug auf die absolute Anzahl der im professionellen Bereich eingesetzten unbemannten Luftfahrzeuge sind die Vorhersagen mit großen Unsicherheiten behaftet. Ein wesentlicher Aspekt dürften dabei die zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen ausmachen. Dies gilt insbesondere für Einsatzbereiche außerhalb des Sichtbereiches des Piloten (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS).

**Abbildung 6 Vergleich der Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA und in Deutschland, professionell genutzte Drohnen**



Quellen: Angaben USA: Jahresberichte FAA 2017 – 2021, jeweils mittlere Entwicklung (Base);  
 Jahre 2016 – 2020: jeweils Angabe für Bestand, Jahre 2021 und später: Ergebnis Prognose, Stand 2021;  
 Angaben Deutschland: Verband unbemannte Luftfahrt (VUL) Schätzung 2019 und 2021

Größere unbemannte Luftfahrzeuge, d.h. Luftfahrzeuge mit einer maximalen Startmasse über 25 kg werden gemäß den Ausführungen im FAA Jahresbericht 2020 auf absehbare Zeit keine wesentliche Rolle spielen. Wie aus Tabelle 2 zu entnehmen ist, rechnet die die FAA im Jahre 2024 lediglich mit 407 sUAS, die in den USA aktiv am Luftverkehr teilnehmen werden.

**Tabelle 2 Schätzung der Anzahl sowie der Flüge von Drohnen > 25 kg MTOM (IUAS) in den USA**

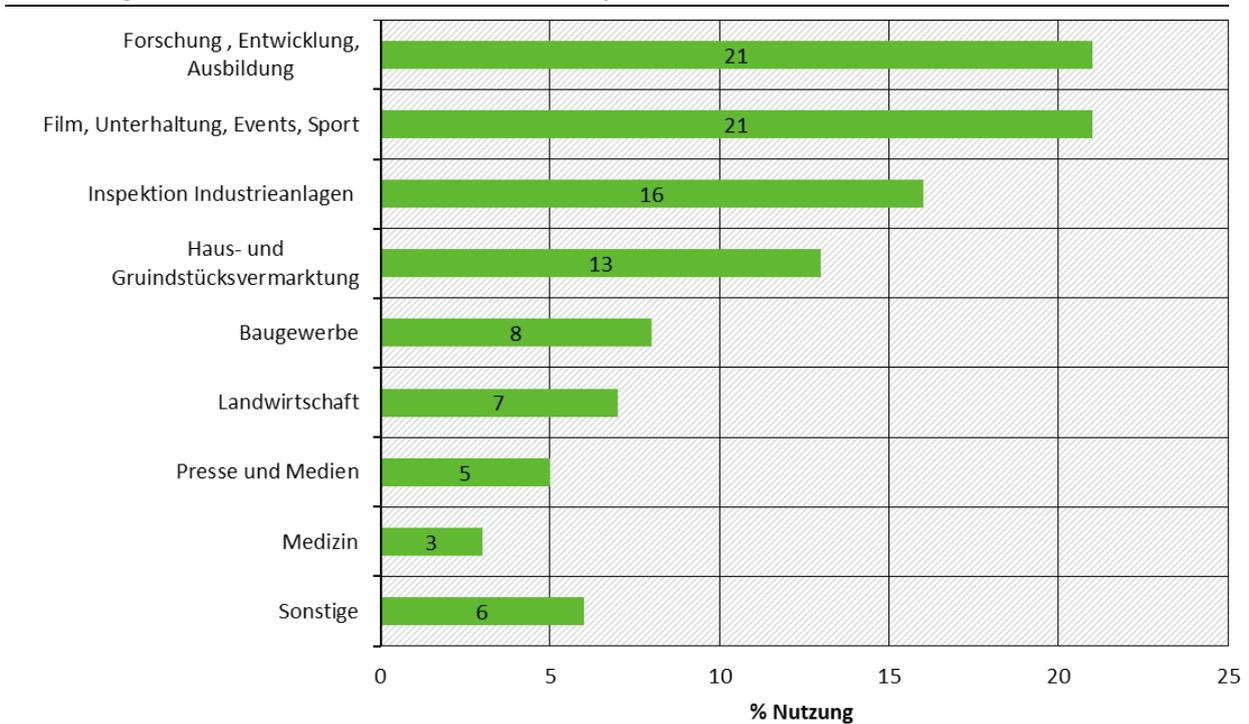
Jahr	Ausnahmen	Anzahl IUAS (> 25 kg MTOM)	Anzahl Flüge
2015	0	184	4,709
2016	0	172	6,785
2017	5	159	7,066
2018	22	172	7,223
2019	19	206	8,240
2020	21	243	9,720
2021	25	274	10,960
2022	34	309	12,360
2023	48	352	14,080
2024	67	407	16,280

Quelle: FAA Jahresbericht 2020

### 2.3.2 Einsatzbereiche

Nach Auswertungen der FAA wurden Drohnen im professionellen Bereich im Jahre 2018 vor allem im Forschungsbereich sowie zur Beobachtung von Events aller Art eingesetzt. Zusammen kommen diese Bereiche auf 42% aller Einsätze (siehe auch Abbildung 7).

**Abbildung 7 Einsatzbereiche von Drohnen im professionellen Bereich, USA, 2018**



Quelle: Jahresbericht FAA 2019

Unterstellt man, dass die technischen und rechtlichen Hürden zur Durchführung eines BVLOS-Betriebs beseitigt sind, so ist davon auszugehen, dass im professionellen Bereich Drohnen für die folgenden Anwendungen eingesetzt werden, da die technischen Voraussetzungen für diese Einsatzbereiche derzeit bereits vorhanden sind.

- a) Inspektion von technischen Anlagen und landwirtschaftlichen Flächen
  - a.1 Linienförmige Anlagen (Strom-, Gasleitungen)
  - a.2 Flächenhafte Anlagen (ganze Werksgelände)
  - a.3 Landwirtschaftliche Flächen
- b) Flüge zur Erlangung von Geoinformationen (z. B. Baufortschritt auf Baustellen oder Erstellung von Thermobildern)
- c) Lieferung von kleineren (max. ca. 5 kg) Paketen
- d) Lichtshows

Für die o.g. Anwendungen werden unterschiedliche Größen und Typen von Drohnen verwendet. Allen gemeinsam ist, dass sie elektrisch angetrieben werden. Eine Übersicht über die für die einzelnen Anwendungen einsetzbaren Drohnenarten sowie einige Kenngrößen und Musterbeispiele zeigt Tabelle 3.

**Tabelle 3 Baumuster und typische Kenngrößen (Herstellerangaben) von derzeit eingesetzten Drohnen**

Anwendungsfall (s.o.)	Bauart	Muster (Beispiel)	MTOM [kg]	v [km/h]	max. Flugdauer [min]	Länge/Breite** [cm]
a, b, c	Multicopter (4 Prop.)	DJI Matrice 300	9,0	0 - 82	45	134*/120
a, b	Wingcopter (4 Prop.)	QLEX Creo	6,3	50 - 130*	240*	171/245
b	Multicopter (4 Prop)	DJI Phantom 4	1,4	0 - 50	30	ca. 54/54
a, b, c	Multicopter (4 Prop.)	Matternet M2V9	13,2	0 – 58	ca. 20	128/128
a, b, c	Multicopter (6 Prop.)	DJI Matrice 600	15,5	0 - 65	32	167/152
a, b	Wingcopter (4 Prop.)	Wingcopter 178	18	47 – 150*	120*	178/132
c	Wingcopter (14 Prop)	Wing Aviation	4,8	0 - 113	ca. 20	100/130
d	Multicopter (4 Prop)	Intel shooting star	0,33	0 - 11	8	38/38

\* fixed wing Modus (Streckenflug)\*\* jeweils incl. Propeller

## 2.4 Beschwerdefälle (national)

Die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich Beschwerden über Drohnen bei den deutschen Landesbehörden sind in der nachfolgenden Tabelle 4 angegeben. Demzufolge hat es in den 13 Bundesländern, für die Ergebnisse vorliegen, bislang nahezu keine Beschwerden zu Drohnen gegeben.

**Tabelle 4 Beschwerdefälle zu Drohnenbetrieb, Ergebnisse der Recherche bei Landesbehörden**

Bundesland	Behörde	Abteilung	Datum Kontakt	Inhalt Antwort
Baden-Württemberg	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg	Abteilung Immissionsschutz Referat 42	01.10.2020	Thema als Beschwerde so noch nie vorgekommen; viele Beschwerden gehen bei der Landesanstalt für Umwelt oder der unteren Immissionsschutzbehörde ein, die diese bei solchen neuen Fragestellungen jedoch weiter an das Umweltministerium leiten.
Berlin / Brandenburg	Gemeinsame obere Luftfahrtbehörde Berlin Brandenburg LBV	Dezernat 41		Bislang keine Beschwerden bekannt
Hessen	Regierungspräsidium Darmstadt	Abt. 3-33-3	14.10.2020	Eine einzige Beschwerde bekannt, die aber lange her ist. Beschwerdegrund: Filmaufnahmen mit einer Drohne in Frankfurt zur Nachtzeit
Mecklenburg-Vorpommern	Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt		14.10.2020	Hier bis dato keine Beschwerden zu Lärm von Drohnen eingegangen, nur im Zusammenhang mit Modellflugplätzen, auf denen auch Drohnen fliegen
Niedersachsen	Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr	Dezernat Luftfahrtbehörde	14.10.2020	Bis dato keine Lärmbeschwerden
Nordrhein-Westfalen	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	Referat V-5: Immissionsschutz bei Lärm und andere physikalischen Einwirkungen	15.10.2020	hier bis dato keine Lärmbeschwerden, bitte noch mal beim Verkehrsministerium nachfragen
Nordrhein-Westfalen	Ministerium für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen	Referat II A 4 Umweltschutz in der Luftfahrt	15.01.2021	Bis dato keine Lärmbeschwerden
Rheinland-Pfalz	Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LBM RP)	Fachgruppe Luftverkehr	22.10.2020	Bis dato keine Lärmbeschwerden

Bundesland	Behörde	Abteilung	Datum Kontakt	Inhalt Antwort
Saarland	Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Saarland	Referat E3 Immissionsschutz, Anlagentechnik	08.10.2020	In dieser Abteilung keine Beschwerden bekannt
Sachsen	Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft	Abteilung 5, Referat 53	09.10.2020	Bis zum Ministerium sind bisher keine Beschwerden gelangt. Es finden regelmäßige Besprechungen mit den Landratsämtern, bei denen die Beschwerden eingehen würden, statt. In diesen Besprechungen waren Drohnen noch kein Thema, aber Anfragen durch Hersteller zwecks Abnahmemessungen
Sachsen-Anhalt	Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr	Referat 33 Luftverkehr	01.10.2020	bisher sind keine Beschwerden bekannt
Schleswig-Holstein	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung	Abteilung V 6: Energie und Klimaschutz, Technischer Umweltschutz Immissionsschutz, Anlagensicherheit, Anlagenbezogene Energieeffizienz, Marktüberwachung		<p>Bis dato keine Beschwerdefälle, für rechtliche Bewertung sind die Ordnungsämter zuständig</p> <p>Aus der Antwort per Mail: Nach rechtlicher Bewertung sind grundsätzlich die örtlichen Ordnungsämter zuständig, da Drohnen/Quadrocopter (es wird davon ausgegangen, dass es sich hier um nicht militärisch genutzte Geräte handelt) eher überwiegend privat genutzt werden. Informationen könnten hier ggf. über das Ministerium für Inneres, ländliche Räume, Integration und Gleichstellung (MILIG) erfragt werden. Grundsätzlich gelten für den Betrieb Regelungen wie Abstände zu dem Wohn dienenden Gebieten/Gebäuden. Schon dadurch dürften sich die Lärmauswirkungen minimieren, da die geltenden Immissionsrichtwerte am Tag nach erster Einschätzung wohl kaum erreicht werden dürften. Die Zuständigkeit des LLUR dürfte sich auf Ausnahmefälle (z. B. gewerbliche Befliegungen von Objekten wie z. B. Flügel von Windkraftanlagen – diese liegen aber üblicherweise weit weg von Wohngebäuden) beschränken.</p>

Bundesland	Behörde	Abteilung	Datum Kontakt	Inhalt Antwort
Thüringen	Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz	Abteilung 2 - Technischer Umweltschutz, Wasserwirtschaft, Bergbau: Referat 23 – Immissionschutz, Chemikaliensicherheit	14.10.2020	bis dato keine Anwohnerbeschwerden, Verweis an das Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
Thüringen	Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz	Referent für physikalische Einwirkungen	14.10.2020	bis dato keine Anwohnerbeschwerden

## 3 Geräuschmessungen von Drohnen

### 3.1 Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. ausschluss

Die Forschungsfrage zum Themengebiet „Geräuschmessungen von Drohnen“ ist wie folgt formuliert:

*Mit welchen experimentellen Methoden können die akustischen Emissionen von Drohnen vermessen und in ein empirisches Modell überführt werden, und welche Emissionsdaten sind bereits bekannt und dokumentiert?*

In die Analyse werden Studien aufgenommen, die potenziell Aussagen zur Messmethodik von Drohnen machen oder Hinweise zur Formulierung von empirischen Emissionsmodellen liefern oder verwendbare Emissionsdaten aufführen. Dabei interessierten nur Studien, die die Drohne als Gesamtsystem betrachten. Ausgeschlossen wurden Studien, die spezifisch nur Teilquellen untersuchen. In der Analyse der gefundenen Studien werden die vorgeschlagenen Messmethoden und Modellierungsansätze hinsichtlich

- ▶ der benötigten Infrastruktur
- ▶ des Messaufwands
- ▶ des Detaillierungsgrads des ableitbaren Emissionsmodells und
- ▶ der erwarteten Modellgenauigkeit

diskutiert und die gefundenen Emissionsdaten zusammengestellt.

### 3.2 Formalismus der Literaturrecherche

#### 3.2.1 Suchstrategien

##### 3.2.1.1 Elektronische Datenbanksuche

Die elektronische Datenbanksuche erfolgte in:

- ▶ Web of Science in EndNote (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ Scopus (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ ScienceDirect (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ ingentaConnect (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ Google Scholar (Title)
- ▶ ICA, ICSV, Euronoise, (Inter-Noise)

Auf eine Suche in der Datenbank SpringerLink wurde verzichtet, da die Suche nicht auf Title/Keywords/Abstract eingegrenzt werden kann und eine Volltextsuche zu einer übergroßen Anzahl Treffer geführt hätte. In Google Scholar musste die Suche auf den Titel eingeschränkt werden, um die Trefferzahl nicht explodieren zu lassen. Die Konferenzproceedings: ICA, ICSV und Euronoise wurden direkt durchsucht, eine Stichprobenkontrolle zeigte, dass die Inter-Noise Beiträge in den oben aufgeführten Datenbanken enthalten sind. Zur Konferenz FAI International

Drones Conference and Expo wurden keine Proceedings gefunden, die Konferenz Quiet Drones war zur Zeit der Datenbanksuche auf einen Termin in der Zukunft verschoben worden und daher nicht verfügbar. Diese Suche wurde jedoch später nachgeholt und hat zur Aufnahme einer Referenz geführt, die beschreibt, wie im Labor mit einem Array von Ventilatoren zeitlich und räumlich variable Windfelder erzeugt werden können, die bei feststehender Drohne einen Vorwärtsflug simulieren.

### 3.2.1.2 Suchstring

Der Suchstring forderte mindestens zwei Begriffe aus den beiden Kategorien: *Quellentyp* und *interessierender Aspekt* mit der konkreten Formulierung:

```
("drone*" OR "quadcopter" OR "multirotor" OR "multicopter" OR "UAV" OR "UAS" OR "unmanned air*" OR "unmanned aer*") AND ("acoustic*" OR "sound" OR "noise" OR "auralization")
```

Als Folge einer begrenzten Zahl zulässiger logischer Operatoren musste dieser String in einigen Datenbanken angepasst bzw. in mehrere Strings, die sequenziell abgearbeitet wurden, aufgeteilt werden.

### 3.2.1.3 Trefferzahlen

Die Datenbankabfragen wurden zwischen dem 17. und 19. August 2020 durchgeführt und ergaben mit folgenden Trefferzahlen:

- ▶ Web of Science in EndNote: 1891
- ▶ Scopus: 3594
- ▶ ScienceDirect: 193
- ▶ ingentaConnect: 151
- ▶ Google Scholar: 481

ein Total von 6310 Einträgen, die sämtlich in EndNote importiert wurden. Diese Originalsammlung wurde in EndNote mit der Funktion <Find Duplicates> von Duplikaten befreit, womit für das anschließende Screening 4987 Einträge verblieben.

### 3.2.1.4 Screening

Die mit obiger Suche gefundenen 4987 Einträge wurden durch Kurt Heutschi gesichtet und weiter ausgedünnt. Dabei zeigte sich, dass nach der automatischen Duplikatbefreiung eine größere Zahl von Einträgen immer noch doppelt aufgelistet war; diese wurden im Verlauf des Screenings entfernt. Bei der Sichtung wurden zudem nicht relevante Einträge ausgeschlossen, die

- ▶ sich auf einen Teilaspekt der Schallentstehung (z. B. Flügelprofiluntersuchung) und nicht auf das Gesamtsystem Drohne beziehen,
- ▶ nichts mit der akustischen Emission von Drohnen zu tun haben (z. B. wenn der Begriff „noise“ im allgemeinen Sinn als Rauschen in einem Signal auftaucht oder wenn die Drohne als Werkzeug zur Untersuchung eines anderen Aspekts eingesetzt wird),
- ▶ sich auf die Beschallung von mit der Drohne mitfliegenden Mikrofonen beziehen,

- ▶ sich mit der Ortung und Identifikation von Drohnen mittels Mikrofonarrays befassen ohne direkten Bezug zur Bestimmung von Emissionsdaten aufzuweisen,
- ▶ die Geräuschkinderung von Drohnen untersuchen oder
- ▶ den Begriff „drone“ in anderem Kontext verwenden.

Nach diesem Screening-Prozess verblieben 72 Studien als vermutlich relevant. Von 67 Referenzen konnte der Volltext beschafft werden. Drei Studien betreffen Konferenzbeiträge der amerikanischen Gesellschaft für Akustik, zu welchen keine schriftlichen Fassungen existieren, eine Referenz betrifft die in einer russischen Zeitschrift publizierte Untersuchung einer mit einem Verbrennungsmotor angetriebenen Drohne und eine Referenz betrifft einen Konferenzbeitrag, von dem zu vermuten ist, dass er durch andere, in der Sammlung enthaltene Publikationen abgedeckt ist. In der eigentlichen Auswertung stellten sich 46 Referenzen als nicht relevant heraus, da entweder nur bestimmte Aspekte, aber nicht die Drohne als Gesamtsystem untersucht wurden, die Messanordnung nicht verallgemeinerbar oder zu wenig genau spezifiziert war oder militärische Flugobjekte gemeint waren. Es verblieben 21 relevante Artikel.

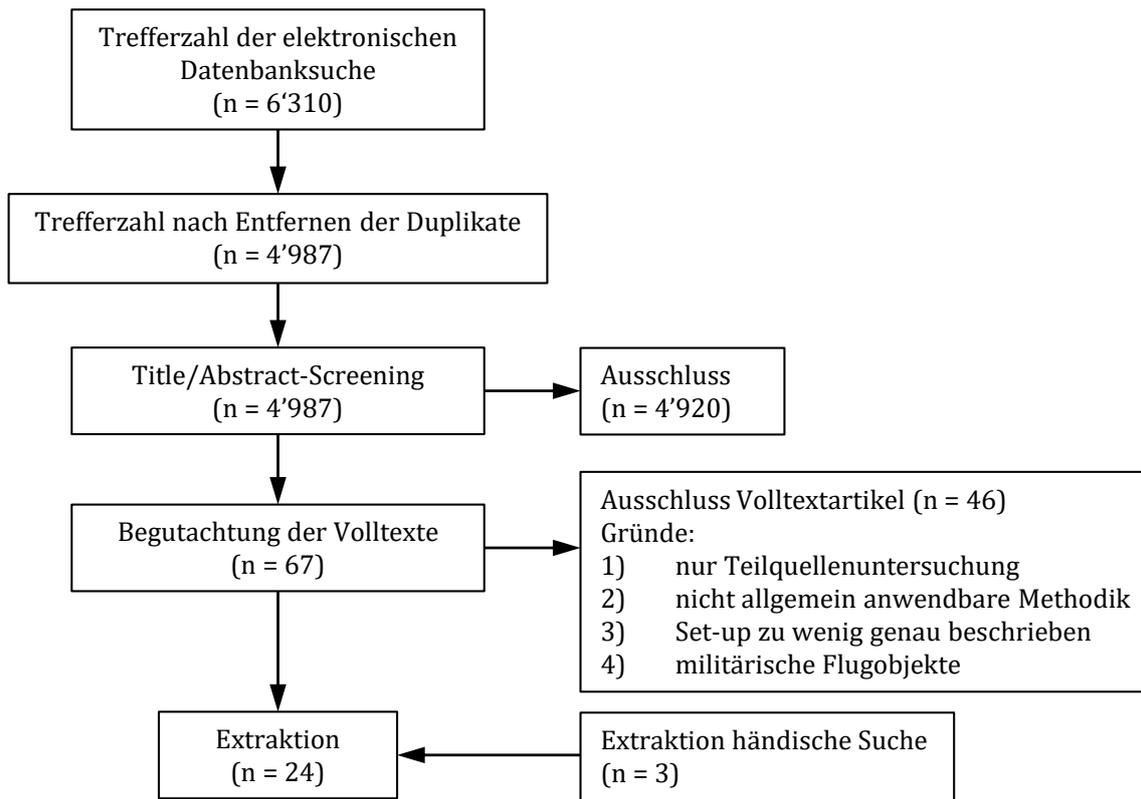
#### **3.2.1.5 „händische“ Suche im Internet und Ergänzungen von einzelnen Referenzen**

Die manuelle Internetsuche und Inspektion der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Referenzen erbrachte keine neuen Treffer. Nachträglich wurde die Liste der relevanten Referenzen jedoch ergänzt durch einen Quiet Drones 2020 Konferenzbeitrag, einen VOLPE-Bericht zu Drohnenmessungen (ICAO Homepage) und einen eigenen Zeitschriftenartikel.

#### **3.2.1.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche**

Eine Zusammenfassung der Recherche nach relevanten Dokumenten gemäß dem PRISMA-Fließdiagramm zeigt die nachfolgende Abbildung 8.

**Abbildung 8 Übersicht der Literaturrecherche**



Quelle: eigene Darstellung, Empa

### 3.2.1.7 Dokumentation der Literaturrecherche

Tabelle 5 listet die 24 in die Detailuntersuchung eingeschlossenen Studien auf. Mitangegeben sind die untersuchten Drohnentypen, die Flugmanöver, die Mikrofonanordnungen und die ausgewiesenen Emissionsgrößen.

**Tabelle 5 Wichtigste Aspekte der in die Detailanalyse eingeschlossenen Referenzen**

Referenz	Drohnentyp	Labor/ Feld	Emissionsgrößen	Mikrofone	Manöver / Betriebszustände
(Alexander and Whelchel, 2019) Flyover Noise ...	DJI Matrice 600 Pro, Hexa, 15,5 kg	F	LE [dB(Z)] und Leistungsdichte-spektrum	5 Mik in Grenzflächenanordnung auf 1 m Bodenplatten im Gras, auf einer Linie senkrecht zum Flugpfad	Schweben, langsamer Überflug (3,2 m/s)
Alexander et al. (2019) Predicting community noise ...	DJI Matrice 600 Pro, Hexa, 15,5 kg	F	LE [dB(Z)] und Leistungsdichte-spektrum	5 Mik in Grenzflächenanordnung auf 1 m Bodenplatten im Gras, auf einer Linie senkrecht zum Flugpfad	Schweben, langsamer Überflug (3,2 m/s)

Referenz	Drohentyp	Labor/ Feld	Emissionsgrößen	Mikrofone	Manöver / Betriebszustände
(Besnea, 2020)	diverse	F		Mikrofonarray	Schweben, Steigen, Vorwärtsflug
(Cabell et al., 2016)	verschiedene bis 7 kg	F	$L_{Amax}$ , Effective Perceived Noise Level (EPNL), Spektrogramme	4 Mik in Grenzflächenanordnung auf 43 cm Bodenplatten auf Linie senkrecht zur Flugbahn	Schweben, Vorwärtsflug
(Cheng and Herrin, 2018)	DJI Mavic Pro	L	Terzbandspektrum Schalldruck in 5,5 m	Intensitätsprobe	Schweben
(EU 2019)	nicht spezifiziert	L	Schallleistung	halbkugelförmige Messfläche gemäß ISO 3744	Schweben
(Fattah et al., 2019)	1,4 kg Quadcopter	L		Mikrofonarray	Schweben und Langsamflug
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX15,17, GPX SkyKing	L	Schallleistung	20 Mik auf Kugel, Radius 0,9 m	fixiert, 10, 50, 60, 70, 80% Leistung
(Heutschi et al., 2020)	DJI Mavic 2 Pro, DJI Inspire 2, DJI S-900, DJI F-450	L	Terzbandspektrum, Schalldruck in 1,5 m	5 Mik auf einem vertikalen Viertelkreis, Radius 1,5 m	Schweben, unterschiedliche Nutzlasten
(Humphreys et al., 2016)	nicht spezifiziert	F		Mikrofonarray	
(Intaratep et al., 2016)	DJI Phantom II	L	Schalldruckpegel dB(A), Leistungsdichtespektrum	1 Mik 1,3 m seitlich, 0,77 m unterhalb -> 1,51 m Abstand, d.h. ca. -40°	Drohne fixiert
(Kloet et al., 2017a)	unspezifizierter Quadcopter	L/F	Schalldruckpegel dB(A)	im Freien: 1 Mik 1 m über Grasboden, verschiedene Entfernungen, Labor: Mikrofonarray	im Freien: Schweben in unterschiedlichen Höhen, Labor: fixiert 50% Leistung
(Klug et al., 2016)	Little Spyder, Align M480L, FPV-Racingcopter	L	Schallleistungspegel	10 Mik in 10° Schritten auf einem vertikalen Viertelkreis, Radius 1,5 m	Drohnen fixiert, unterschiedliche Drehzahlen, direkt angesteuert
(Mobley, 2018)	KittyHawk HDX15,17	L	Schalldruckpegel	20 Mik auf Kugeloberfläche, Radius 1,8 m	Drohne fixiert, verschiedene Leistungssetzungen

Referenz	Drohentyp	Labor/ Feld	Emissionsgrößen	Mikrofone	Manöver / Betriebszustände
(Papa et al., 2016)	Syma X5C, RC Eye One Xtreme	L	Schalleistung	11 Mik auf Halbkugel	Drohne fixiert, 25 bis 100% Leistung
(Putzu et al., 2020)	Parrot Bebop 2, DJI Mavic Pro	L	Schalldruckpegel	1 Mik	durch Luftstrom "simulierter" Vorwärtsflug
(Read et al., 2020)	Yuneec Typhoon, DJI M200, Gryphon Dynamics GD28X	F	$L_{Amax}$ in 400 Fuss und $L_E$	1 Mik 1,2 m über Boden, 1 Mik in Grenzflächenanordnung	Überflüge, Schweben, Start und Landung
(Senzig and Marsan, 2018)	DJI Phantom 2, Prioria Hex	F	$L_{Amax}$ in 400 Fuss	1 Mik in Grenzflächenanordnung auf Bodenplatte	Überflug auf 150 m
(Senzig et al., 2018)	DJI Phantom 3 Advanced	F	$L_{Amax}$ und $L_E$	1 Mik 1,2 m über Boden, 1 Mik in Grenzflächenanordnung auf Bodenplatte	Überflüge auf 25, 50, 100 und 200 Fuß
(Tinney and Sirohi, 2018)	universelle Plattform, quad, hexa	L	Schalldruckpegel	8 Mik sequenziell verschiedene Elevationswinkel und verschiedene Abstände	fixiert, verschiedene Drehzahlen
(Treichel and Körper, 2019)	nicht spezifizierte Modelle	F	Schalldruckpegel, Schalleistungspegel	1 bzw. 8 Mik (für Richtcharakteristik)	Schweben, Stiegen, Sinken, Überflug, Manövrieren
(Zawodny and Pettingill, 2018)	SUI Endurance	L	Schalldruckpegel	Mikrofonarray	fixiert, aber in Windkanal für Simulation Schweben und Vorwärtsflug bei 15,5 m/s
(Zhang et al., 2017)	DJI Inspire-1 T600	F		Mikrofonarray	Schweben auf unterschiedlichen Höhen und Vorwärtsflug
(Zhou et al., 2019)	DJI Phantom 4	L		Mikrofonarray auf Bodenfläche und Linie vertikal	Schweben, Steigen, Vorwärtsflug, Sinken

### 3.3 Ergebnis der Literaturrecherche zum Themenbereich Geräuschmessungen

Einleitend ist festzuhalten, dass sich die Analysen hier ausschließlich auf Untersuchungen zu reinen Multicoptern beziehen. Flächenflugzeuge oder Mischformen werden nicht adressiert.

In der Folge werden zunächst die Studien und die eingesetzten Messverfahren diskutiert (Abschnitt 3.3.1). In einem zweiten Schritt werden in den Untersuchungen verwertbare Emissionswerte identifiziert und in vergleichbare Kennwerte umgerechnet (Abschnitt 3.3.2). Darauf basierend wird ein Modell zur Schätzung der akustischen Emission in Abhängigkeit der Drohnenmasse entwickelt.

#### 3.3.1 Messverfahren

Von den relevanten Studien beschreiben 14 messtechnische Untersuchungen im Labor, 10 Studien dokumentieren Messungen im Feld.

##### 3.3.1.1 Labormessungen

Die Studien, die Labormessungen beschreiben, werden hier wie folgt klassiert:

**Standard-Schalldruck-Labormessungen:** Messungen, die den von einer fixierten bzw. schwebenden Drohne erzeugten Schalldruck an typisch mehreren Positionen direkt erfassen.

**Spezial-Labormessungen:** Messungen, die die Emission der Drohne indirekt, z. B. mittels eines Mikrofonarrays oder einer akustischen Kamera bestimmen oder eine spezielle Laborumgebung erfordern.

##### 3.3.1.1.1 Standard-Schalldruck-Labormessungen

Die Delegierte Verordnung 945/2019 (EU 945/2019) beschreibt eine Geräuschprüfvorschrift für Drohnen und spezifiziert die maximal zulässigen A-bewerteten Schalleistungspegel für verschiedene Drohnenklassen. Die Messung erfasst den Betriebszustand "Schweben in 50 cm Höhe über reflektierendem Boden" und bestimmt die abgestrahlte Schalleistung durch Messung des Schalldrucks auf einer halbkugelförmigen Messfläche. Abgesehen vom Boden müssen Wände und Decken absorbierend bzw. weit genug von der Messanordnung entfernt sein, um keine relevanten Reflexionsbeiträge beizusteuern. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Anlehnung an eine bereits etablierte Methodik, allerdings kann aus den gewonnenen Daten kein direktionales Emissionsmodell abgeleitet werden.

Herreman (2016) ermittelt die abgestrahlte Leistung einer Drohne im reflexionsarmen Raum mit 20 Schalldruck-Mikrofonen, die auf einer Kugeloberfläche mit Radius 0,9 m um die fixierte Drohne aufgebaut werden. Durch Wahl unterschiedlicher elektrischer Leistungssetzungen können verschiedene Betriebszustände der Drohne untersucht werden. Mit Wissen um die für ein bestimmtes Flugmanöver erforderliche Leistung kann eine Zuordnung des Laborwerts zum Manöver erfolgen. Der Messaufwand ist mit 20 Sensoren groß, dafür resultiert ein detailliertes Emissionsmodell. Mit dem Setup können nur kleinere Drohnen vermessen werden und die Übertragbarkeit der Messdaten auf den Betrieb im Freien müsste noch nachgewiesen werden.

Heutschi et al. (2020) bestimmen die Abstrahlung von Drohnen im reflexionsarmen Raum mittels 5 unter verschiedenen Elevationswinkeln angeordneten Schalldruck-Mikrofonen in einem Abstand von 1,5 m vom Quellenzentrum. Die Drohnen werden durch Anbringen verschiedener Gewichte im Zustand "Schweben" bei unterschiedlichen Drehzahlen betrieben, sodass ein drehzahlabhängiges Emissionsmodell entsteht. Der Messaufwand ist mit 5 Sensoren relativ klein, entsprechend wird die Richtcharakteristik in der unteren Halbkugel aber nur mit 4 Stützstellen

modelliert. Die Annahme, dass die akustische Emission einer bestimmten Drohne ausschließlich von der Rotordrehzahl abhängt, müsste noch bestätigt werden.

Ebenfalls im reflexionsarmen Raum untersuchen Intaratep et al. (2016) mit einem einzigen Schalldruck-Mikrofon die Abstrahlung einer fixierten Drohne. Die Mikrofonposition erfasst mit 1,3 m seitlich und 0,77 m unterhalb der Rotorebene einen Abstrahlwinkel von  $-40^\circ$ . Mit diesem Minimal-Setup wird zu wenig Information zur akustischen Emission gewonnen, als dass damit ein Emissionsmodell formuliert werden könnte.

Mit 10 Schalldruck-Mikrofonen, die auf einem vertikalen Viertelkreis mit Radius 1,5 m im reflexionsarmen Raum angeordnet sind, erfassen Klug et al. (2016) die vertikale Abstrahlcharakteristik in  $10^\circ$  Auflösung. Die Drohnen werden fixiert und bei unterschiedlicher elektrischer Leistungssetzung betrieben. Der Messaufwand bleibt mit 10 Sensoren moderat und erlaubt eine genügend fein aufgelöste Erfassung der Richtcharakteristik. Das vorgeschlagene Fixieren der Drohnen birgt den Nachteil, dass die Regler der Ansteuerelektronik in einem unrealistischen Arbeitspunkt operieren.

Mobley (2018) vermisst mit 20 auf einer Kugeloberfläche mit Radius 1,8 m verteilten Schalldruck-Mikrofonen im reflexionsarmen Raum die akustische Abstrahlung von fixierten Drohnen mit unterschiedlicher elektrischer Leistungssetzung. Mit 20 Sensoren ist der instrumentelle Aufwand relativ groß. Auch hier ist der Nachweis der Übertragbarkeit auf den echten Flugbetrieb in realer Atmosphäre ausstehend.

Für die Bestimmung der akustisch abgestrahlten Schalleistung von Drohnen schlagen Papa et al. (2016) eine Messung des Schalldrucks auf einer Halbkugel mit Radius 1,2 m im reflexionsarmen Raum vor. Dabei wird die Drohne fixiert und bei unterschiedlichen elektrischen Leistungssetzungen betrieben. Der Messaufwand ist mit 5 bzw. 10 Sensoren relativ gering. Allerdings ist nicht einsichtig, weshalb die Mikrofonpositionen in der oberen Halbkugel gewählt werden, obwohl in der Regel die Drohne die interessierenden Immissionspunkte überfliegen dürfte.

Tinney and Sirohi (2018) ermitteln in einer Grundlagenuntersuchung die Schallabstrahlung einer Drohne im reflexionsarmen Raum mit 8 Mikrofonen, die entweder in unterschiedlichen Abständen oder Elevationswinkeln aufgestellt werden. Die Drohne wird fixiert bei unterschiedlichen Drehzahlen betrieben. Die Methodik ist nicht direkt geeignet, um ein Emissionsmodell abzuleiten.

### **3.3.1.1.2 Spezial-Labormessungen**

Cheng and Herrin (2018) tasten mit einer Intensitätssonde den Schalldruck und die Schallschnelle auf einer geschlossenen Hülle um die schwebende Drohne ab, um so mit Hilfe des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals auf den Schalldruck an einer beliebigen Position im Fernfeld zu schließen. Dieses Verfahren erscheint sehr aufwändig und generiert im Vergleich zu Standard-Schalldruckmessungen keinen offensichtlichen Mehrwert. Die Modellbeschreibung ist nicht für eine Kopplung an ein Engineering-Ausbreitungsmodell geeignet.

Mit einem aus 72 Mikrofonen bestehenden und auf dem Boden eines großen (10,5 m x 8,4 m x 7 m) reflexionsarmen Raumes ausgelegten Array untersuchen Fattah et al. (2019) die Schallabstrahlung von schwebenden und langsam fliegenden Drohnen. Obwohl die Abmessungen des Labors sogar einen Vorwärtsflugbetrieb möglich machen, muss die Geschwindigkeit in der Größenordnung von 1 m/s so klein bleiben, dass kaum eine realitätsnähere Vermessung als im Zustand Schweben erreicht wird. Das Mikrofonarray erlaubt, in der Arrayebene Schalldruckpegelkarten anzufertigen. Obwohl der instrumentelle Aufwand sehr groß ist, kann die Richtcharakteristik nur in einem eingeschränkten Raumwinkel aufgenommen werden, sodass nicht ein vollständiges Emissionsmodell entsteht.

Mit einer akustischen Kamera untersuchen Kloet et al. (2017a) Teilschallquellen an einer Drohne. Die Messung erlaubt eine qualitative Bewertung der verschiedenen Anteile, wobei die Rotoren an erster Stelle, gefolgt von den Motoren stehen. Die Daten lassen sich nicht direkt in Schallleistung oder Schalldruckpegel in gegebenem Abstand konvertieren. Im Gegensatz zu einer Mikrofonierung mit einzelnen Schalldrucksensoren bietet eine akustische Kamera für die Etablierung eines Emissionsmodells keine Vorteile.

Mit der Überlegung, dass die Schallabstrahlung ausschließlich durch das Zusammenspiel der Drohne mit der umgebenden Luft entsteht, bringen Putzu et al. (2020) die Drohne in ein Labor, in welchem durch eine Vielzahl von Ventilatoren ein Luftstrom erzeugt wird. Dadurch kann bei, hinsichtlich Laborkoordinaten, feststehender Drohne ein Vorwärtsflug "simuliert" werden. Im Unterschied zu einem konventionellen Windkanal erlaubt der sogenannte WindShaper auch die Erzeugung von inhomogenen Windfeldern. Eine bedeutende Einschränkung bei der Messung der Schallabstrahlung stellt das Hintergrundgeräusch der Luftstromerzeugung dar. Eingedenk des hohen Infrastrukturaufwands zur Erzeugung des Windfeldes erscheint diese Anordnung nicht geeignet, um Emissionsmodelle zu erstellen.

Einem zu oben analogen Konzept folgend untersuchen Zawodny and Pettingill (2018) die fixierte Drohne in einem lärmarmen Windkanal und können so bei stationärer Drohne Bedingungen für einen Vorwärtsflug herstellen. Dieses Setup erlaubt sehr gezielte Untersuchungen verschiedenster Aspekte der Schallentstehung, steht aber durch die Erfordernis eines lärmarmen Windkanals nur wenigen Forschungseinrichtungen zur Verfügung.

Zhou et al. (2019) stellen eine ähnliche Untersuchung wie Fattah et al. (2019) vor. Die Experimente wurden im gleichen, riesigen reflexionsarmen Raum durchgeführt, der langsames Vorwärtsfliegen erlaubt. Wiederum wurde ein 72-elementiges horizontales Mikrofonarray eingesetzt, hier aber ergänzt um acht vertikal aufgereichte Mikrofone zur Untersuchung der Abhängigkeit der Abstrahlung vom Elevationswinkel. Der sehr hohe Messtechnikaufwand ist für die Ableitung eines Emissionsmodells kaum gerechtfertigt.

### 3.3.1.2 Feldmessungen

Alexander and Whelchel (2019) und Alexander et al. (2019) beschreiben die Schalldruckmessung von schwebenden und mit 3,2 m/s langsam vorwärtsfliegenden Drohnen über Grasboden. Die fünf Mikrofone sind in Grenzflächenanordnung direkt auf eine 1 m große, akustisch harte Bodenplatte aufgelegt. Bezüglich der Vorwärtsflugbahn sind die Mikrofone auf einer senkrechten Linie angeordnet, um unterschiedliche Abstrahlwinkel abzudecken. Als Signalmerkmal zur Charakterisierung der Emissionsstärke wird der Ereignispegel des Vorbeiflugs verwendet. Der Messaufwand ist moderat, aus den gezeigten Auswertungen der integralen Ereignisenergie für ganze Vorbeiflüge lässt sich jedoch keine explizite Emissionsrichtcharakteristik ableiten.

Die thematisch sehr breit angelegte Masterarbeit von Besnea (2020) beschreibt unter anderem Feldmessungen von schwebenden und vorwärtsfliegenden Drohnen mittels eines Mikrofonarrays. Obwohl diese Sensorik eine Ortung der Quelle erlaubt, scheint der entsprechend hohe Aufwand zur Quellstärkencharakterisierung gegenüber einzelnen Schalldruck-Mikrofonen keine Vorteile zu bieten. Die Untersuchungen lassen sich nicht direkt in eine Messanleitung für Drohnenemissionsmodelle übersetzen.

In Cabell et al. (2016) werden Messungen an verschiedenen schwebenden und vorwärtsfliegenden Drohnen beschrieben. Die Schalldruckmessung erfolgt in Grenzflächenanordnung, bei welcher vier Mikrofone auf je einer 43 cm großen Platte aufgelegt sind. Die Mikrofone sind auf einer Linie senkrecht zur Flugbahn angeordnet, der A-bewertete maximale Schalldruckpegel charakterisiert einen Flug. Mit Invertierung der Ausbreitungsdämpfung (Rückrechnung zur Quelle) und

dem Vergleich der Maximalpegel an den verschiedenen Mikrofonen kann ein winkelabhängiges Emissionsmodell gefunden werden. Das Erfassen von seitlichen Abstrahlwinkeln erfordert allerdings große Mikrofonabstände, was die Rückrechnung auf die Quelle unsicher macht.

Ein großes, feldtaugliches 180-elementiges Mikrofonarray in Grenzflächenanordnung zur Messung von Drohnenflügen stellen Humphreys et al. (2016) vor. Nebst der Möglichkeit der Quellenlokalisierung bietet die Mikrofonanordnung auch die Möglichkeit, synchron die bei unterschiedlichen Abstrahlwinkeln entstehenden Schalldrucksignale zu analysieren. Der messtechnische Aufwand ist sehr hoch und somit für die Emissionsmodellermittlung kaum geeignet.

Kloet et al. (2017a) dokumentieren Messungen einer in unterschiedlicher Höhe schwebenden Drohne mit einem Schalldruck-Mikrofon auf 1 m Höhe über Grasboden. Das Mikrofonensignal wird anhand des A-bewerteten Summenpegels charakterisiert. Auf die Problematik der durch das Zusammenspiel zwischen Direkt- und bodenreflektiertem Schall hervorgerufenen Interferenz wird nicht eingegangen. Die Messanordnung ist in dieser Form nicht für die Emissionsmodellierung geeignet.

Senzig and Marsan (2018) demonstrieren die Emissionscharakterisierung anhand eines Drohnenüberflugs auf 150 m Höhe. Der dadurch erzeugte Schalldruck wird mit einem Mikrofon auf einer Bodenplatte in Grenzflächenanordnung gemessen, auf 400 Fuß (122 m) Abstand zur Quelle umgerechnet und als A-bewerteter Maximalpegel ausgewiesen. Das so entstehende Emissionsmodell weist keine Winkelabhängigkeit auf und ist in dieser Form nicht für beliebige Immissionsprognosen geeignet.

In einer ähnlichen Untersuchung vergleichen (Read et al., 2020) und Senzig et al. (2018) die Schalldrucksignale von Drohnenüberflügen an einem auf 1,2 m über Boden installierten Mikrofon und einem in Grenzflächenanordnung direkt auf einer Bodenplatte aufgesetzten Mikrofon. Dabei werden die Überflugereignisse durch den Maximal- und den Ereignispegel charakterisiert. Erwartungsgemäß sind die in Grenzflächenanordnung gemessenen Pegel durchweg höher als auf 1,2 m. Die festgestellten A-Pegel Differenzen belaufen sich auf typisch 2 dB. Das so entstehende Emissionsmodell weist keine Winkelabhängigkeit auf und ist in dieser Form nicht für beliebige Immissionsprognosen geeignet.

Für unterschiedliche Drohnen-Betriebszustände zeigen Treichel and Körper (2019) A-bewertete Schalldruckpegel, die mit mehreren Mikrofonen auf unterschiedlichen Höhen über reflektierendem Boden resultieren. Mit jeweils acht simultan aufzeichnenden Mikrofonen werden für den Zustand Schweben horizontale und vertikale Richtcharakteristika erhoben. Mit moderatem Messaufwand werden Daten erhoben, die sich in ein direktionales Emissionsmodell übersetzen lassen. Da die Mikrofone nicht in jedem Fall weit vom Boden entfernt oder dann in Grenzflächenanordnung aufgebaut waren, sind die Daten als Folge der Interferenz zwischen bodenreflektiertem und Direktschall spektral verzerrt.

Mit einem 40-elementigen und in Grenzflächenanordnung installierten Mikrofonarray untersuchen Zhang et al. (2017) das Schweben und Vorwärtsfliegen einer Drohne auf unterschiedlichen Höhen. Das Augenmerk der Studie liegt auf dem Beamforming, welches die akustische Lokalisierung der Drohne ermöglicht. Der beträchtliche Aufwand ist für die Ableitung eines Emissionsmodells nicht gerechtfertigt.

### 3.3.1.3 Zusammenfassung der in den Studien eingesetzten Labor- und Feldmessverfahren

Die eingesetzten Messverfahren zur Erfassung des von Drohnen abgestrahlten Schalls lassen sich – sowohl im Labor als auch im Feld – in die beiden Klassen:

- ein- und unabhängig-mehrkanalige Mikrofonanordnungen *und*

► Array-Mikrofonanordnungen mit Phasenbezug zwischen den Sensoren

aufteilen. Die meisten Studien gehen von einer zumindest in der Vertikalen ausgeprägten, un-runden Abstrahlcharakteristik aus. Diese Richtcharakteristik wird entweder mit mehreren, un-ter-schiedliche Winkel abdeckende, Mikrofonen erfasst, oder es wird mit einem Mikrofon ein-gan-zes Überflugereignis ausgewertet und durch den Ereignis- oder Maximalpegel charak-terisiert. Die Abhängigkeit der akustischen Emission von der elektrischen Leistung bzw. der Dreh-zahl wird in mehreren Studien im Labor untersucht und in ein Emissionsmodell umgesetzt. Auf dieser Grundlage kann damit die Emission im realen Flug geschätzt werden.

In der Mehrzahl der Messungen wird die Bodenreflexion entweder weitgehend unterdrückt (praktisch alle Labormessungen) oder dann durch Grenzflächenanordnung und der daraus ent-stehenden Schalldruckverdopplung einfach korrigierbar gemacht.

Wie gezeigt wird, können die Array-Mikrofonanordnungen mittels Beamforming zur Quellenlo-kalisierung eingesetzt werden, oder – in unserem Kontext relevanter – zeitabhängige Schall-druckpegelkarten in der Bodenebene erzeugen. Damit werden direkt zweidimensionale Richt-wirkungseffekte ablesbar.

Gegenüber gewöhnlichen Labormessungen bieten Untersuchungen im Windkanal bedeutende Vorteile und ermöglichen einen realitätsnahen Betrieb der Drohne. Allerdings ist der apparative Aufwand sehr hoch und auf Grund des hohen Hintergrundgeräusches der nutzbare Frequenzbe-reich eingeschränkt.

**3.3.2 Emissionswerte**

In einer separaten Analyse wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Untersuchungen hinsichtlich genügend gut dokumentierter und nachvollziehbarer Messwerte durchgesehen. Da die Untersu-chungen sehr heterogen sind und sich wesentlich hinsichtlich der Messanordnung, der Drohnen-modelle und -betriebszustände sowie der ausgewiesenen Messwerte unterscheiden, musste eine rigorose Selektion vorgenommen werden. So wurden für diese Auswertung nur Studien heran-gezogen, die

- das untersuchte Drohnenmodell mindestens durch Angabe der Masse genügend gut be-schreiben,
- als Betriebszustand der Drohne "Schweben" und/oder " Vorwärtsflug" untersuchten und
- die Geometrie der Drohnen- und Mikrofonposition ausreichend genau beschreiben.

Insgesamt 10 Studien erfüllten diese Kriterien. Tabelle 6 und Tabelle 7 listen die herausgelese-ten und hier interessierenden Messdaten auf. Die Winkelangaben zur Abstrahlung sind aus Sicht der Drohne als Elevation bzgl. des durch die Rotorebene gebildeten Horizonts zu verstehen. Ein negatives Vorzeichen bezeichnet eine Abstrahlung nach unten, -90° ist die Richtung senkrecht nach unten.

**Tabelle 6 In der gefundenen Literatur dokumentierte Messdaten für den Zustand Schweben**

Kennung	Drohnenmodell	Startmasse [kg]	Messwerte
(Alexander and Whelchel, 2019)	DJI Matrice 600 Pro, Hexa	9,5	Schalldruck-Ereignispegel jeweils wäh- rend 14 s in Grenzflächenanordnung: -30°, in 18,29 m: 79,2 dB(Z)

Kennung	Drohnenmodell	Startmasse [kg]	Messwerte
			-45°, in 12,93 m: 83,7 dB(Z) -60°, in 10,56 m: 87,3 dB(Z) -75°, in 9,46 m: 88,7 dB(Z) -90°, in 9,14 m: 89,6 dB(Z)
(EU 2019)	nicht spezifiziert	0,9	Bei Inkrafttreten zulässiger Schallleistungspegel $L_{W,A}$ : 85 dB(A)
(EU 2019)	nicht spezifiziert	4,0	Bei Inkrafttreten zulässiger Schallleistungspegel $L_{W,A}$ : 97 dB(A)
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX17	(5,0)	Schallleistungspegel $L_{W,A}$ : 102,6 dB(A)
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX15	(4,0)	Schallleistungspegel $L_{W,A}$ : 97,2 dB(A)
(Herreman, 2016)	SkyKing	(1,0)	Schallleistungspegel $L_{W,A}$ : 74,1 dB(A)
(Intaratep et al., 2016)	DJI Phantom II	1,0	Schalldruckpegel -40°, in 1,5 m: 70 dB(A)
(Kloet et al., 2017a)	Eigenbau	2,1	Schalldruckpegel -30°, in 19 m, gemessen 1 m über Gras: 54 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI Mavic 2 Pro	0,9	Schalldruckpegel -30°, in 1 m: 71,2 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI Inspire 2	3,4	Schalldruckpegel -30°, in 1 m: 78,6 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI S-900	3,3	Schalldruckpegel -30°, in 1 m: 86,7 dB(A)

Anmerkung: Geklammerte Werte sind Circaangaben.

**Tabelle 7 In der gefundenen Literatur dokumentierte Messdaten für den Zustand Vorwärtsflug**

Kennung	Drohnenmodell	Startmasse [kg]	Messwerte
(Alexander and Whelchel, 2019)	DJI Matrice 600 Pro, Hexa	9,5	Schalldruck-Ereignispegel jeweils während 14 s in Grenzflächenanordnung für Vorbeiflug mit 3,2 m/s auf 7,5 m Höhe seitlicher Abstand 15,8 m: 75,9 dB(A) seitlicher Abstand 9,1 m: 79,6 dB(A) seitlicher Abstand 5,3 m: 82,7 dB(A) seitlicher Abstand 2,5 m: 84,0 dB(A) seitlicher Abstand 0,0 m: 85,3 dB(A)
(Cabell et al., 2016)	DJI Phantom 2	1,6	Maximaler Schalldruckpegel für schnellen Überflug auf 15 m: 62 dB(A)
(Cabell et al., 2016)	Prioria Hex	7,3	Maximaler Schalldruckpegel für schnellen Überflug auf 15 m: 65 dB(A)
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX17	(5,0)	Schallleistungspegel für langsamen Vorwärtsflug $L_{W,A}$ : 104,0 dB(A)

Kennung	Drohnenmodell	Startmasse [kg]	Messwerte
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX15	(4,0)	Schallleistungspegel für langsamen Vorwärtsflug $L_{W,A}$ : 97,9 dB(A)
(Herreman, 2016)	KittyHawk HDX15	(4,0)	Schallleistungspegel für schnellen Vorwärtsflug $L_{W,A}$ : 98,2 dB(A)
(Herreman, 2016)	SkyKing	(1,0)	Schallleistungspegel für schnellen Vorwärtsflug $L_{W,A}$ : 77,2 dB(A)
(Senzig and Marsan, 2018)	DJI Phantom 2	1,6	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 400 Fuß: 44,9 dB(A)
(Senzig and Marsan, 2018)	Prioria Hex	2,5	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 400 Fuß: 45,9 dB(A)
(Senzig et al., 2018)	DJI Phantom 3 Advanced	1,3	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 25 Fuß: 69,8 dB(A)
(Treichel and Körper, 2019)	Mittel über mehrere Modelle	(1,5)	Maximaler Schalldruckpegel in 1,2 m über hartem Boden für Überflug auf 5 m: 68,8 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI Mavic 2 Pro	0,9	Aus beschwertem Schweben geschätzter Schalldruckpegel $-30^\circ$ , in 1 m: 72,8 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI Inspire 2	3,4	Aus beschwertem Schweben geschätzter Schalldruckpegel $-30^\circ$ , in 1 m: 82,3 dB(A)
(Heutschi et al., 2020)	DJI S-900	3,3	Aus beschwertem Schweben geschätzter Schalldruckpegel $-30^\circ$ , in 1 m: 92,4 dB(A)
(Read et al., 2020)	Yuneec Typhoon	2,4	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 400 Fuß: 50,1 dB(A)
(Read et al., 2020)	DJI M200	6,1	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 400 Fuß: 51,8 dB(A)
(Read et al., 2020)	Gryphon Dynamics GD28X	20,4	Maximaler Schalldruckpegel in Grenzflächenanordnung für Überflug auf 400 Fuß: 62,0 dB(A)

Anmerkung: Die Referenzen (Cabell et al., 2016) und (Senzig and Marsan, 2018) führen beide ein Drohnenmodell "Prioria Hex" auf, spezifizieren dazu aber unterschiedliche Massen, was auf verschiedene Zuladungen schließen lässt. Geklammerte Werte sind Circaangaben.

Um die Messdaten der verschiedenen Studien auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen, wurde als Kenngröße zur Charakterisierung der akustischen Emission der A-bewertete Schalldruckpegel ( $L_{p,A,1m,-30^\circ}$ ) in 1 m Abstand bei Freifeldbedingungen und unter einem Abstrahlwinkel von  $-30^\circ$  bezüglich der Rotorebene eingeführt.

Für die Konvertierung der unterschiedlichen Messgrößen in diesen Emissionswert wurden situativ folgende Normalisierungen bzw. Umrechnungen vorgenommen:

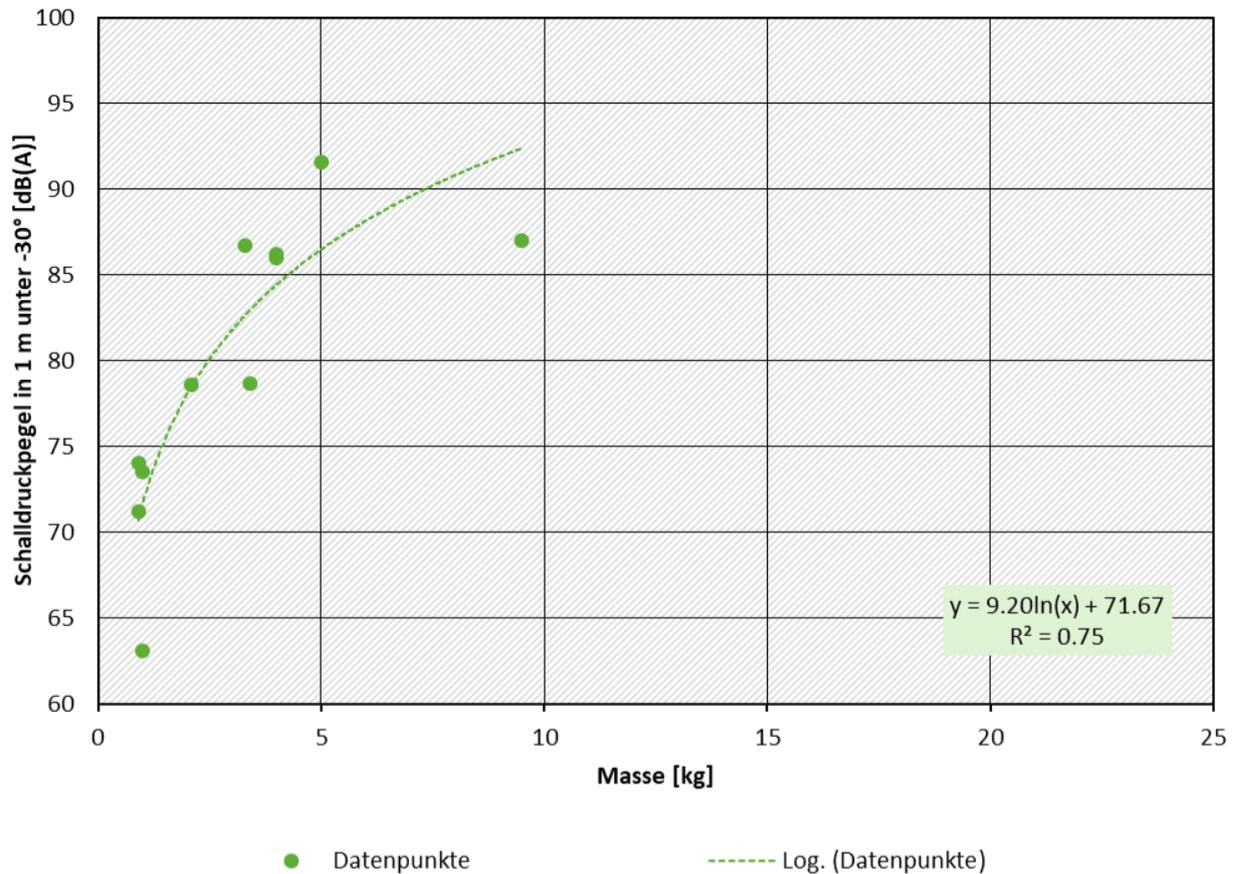
- ▶ Übersetzung dB(Z) in dB(A): Für ein typisches Drohnen-Emissionsspektrum differieren die beiden Summenpegel nur wenig, wo nötig werden sie daher gleichgesetzt.
- ▶ Geometrische Verdünnung: Punktquellenverhalten in der Form von  $-20 \log(d)$ .
- ▶ Für eine Mikrofon-Grenzflächenmontage auf einer Bodenplatte wird bezogen auf Freifeld eine Schalldruckverdopplung bzw. eine Pegelerhöhung von 6 dB angenommen.
- ▶ Es wird angenommen, dass die Drohne im A-Pegel senkrecht nach unten 3 dB(A) mehr abstrahlt als unter  $-30^\circ$ .
- ▶ Aus dem Schalleistungspegel  $L_{W,A}$  wird mit:  $L_{p,A,1m,-30^\circ} = L_{W,A} - 11$  dB auf den Emissionswert geschlossen. Senkrecht nach unten würde mit dieser Beziehung der Schalldruck unter- und in der Horizontalebene überschätzt, bei  $-30^\circ$  wird angenommen, dass es gerade stimmt.
- ▶ Die verstärkende Wirkung des Bodens für ein Mikrofon in 1,0 bis 1,2 m Höhe über Grasland wird zu 1 dB(A) angenommen.
- ▶ Die verstärkende Wirkung des Bodens für ein Mikrofon in 1,0 bis 1,2 m Höhe über hartem Grund wird zu 3 dB(A) angenommen.

Mit diesen Annahmen ergeben sich für die beiden Betriebszustände Schweben und Vorwärtsflug die in Abbildung 9 und Abbildung 10 gezeigten Datenpunkte und logarithmischen Emission/Gewichtsmodelle.

**Abbildung 9** Freifeldemissionswerte von Drohnen der Bauform „Multicopter“ als A-bewerteter Schalldruckpegel in 1 m Abstand für einen Abstrahlwinkel von -30° in Abhängigkeit des Drohnengewichts für den Betriebszustand Schweben.

### Emissionsstärke von Multicoptern

Schweben

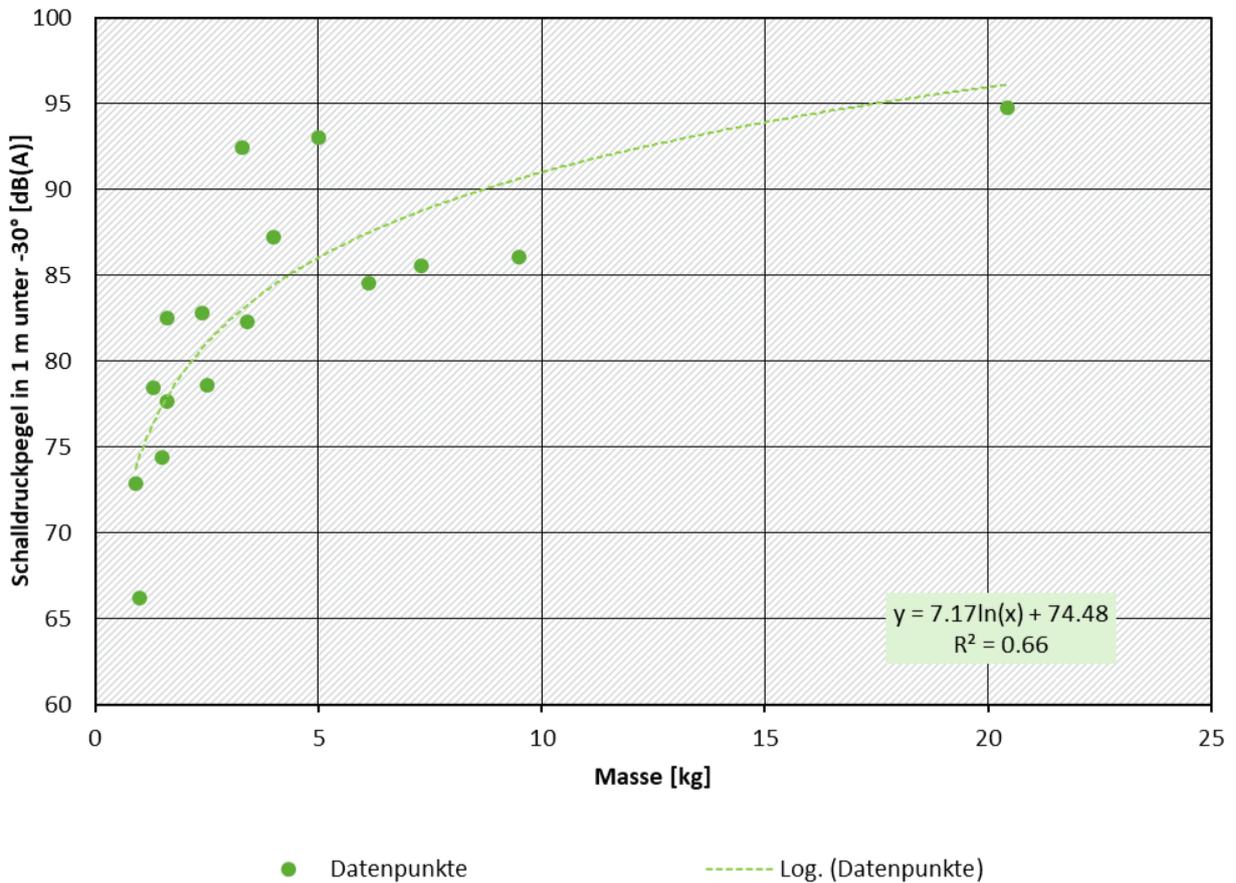


Quelle: eigene Darstellung Empa

**Abbildung 10** Freifeldemissionswerte von Drohnen der Bauform „Multicopter“ als A-bewerteter Schalldruckpegel in 1 m Abstand für einen Abstrahlwinkel von -30° in Abhängigkeit des Drohnengewichts für den Betriebszustand Vorwärtsflug.

**Emissionsstärke von Multicoptern**

Vorwärtsflug



Quelle: eigene Darstellung Empa

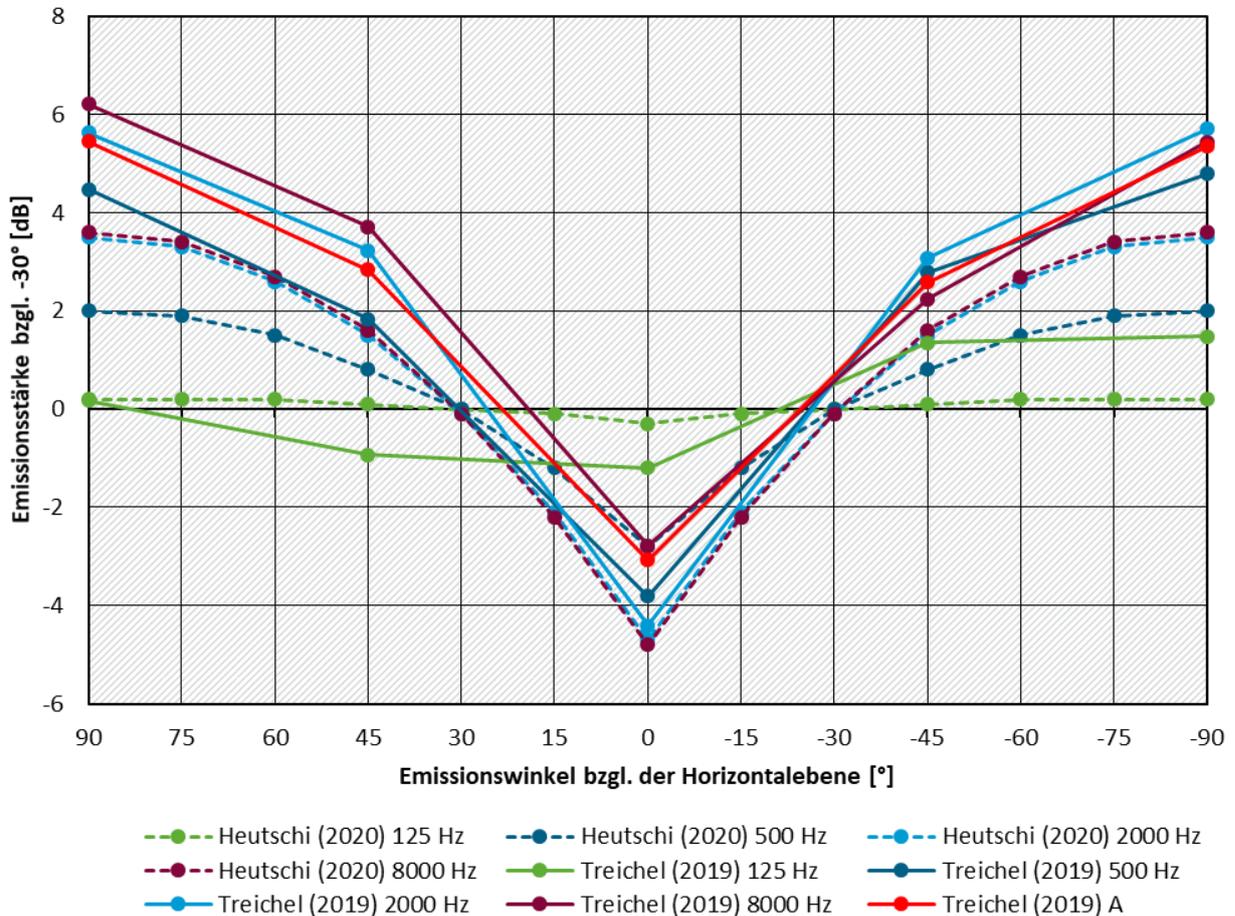
**3.3.3 Vertikale Richtcharakteristik**

Zwei der gefundenen Referenzen machen spektrale und winkelspezifische Angaben zur Gesamtsystem-Richtcharakteristik von Drohnen der Bauform "Multicopter". Die Messungen von Treichel und Körper (2019) stellen das Mittel aus drei verschiedenen im Freien vermessenen Drohnenmodellen dar, die Daten aus Heutschi et al. (2020) repräsentieren eine generische spektrale Richtcharakteristik, die aus Labormessungen an fünf verschiedenen, bei unterschiedlichen Drehzahlen betriebenen, Drohnenmodellen abgeleitet wurde. Für die in Abbildung 11 gezeigte Übersicht sind alle Angaben auf eine Abstrahlung in Richtung -30° (unter Horizont) bzgl. der Propellerebene bezogen worden.

Abbildung 11 Vertikale Schallabstrahlungscharakteristik von Multicoptern.

### Richtcharakteristik von Multicoptern

Vertikalebene



Quelle: eigene Darstellung Empa

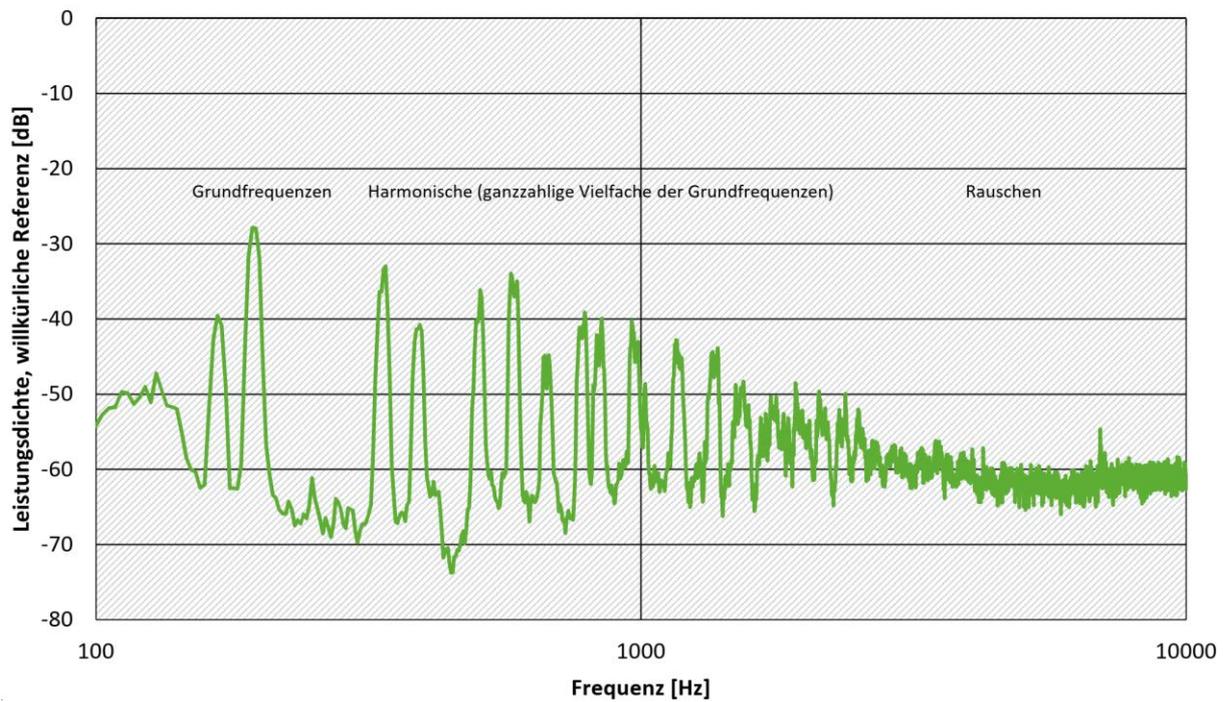
### 3.3.4 Exemplarische Spektren

Als spektrale Merkmale der akustischen Emission von Multicoptern fallen

- ▶ tief- und mittenfrequent die an die Rotordrehzahl gekoppelten tonalen und harmonischen Komponenten und
- ▶ hochfrequent ein breitbandiges Rauschen, dessen Leistungsdichte mit der Frequenz schwach abnimmt,

auf. Zur Illustration zeigt Abbildung 12 ein von Kurt Heutschi unter  $-30^\circ$  gemessenes Leistungsdichtespektrum einer im Labor schwebenden DJI Mavic 2 Pro Drohne. Die tonalen Komponenten treten jeweils paarweise mit leicht unterschiedlichen Frequenzen auf. Dies demonstriert den Betrieb der vier Propeller in zwei Gruppen.

**Abbildung 12** Beispielhaftes Leistungsdichtespektrum einer im Zustand Schweben im Labor untersuchten DJI Mavic 2 Pro Drohne.



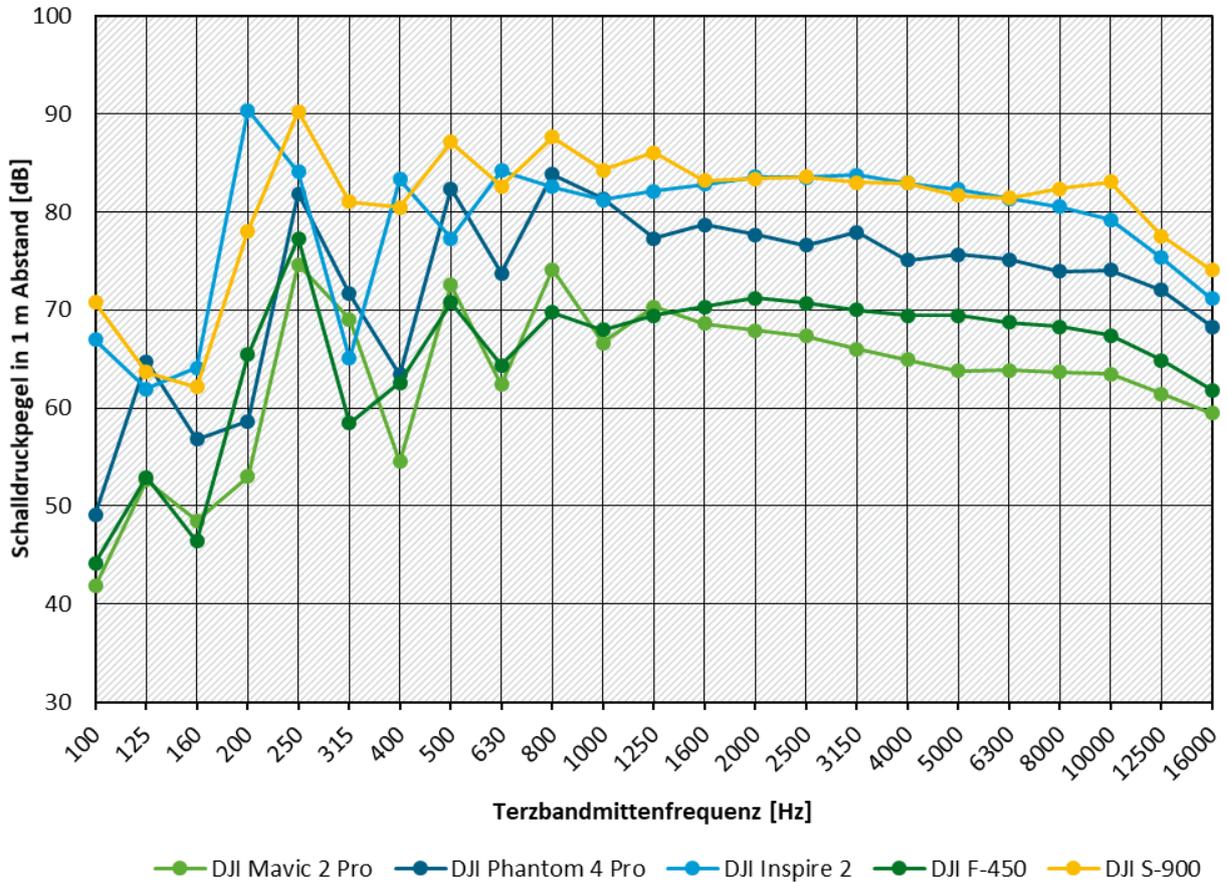
Quelle: eigene Darstellung Empa

In der spektral gröberen Auflösung von Terz- bzw. Oktavbändern verschwinden mit anwachsender Mittenfrequenz und der entsprechend zunehmenden Bandbreite die Überhöhungen und Einbrüche. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen für verschiedene, im Labor bei maximaler Leistung betriebene Drohnenmodelle die Terz- und Oktavbandspektren des Schalldruckpegels in 1 m Abstand unter  $-30^\circ$  (Messungen: Kurt Heutschi).

**Abbildung 13** Beispielhafte Terzbandspektren der Emission von verschiedenen Drohnen bei maximaler Leistung im Labor unter -30°.

**Emissionsstärke verschiedener Drohnen bei maximaler Leistung**

Terzbandauflösung

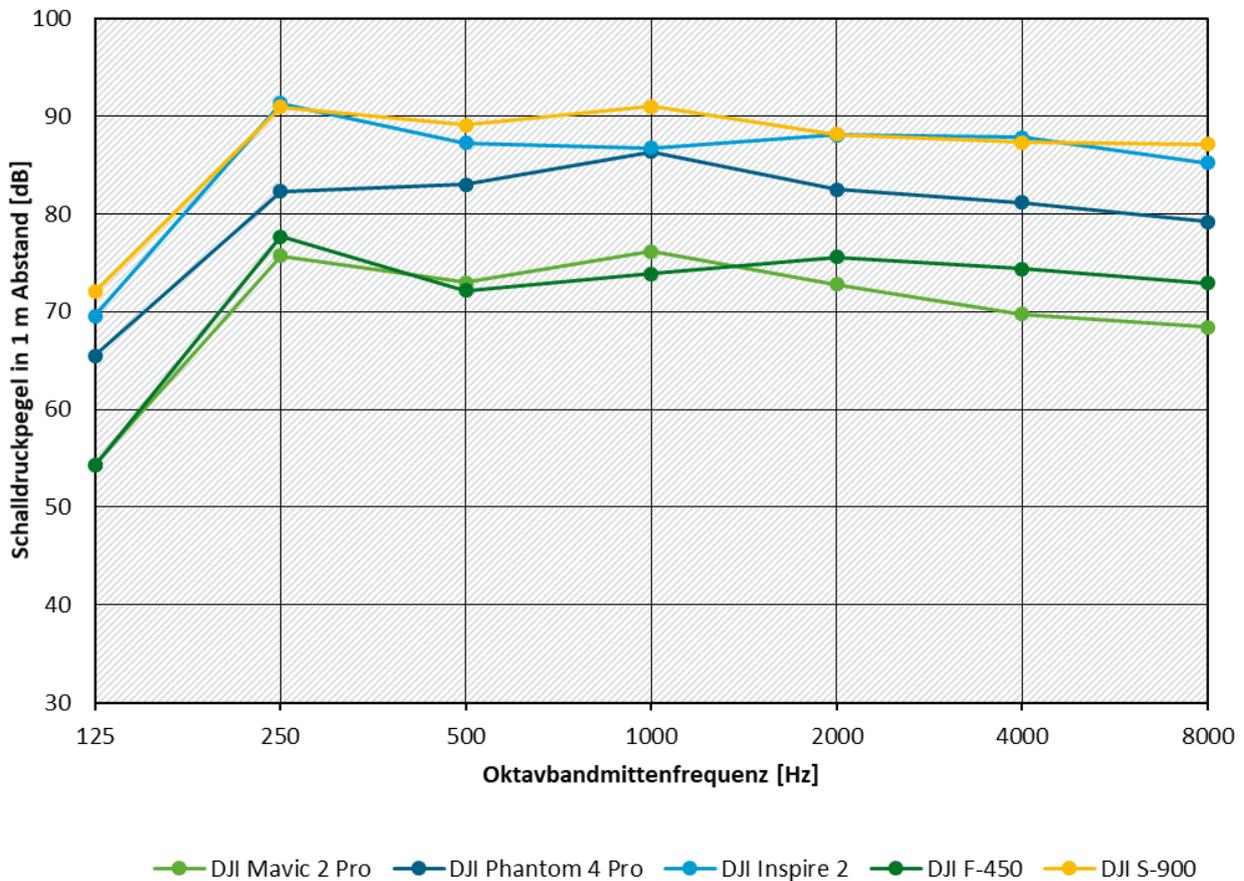


Quelle: eigene Darstellung Empa

**Abbildung 14 Beispielhafte Oktavbandspektren der Emission von verschiedenen Drohnen bei maximaler Leistung im Labor unter -30°.**

**Emissionsstärke verschiedener Drohnen bei maximaler Leistung**

Oktavbandauflösung



Quelle: eigene Darstellung Empa

**3.3.5 Folgerungen für die Vermessung von akustischen Drohnenemissionen**

Einleitend werden die wichtigsten Aspekte der Drohne als akustische Quelle zusammengefasst:

- ▶ Verschiedene Untersuchungen belegen, dass in der Vertikalen von einer bedeutenden Winkelabhängigkeit der Abstrahlstärke auszugehen ist. In der Horizontalen wird aus Symmetriegründen eine gleichmäßige Abstrahlung erwartet.
- ▶ Die Emissionsstärke hängt wesentlich vom Drohnenmodell und einer eventuellen Zuladung sowie vom Betriebszustand bzw. dem Flugmanöver ab.
- ▶ Anhand von theoretischen Überlegungen zum Kräftegleichgewicht und aus experimentellen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass ein Zusammenhang zwischen Betriebszustand und Rotordrehzahl besteht. Es liegt damit auf der Hand, ein drehzahlabhängiges Emissionsmodell zu formulieren und dann mit Wissen um die erforderliche manöverabhängige Drehzahl die Emission für einen beliebigen Betriebszustand zu schätzen. Diesem Ansatz steht allerdings im Weg, dass beim Horizontalflug eine Vorwärtsbewegung erst durch unterschiedli-

che Drehzahlen der vorderen bzw. hinteren Rotoren möglich wird. Da für die Schallentstehung auch die Interaktion zwischen den Rotoren eine Rolle spielt, kann dieser Fall nicht ohne weiteres aus einem typischerweise für Schweben gewonnenen Drehzahl-Emissionsmodell geschätzt werden.

Unter Berücksichtigung der erwähnten akustischen Eigenschaften sind folgende Ansprüche an ein Drohnen-Emissionsmodell zu stellen:

- ▶ Das Modell muss die vertikale Abstrahlcharakteristik beschreiben und nachbilden können.
- ▶ Das Modell muss die Emissionsstärke für unterschiedliche Betriebszustände ausweisen.
- ▶ Das Modell muss die Emission als Abstrahlung ins Freifeld ausdrücken, damit eine einfache Kopplung an ein Schallausbreitungsmodell für die Berechnung der Immission an einem beliebigen Empfängerpunkt möglich ist.

Die Übersetzung der Anforderungen an das Emissionsmodell in eine Messvorschrift birgt folgende Herausforderungen:

- ▶ Die Abstrahlcharakteristik ist am zuverlässigsten für eine positionsfeste oder sich nur langsam bewegende Drohne bestimmbar. Beim schnellen Überfliegen eines Mikrofons wird zwar bei geeigneter Geometrie ein insgesamt großer Winkelbereich überstrichen, allerdings sind die typischen Winkeländerungen pro Zeiteinheit so groß, dass keine ausreichenden Mittelungszeiten erzielt werden. Damit werden die elevationswinkelbezogenen Schätzungen grundsätzlich unsicher.
- ▶ Die Rückrechnung eines Mikrofonsignals zurück zur Quelle (Invertierung) muss bei freier Ausbreitung die Phänomene:
  - geometrische Verdünnung
  - Luftdämpfung
  - Bodeneffekt

berücksichtigen. Mit entsprechender Kenntnis der Geometrie, der Lufttemperatur und Luftfeuchte sind die ersten beiden Ausbreitungseffekte mit guter Genauigkeit kompensierbar, für die Invertierung des Bodeneffekts muss die Bodenbeschaffenheit und ein entsprechendes Bodenreflexionsmodell zur Verfügung stehen.

- ▶ Um die Vergleichbarkeit künftiger Studien untereinander zu begünstigen, wäre eine Festlegung eines Minimal-Sets an akustischen Messgrößen sowie deren exakten Bestimmung anzustreben. Abhängig vom Flugmanöver bieten sich dazu für Überflüge Maximal- oder Ereignispegel, für den Schwebezustand energieäquivalente Mittelungspegel ( $L_{eq}$ ) an.

Vor obigem Hintergrund könnte ein pragmatisches Emissionsmodell und das daraus abgeleitete Messkonzept folgende Annahmen treffen:

- ▶ Das Emissionsmodell unterscheidet die Betriebszustände: Schweben, Steigen, Sinken und Horizontalflug mit "typischer" Vorwärtsgeschwindigkeit.

- Für alle Betriebszustände wird eine identische relative vertikale spektrale Richtcharakteristik angenommen.

Damit ließe sich in einem ersten Schritt die Richtcharakteristik für den Betriebszustand Schweben im Labor oder im Freien mit Mikrofonen in großer Höhe oder in Grenzflächenanordnung am Boden (und Halbierung der Signalamplitude) messen. Der Mikrofonaufwand kann minimiert werden, wenn die Drohne auf unterschiedlichen Höhen schwebt oder sogar ganz langsam aufsteigt.

In einem zweiten Schritt würden die Betriebszustände Steigen, Sinken und Horizontalflug vermessen, wobei dank der als bekannt angenommenen Richtcharakteristik als Ankerpunkt das Signal bei einer einzigen Drohnenposition genügt. Das Mikrofon würde wiederum vorteilhaft entweder hoch über Boden oder in Grenzflächenanordnung installiert.

In jedem Fall ist eine exakte zeitliche Synchronisation zwischen der akustischen Aufzeichnung und dem die Drohnenposition registrierenden System erforderlich. Die Anforderung an die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt von der Geometrie ab. In jedem Fall sind zu kleine Abstände zu vermeiden um sicherzustellen, dass die Drohne als Punktquelle aufgefasst werden kann und die von den Drohnenrotoren verursachte Luftbewegung an den Mikrofonen keine nennenswerten Windgeräusche erzeugt. Die Auswertung der Mikrofonensignale müsste für das Emissionsmodell zumindest terzbandaufgelöste Schalldruckpegel bereitstellen. Für die Bestimmung der Tonalität und weiterer Parameter sollten zudem die Audiosignale erfasst werden.

## 4 Literaturrecherche zu psychoakustischen Untersuchungen

### 4.1 Genereller Ansatz und Methodik

Ausgehend vom generellen Ablauf der Literaturrecherche gemäß PRISMA (Moher et al., 2009; Ziegler et al., 2011) (vgl. auch Kap. 2) wurde die Methodik für die Literaturrecherche zu psychoakustischen Untersuchungen konkretisiert. Hierfür wurde das publizierte Studienprotokoll PROSPERO 2013 CRD42013006004 (Seidler et al., 2013), welches beispielsweise in Weihofen et al. (2019) und Hegewald et al. (2020) verwendet worden war, auf die vorliegende Fragestellung angepasst. Dieses Protokoll wurde als geeigneter Ausgangspunkt für die vorliegende Recherche erachtet, da es für ein systematisches Review zum verwandten Thema "Fluglärm und extra-aurale Gesundheitsbeschwerden und Krankheiten" (Seidler et al., 2013) verwendet worden war.

### 4.2 Forschungsfrage und Kriterien für den Studienein- bzw. ausschluss

Die offen gehaltene Aufgabe "*Literaturrecherche zu psychoakustischen Untersuchungen*" wurde mittels folgender Forschungsfrage konkretisiert:

*Haben Personen, welche Drohnenlärm ausgesetzt sind, ein erhöhtes Risiko auf Lärmbelästigung und/oder andere extra-aurale Gesundheitsauswirkungen?*

Da psychoakustische Untersuchungen im Vordergrund stehen, liegt der Fokus auf der Wirkungsdimension "Lärmbelästigung" (bzw. "Lästigkeit"; vgl. Abschnitt 4.4.2). Es werden aber auch generell Gesundheitsauswirkungen in der Literatursuche berücksichtigt. Basierend auf obiger Forschungsfrage werden die Ein- und Ausschlusskriterien mittels Population-Exposure-Outcome (PEO) Schema sowie mittels weiterer Kriterien (z. B. keine Review-Artikel) gemäß Tabelle 8 festgelegt. Dabei werden die Einschlusskriterien weiter mit dem Suchstring (Abschnitt 2.2.1.2) konkretisiert, während die Ausschlusskriterien vor Durchführung des Screenings definiert werden (Abschnitt 4.3.1.4). Die Einschlusskriterien wurden sehr breit gefasst, da erwartet wurde, dass zurzeit noch nicht viele psychoakustische Untersuchungen zu Drohnenlärm greifbar sind. Hier sollte ein möglichst vollständiger Überblick geschaffen werden.

**Tabelle 8 Ein- und Ausschlusskriterien gemäß Population-Exposure-Outcome (PEO) Schema**

Kategorie	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Population (P)	Bevölkerung (Menschen, d.h. Kinder und Erwachsene)	Tiere
Exposure (E)	Drohnenlärm/-schall	Andere (Umwelt-)Lärmquellen
Outcome (O)	Lärmbelästigung allgemein Gesundheit	-
Weitere	-	Review-Artikel, Zeitungsartikel, Briefe usw. Referenzen zu vollständigen Konferenz-Tagungsbänden anstatt individuellen Konferenzartikeln

Bei der Beantwortung obiger Forschungsfrage wurde das Augenmerk zudem auf folgende Aspekte gelegt:

- ▶ Welche Rolle spielen die nicht-akustischen **Moderatoren** (Definition vgl. z. B. Field-Fote, 2019) visuell-akustische Interaktionen und Kontext (bzw. Akzeptanz) für die Lärmwirkungen von Drohnen?
- ▶ Welche Rolle spielen **tonale Eigenschaften** für die Lärmwirkungen von Drohnen?
- ▶ Können, basierend auf der verfügbaren Literatur, **Pegelkorrekturen** (Störungs- und Tonaltätszuschläge) im Vergleich zu bekannten Referenzquellen wie Straßenverkehrslärm definiert werden?
- ▶ Mit welchen **akustischen bzw. psychoakustischen Parametern** kann die Lärmwirkung von Drohnen gut vorausgesagt werden?

**Bemerkung:** In Anlehnung an die Definition im Duden<sup>14</sup> wird **Kontext** hier verstanden als ein Sach- und Situationszusammenhang, welcher den Teilnehmenden einer psychoakustischen Untersuchung zu Beginn gegeben wurde (z. B. dass es sich um Drohnengeräusche handelt, ob es sich um Rettungs- oder kommerzielle Drohneneinsätze handelt usw.). Der Kontext einer Lärmexposition kann deren Wirkung auf die Teilnehmer (beziehungsweise generell auf die Bevölkerung) stark beeinflussen. So wird der Lärm von Rettungshelicoptern eher in Kauf genommen als von Privatflügen, und es kann davon ausgegangen werden, dass eine höhere **Akzeptanz** die Lärmbelastigung vermindert. **Individuelle Charakteristiken** wie Alter, Geschlecht, Lärmsensitivität, Einstellung zur Lärmquelle usw., welche die für Lärmwirkung ebenfalls eine wichtige Rolle spielen können, werden hier als zusätzliche, vom Kontext unabhängige Einflussvariablen verstanden; deren Einfluss ist im Feld oft ausgeprägter als im Labor (vgl. z. B. Schäffer et al., 2016). Daneben können auch **visuell-akustische Interaktionen** die Lärmwirkung beeinflussen. Bei Drohnen kann davon ausgegangen werden, dass vor allem Bedenken zur Sicherheit und Privatsphäre eine Rolle spielen, welche durch sichtbare Drohnen verstärkt werden können.

## 4.3 Formalismus der Literaturrecherche

### 4.3.1 Suchstrategien

#### 4.3.1.1 Elektronische Datenbanksuche

Die elektronische Datenbanksuche erfolgte in folgenden Datenbanken (in Klammern die durchsuchten Felder):

- ▶ Web of Science (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ Scopus (inkl. Embase) (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ MEDLINE (via PubMed) (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ PsycInfo (über ProQuest) (Alle Felder)
- ▶ Ingenta-Connect (Title/Keywords/Abstract)
- ▶ Psynindex (über PubPsych) (Schlagwörter, Titel, Autor, Quelle, ISSN/ISBN, Abstract)

---

<sup>14</sup> Duden: Bedeutung von Kontext: "... c) inhaltlicher Gedanken-, Sinnzusammenhang, in dem eine Äußerung steht, und Sach- und Situationszusammenhang, aus dem heraus sie verstanden werden muss" ULR: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Kontext> (zuletzt besucht am 17.03.2021).

- ▶ Google Scholar (Title)
- ▶ Konferenzbeiträge: Inter-Noise, Forum Acusticum (inkl. e-Forum Acusticum 2020), Euro-noise, International Congress on Acoustics ICA, International Congress on Sound and Vibration ICSV, Noise-Con, ICBEN Congress, DAGA, Quiet Drones Symposium

Auf die Suche in folgenden ursprünglich geplanten Datenbanken wurde verzichtet: (1) Science-Direct, da die Datenbank bezüglich Title/Keywords/Abstract bereits in Web of Science und Scopus enthalten ist und da nur relativ kurze Suchstrings erlaubt sind, was die Aufteilung unseres Strings (Abschnitt 4.3.1.2) in viele Einzelabfragen nötig machen würde (impraktikabel), und (2) Springer-Link, da die Datenbank bezüglich Title/Keywords/Abstract bereits in Web of Science und Scopus enthalten ist und da die Suche nicht auf Title/Keywords/Abstract eingegrenzt werden kann, was zu einer übergroßen Anzahl Treffer führen würde.

Es wird die gesamte Literatur bis zum jeweiligen Stichtag der Datenbanksuche in die Suche eingeschlossen. Auf eine Eingrenzung auf die letzten fünf Jahre wird verzichtet, da bislang nur wenige Studien zur Lärmwirkung von Drohnen verfügbar sind. Als Beispiel: Für den unten gewählten Suchstring würde eine auf die letzten fünf Jahre begrenzte Suche in Web of Science die Trefferzahl von 350 (alle Jahre) auf 229 begrenzen (Stand 24.08.2020).

Vor Durchsicht der Konferenzbeiträge wurde geprüft, ob diese von den obigen Datenbanken bereits gedeckt werden, so dass auf eine individuelle Suche verzichtet werden kann. Konferenzbeiträge, welche nicht gedeckt wurden, wurden separat durchsucht.

#### 4.3.1.2 Suchstring

Für die Datenbanksuche wurde ein Suchstring entwickelt, welcher drei Suchblöcke enthält, die mit dem Booleschen Operator AND verknüpft wurden:

- ▶ Drohne als Quelle,
- ▶ Akustik bzw. Lärm als Exposition, und
- ▶ Wirkungsdimensionen, d.h. verschiedene potenzielle Lärmwirkungen.

Der Suchstring wurde für Web of Science entwickelt, um Begriffe mit keinen/sehr wenigen Treffern (z. B. *cardiovascular*, *insomnia*) sowie zu unspezifische Begriffe mit zu vielen Treffern (z. B. *effect*, *impact*) zu beseitigen. Dieser Suchstring wurde danach, soweit nötig, spezifisch auf die anderen Datenbanken angepasst (z. B. für Psynindex auf Deutsch übersetzt).

Für Web of Science resultierte folgender String:

```
("drone*" OR "quadcopter" OR "multirotor" OR "multicopter" OR "UAV" OR "UAS"
OR "RPA" OR "unmanned air*" OR "unmanned aer*") AND ("acoust*" OR "sound" OR
"noise" OR "psychoac*" OR "loud*" OR "sharp*" OR "rough*" OR "tonal*" OR "tone*")
AND ("annoy*" OR "disturb*" OR "affective" OR "psychol*" OR "stress" OR "risk" OR
"health")
```

Obiger Suchstring enthält bereits die Begriffe der potenziell störenden tonalen Komponenten, wie auch der psychoakustischen Parameter. Hingegen enthält der Suchstring die möglicherweise bedeutenden Dimensionen "Akzeptanz" und "visuell-akustische Interaktionen" nicht, da weitere Dimensionen die Suche entweder zu stark eingrenzen (Boolescher Operator "AND") oder ausweiten ("OR") würden.

#### 4.3.1.3 Trefferzahlen

Die Datenbankabfragen wurden von B. Schäffer zwischen dem 24. August und 08. September 2020 durchgeführt (Ausnahme: Forum Acusticum und Quiet Drones Symposium (s.u.), da diese Konferenzen erst später abgehalten wurden). Die Abfragen ergaben folgenden Trefferzahlen ["Datenbank: Suchdatum, Anzahl Treffer"]:

- ▶ Web of Science: 24.08.2020, 350
- ▶ Scopus (inkl. Embase): 24.08.2020, 669
- ▶ MEDLINE (via PubMed): 25.08.2020, 48
- ▶ PsycInfo (über ProQuest): 02.09.2020, 113
- ▶ Ingenta-Connect: 04.09.2020, 24
- ▶ Psyn dex (über PubPsych): 07.09.2020, 0
- ▶ Google Scholar: 04.09.2020, 3
- ▶ Konferenzbeiträge: 07.09.–08.09.2020 (Quiet Drones Symposium 2020: 24.11.2020, Forum Acusticum 2020: 28.12.2020), 1

Somit wurden 1'208 Publikationen gefunden, wobei diese Zahl auch Duplikate enthält.

#### 4.3.1.4 Titel-Abstract- und Volltextscreening

Die gefundenen Artikel wurden in das Literaturdatenbankprogramm EndNote Version X9 eingeladen. In einer ersten Runde wurden in Endnote 350 Duplikate entfernt (verbleibend: 858 Referenzen).

Das Titel-Abstract-Screening erfolgte via Rayyan QCRI (<https://www.rayyan.ai>), einer Web-Applikation für Systematische Reviews (Ouzzani et al., 2016). Diese Applikation hilft beim Screening, indem Schlüsselwörter (potenzielle Ein- und Ausschlusskriterien, vgl. Abschnitt 4.2) definiert werden, welche dann grün bzw. rot im Titel und Abstract markiert werden. Zudem können Gründe für den Ausschluss von Publikationen angegeben werden, was schließlich in einer Übersichts-Statistik zusammengefasst wird.

Als potenzielle Einschlusskriterien wurden gewählt: *drone, drones, unmanned, UAV, UAS, sound, noise, annoy, annoyance, health, population, human*. Als potenzielle Ausschlusskriterien wurden gewählt: *disturbance, disturbances, stress, review, RPA, animal, animals, reviews, whales, rats, editorial, fish, transgenic, in vitro, porcine, canine, mouse, rat*. (Die Schlagwörter *stress* und *disturb\** waren zwar ursprünglich im Suchstring verwendet worden, werden aber größtenteils in anderem Zusammenhang als Lärmwirkung verwendet.)

Zunächst wurde in Rayyan QCRI erneut nach Duplikaten gesucht und 20 weitere aufgedeckt (verbleibend 838 Referenzen). Ausschluss der Referenzen erfolgte aufgrund folgender Gründe: Keine Gesundheitswirkungen, kein Drohnen-Thema, vollständige Proceedings (keine Einzelartikel), falscher Publikationstyp, nur Übersichts-Publikation. Nach Titel-Abstract-Screening wurden zehn Artikel als vermutlich relevant eingestuft.

Ausschlussgründe beim Volltextscreening lagen vor, wenn die Artikel keine Lärmwirkungen untersuchten und/oder dass sie lediglich einen Überblick über bereits publizierte Forschungsprojekte gaben, und keine eigenen (neuen) Daten enthielten. Insgesamt wurden sechs Artikel durch das Volltextscreening ausgeschlossen. Es verbleiben **4 relevante Artikel**.

#### 4.3.1.5 "händische" Suche im Internet

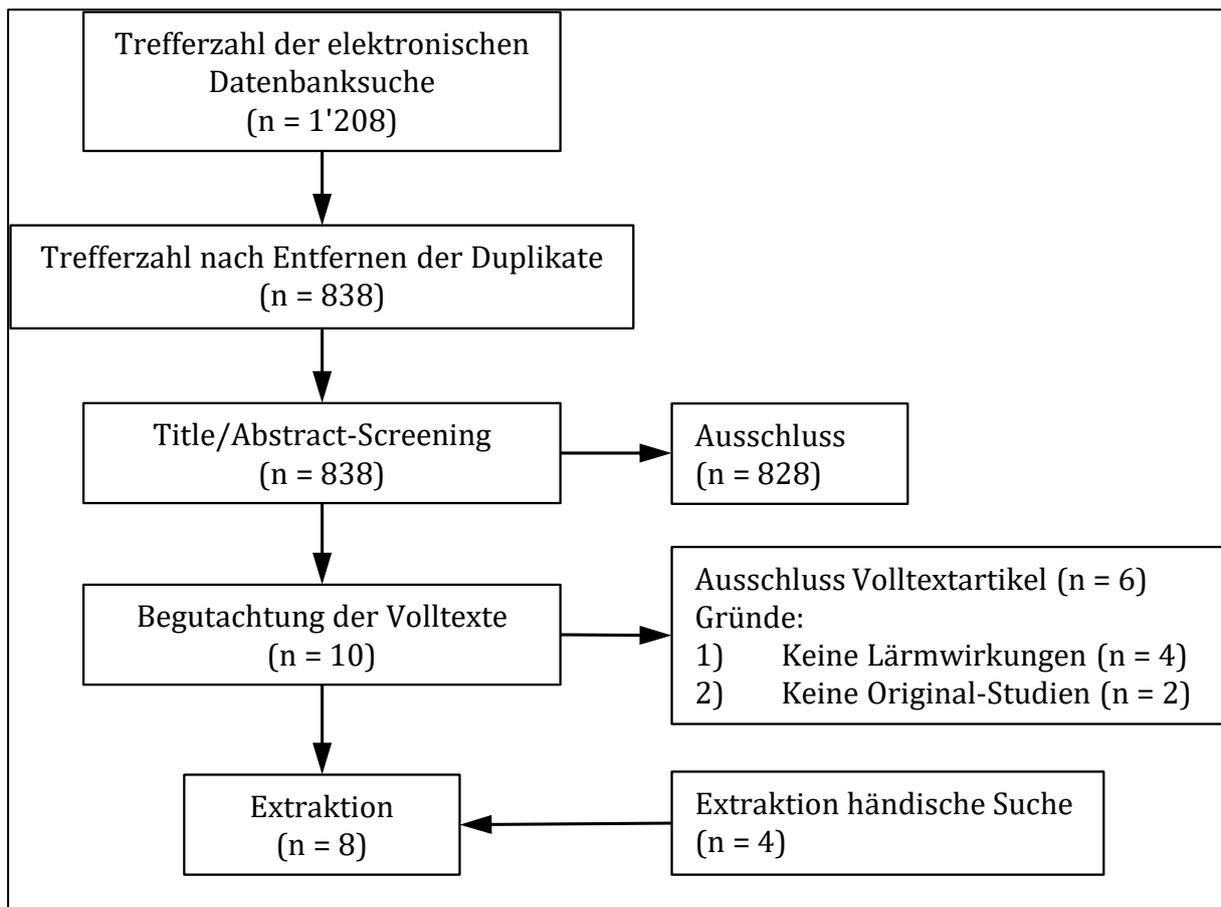
Die „händische“ Suche wurde im Zeitraum vom 24.–26. November 2020 durchgeführt. Die Internetsuche erfolgte mit der Suchmaschine Google, unter Verwendung des Strings in Abschnitt 4.3.1.2 sowie verschiedener vereinfachten Strings (z. B. "*drone annoyance*"). Es wurde allgemein nach psychoakustischen Untersuchungen, sowie spezifisch nach Studien der NASA und nach schwedischen und französischen Studien gesucht, da dort Forschungsaktivitäten erwartet wurden. Zusätzlich wurden die Referenzlisten der in das Volltextscreening (s. u.) eingeschlossenen Publikationen nach weiteren relevanten Artikeln durchsucht. Weiter wurde eine Literatursammlung (Volltexte) zu Drohnen, welche den Autoren am 16. Juni 2020 freundlicherweise vom Umweltbundesamt durch Julia Treichel zur Verfügung gestellt worden war, durchgesehen. Schließlich wurde die Zeitschrift „Lärmbekämpfung“ nach relevanten Artikeln durchsucht. Potenzielle Artikel wurden direkt dem Titel-Abstract- und Volltextscreening unterzogen, um deren Eignung zu prüfen.

Insgesamt wurden so **4 zusätzliche Dokumente** in die Datenbank aufgenommen, welche für das Thema relevant und durch die Datenbanksuche nicht gedeckt worden waren.

#### 4.3.1.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Eine Zusammenfassung der Recherche nach relevanten Dokumenten gemäß des PRISMA-Fließdiagramms zeigt die nachfolgende Abbildung 15. Aufgrund der geringen Anzahl verbleibender Dokumente ( $n = 8$ ), welche unterschiedliche Aspekte der Wirkung von Drohnen behandelten, war eine quantitative Meta-Analyse nicht möglich. Es wird daher eine qualitative Zusammenfassung zu den psychoakustischen Untersuchungen durchgeführt.

**Abbildung 15 Prisma-Fließdiagramm zu psychoakustischen Untersuchungen**



Quelle: eigene Darstellung Empa

### 4.3.2 Datenextraktion und Qualitätsbewertung

Bei der Extraktion und Qualitätsbewertung wurden die wichtigsten Daten der eingeschlossenen Studien in eine Tabelle extrahiert. Die Tabelle wurde ausgehend von Tabelle 3 in Hegewald et al. (2020) entwickelt und auf die vorliegende Literaturstudie angepasst. Sie enthält, sofern aus den Publikationen ersichtlich, Informationen zu Drohnenmodell, Kategorie (z. B. Quadcopter), Gewicht, Kontrolle des Flugs während Aufnahmen (manuell vs. Autopilot), untersuchte Flugzustände, weitere berücksichtigte Schallquellen (z. B. Straßenverkehrslärm), Studienregion, Studiendesign, Qualitätsbewertung, Population (Beschreibung Studienteilnehmer), Erzeugung (Auralisierung, Aufnahme) und Wiedergabe der Stimuli (für Laborexperimente), Studiendetails (z. B. Studieninformation für die Teilnehmer, Kontext), untersuchte Lärmwirkung(en), ob auch Akzeptanz, audio-visuelle Aspekte und/oder Hintergrundlärm untersucht wurde(n), erfasste (psycho-)akustische Charakteristiken, experimenteller Pegelbereich, psychoakustische Pegeldifferenz, Methoden der Outcome-Erhebung, Auswerteverfahren (z.B. ANOVA), eine Übersicht der wichtigsten Ergebnisse, eine Bewertung der Studie (Stärken und Schwächen), sowie Schlüsselwörter. Basierend auf letzterer Bewertung wurde die Studie in die Qualitätsklassen gut (++), mittel (+) oder schlecht (-) eingeteilt. Auf eine detaillierte Qualitätsbeurteilung, z. B. nach Kriterien gemäss SIGN (Scottish Intercollegiate Guidelines Network 2004) oder CASP (Critical Appraisal Skills Programme 2004/2006) (vgl. z. B. Hegewald et al., 2020) wurde hier verzichtet. Ebenfalls verzichtet wurde auf eine detaillierte Bewertung des Risikos einer Verzerrung (z. B. Cochrane risk-of-bias), aber soweit Informationen hierzu vorlagen (z. B. bezüglich Kontext), wurden diese in die Studienbewertung einbezogen.

## 4.4 Ergebnisse der Literaturrecherche zum Themenbereich „psychoakustische Untersuchungen“

Der nachstehende Ergebnisteil enthält fünf Abschnitte: Zuerst werden potenziell störende Geräuschcharakteristiken von Drohnen erörtert (Abschnitt 4.4.1). Danach folgt der Hauptteil mit den Ergebnissen des systematischen Reviews zu den psychoakustischen Untersuchungen (Abschnitt 4.4.2), und schließlich ein Exkurs zur Akzeptanz von Drohnen in der Öffentlichkeit (Abschnitt 4.4.3). Abschnitt 4.4.4 fasst die Erkenntnisse des systematischen Reviews zusammen und Abschnitt 4.4.5 gibt Empfehlungen für zukünftige psychoakustische Untersuchungen zu Drohnenlärm. Hierbei ist zu beachten, dass ausschließlich die Erkenntnisse in Abschnitt 4.4.2 (psychoakustische Untersuchungen) das Resultat des systematischen Reviews darstellen. Die Abschnitte 4.4.1 und 4.4.3 dienen dazu, letztere in einen etwas breiteren Kontext zu bringen. Sie waren aber nicht Gegenstand des systematischen Reviews, und die dort zitierte Literatur ist dementsprechend nicht als abschließend (bzw. als systematischer Review) zu betrachten. Zudem erlauben wir uns, weitere Dokumente, welche nicht dem systematischen Review entspringen, zu erwähnen, um gewisse Aussagen und Erkenntnisse zu untermauern. Die Kernliteratur des systematischen Reviews ist aus Tabelle 9 ersichtlich.

### 4.4.1 Potenziell störende Geräuschcharakteristiken von Drohnen

Verschiedene Studien untersuchten die immissionsseitigen Geräuschcharakteristiken von Drohnen hinsichtlich potenziell störender Komponenten, wie z. B. Cabell et al. (2016), Feight et al. (2017), Kloet et al. (2017b), Alexander et al. (2019) oder Torija et al. (2019b).

Alexander et al. (2019) fanden, dass das Geräusch eines Hexacopters (DJI Matrice 600 Pro) durch starke Tonhaltigkeit im Frequenzbereich  $< 800$  Hz dominiert wird, während bedeutende Breitbandgeräusche im höheren Frequenzbereich  $> 1$  kHz auftreten. Ähnliches berichteten Torija et al. (2019b) und Feight et al. (2017). Sie fanden für einen Quadcopter (DJI Phantom 3 bzw. 3DR IRIS +) Nutzlastabhängige Töne von (je nach Studie) rund 250 Hz bis 3 kHz und hochfrequente Breitbandgeräusche zwischen rund 4 und 6 kHz, wobei zunehmende Nutzlast und somit Leistung zu höherer Tonhöhe führte. Die Reintöne entsprechen dabei der Blattpassierfrequenz der Propeller und den Harmonischen (Alexander et al., 2019; Cabell et al., 2016; Feight et al., 2017), während die hochfrequenten Breitbandgeräusche durch die Luftströmungen an Propellern und Motor, aber teilweise auch durch den Betrieb des Elektromotors verursacht werden (Feight et al., 2017; Torija et al., 2019b). Die Befunde zu den Reintönen werden durch die Untersuchungen von Cabell et al. (2016) für verschiedene Drohrentypen (Tri-, Quad-, und Hexacopter sowie ein propellerbetriebenes Flächenflugzeugmodell) bestätigt. Weiter zeigen sich insbesondere bei kleineren Drohnen zeitlich unetige Geräusche, welche auf atmosphärische Störungen (z. B. Windböen) und der damit verbundenen variablen Drehzahl der Propeller zur Aufrechterhaltung der Stabilität der Drohne zurückzuführen sind (Cabell et al., 2016; Gwak et al., 2020; Torija et al., 2019b). Auch periodische Variationen der Höhe der Reintöne werden bisweilen beobachtet (Gwak et al., 2020).

Im Vergleich zum Immissionsspektrum der oben diskutierten Drohne DJI Phantom 3 zeigte ein exemplarisches Spektrum eines Strahlflugzeugs höherfrequente Reintöne im Bereich der Blattpassierfrequenz von rund 1 kHz sowie der Harmonischen, während die Schallenergie in höheren Frequenzbereichen  $> ca. 2$  kHz stark abnahm (Torija et al., 2019b). Dies wurde auch in der Studie von Gwak et al. (2020) beobachtet. Exemplarische Spektren von Straßenfahrzeugen (Auto, Motorrad) hingegen wiesen immissionsseitig einen ähnlichen Frequenzgang wie die Drohnen auf, aber kaum Reintöne (Torija et al., 2019b). Die Unterschiede in den Spektren, insbesondere

im höherfrequenten Bereich, sind hierbei großenteils auf die unterschiedlichen Ausbreitungsdistanzen zurückzuführen. Flugzeuge verkehren in größeren Abständen, während Drohnen nahe oder gar in Siedlungen operieren werden. Infolge der deutlich geringeren Schallausbreitungsdistanzen der Drohnen zu den Empfängern ist die atmosphärische Absorption hoher Frequenzen entsprechend geringer als bei Flugzeugen, so dass bei den Drohnen der höherfrequente Signalanteil wichtig bleibt.

Die Unterschiede in den Spektren führen auch zu deutlich unterschiedlichen psychoakustischen Parametern. Letztere geben die menschliche Wahrnehmung verschiedener akustischer Charakteristiken wieder (Fastl and Zwicker, 2007). Ein guter Überblick hierzu findet sich beispielsweise in Nordtest (2002):

- ▶ Die **Lautheit** ( $N$ ) beschreibt, wie laut Geräusche wahrgenommen werden. Sie beschreibt die menschliche Wahrnehmung adäquater als der A-bewertete Pegel.
- ▶ Die wahrgenommene **Schärfe** ( $S$ ) von Geräuschen wird durch hochfrequente Geräuschteile bestimmt.
- ▶ Das Gefühl der **Rauheit** ( $R$ ) wird durch Amplituden- oder Frequenzmodulation im Frequenzbereich von 15 Hz bis 300 Hz bestimmt.
- ▶ Die **Fluktuationsstärke** ( $FS$ ) wird wie die Rauheit durch Amplitudenmodulation bestimmt, allerdings bei deutlich tieferen Frequenzen  $< 15$  Hz, mit einem Maximum bei rund 4 Hz.
- ▶ Die **Tonalität** ( $T$ ) ergibt sich durch das Auftreten hörbarer Reintöne.

Die oben diskutierten speziellen akustischen Eigenschaften von Drohnen führten bei gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel zu einer signifikant höheren Schärfe und einer (nicht-signifikant) höheren Tonalität als bei Flugzeugen und Straßenfahrzeugen ((Torija and Li, 2020; Torija et al., 2019)). Bezüglich Schwankungsstärke waren die Drohnen ähnlich wie die Straßenfahrzeuge, während die Flugzeuge die deutlich höchsten Werte aufwiesen, was auf die atmosphärische Turbulenz zurückzuführen sein könnte (Gwak et al., 2020; Torija and Li, 2020; Torija et al., 2019). Auch das Design der Drohnen vermag die psychoakustischen Parameter zu beeinflussen. So fanden Kloet et al. (2017b) für einen Quadcopter mit unterschiedlicher Anzahl Rotorblätter (2 bis 6), dass eine gerade Anzahl Blätter zu einer höheren Lautheit führte als eine ungerade Anzahl, dass die Schärfe mit der Anzahl Blätter stieg, und dass die Schwankungsstärke für 2- und 4-blättrige Rotoren höher war als für die anderen Rotoren (3, 5 oder 6 Blätter).

Obige Ausführungen zeigen, dass Drohnen sich in ihren akustischen und psychoakustischen Charakteristiken stark von anderen (Verkehrs-)Lärmquellen unterscheiden. Inwiefern dies auch andere bzw. unterschiedlich stark ausgeprägte Lärmwirkungen hervorruft, wird im nachfolgenden Abschnitt 4.4.2 erörtert.

#### 4.4.2 Psychoakustische Untersuchungen

Insgesamt wurden acht Studien in das systematische Review aufgenommen (Abbildung 15). Tabelle 9 zeigt die Zusammenstellung mit den wichtigsten Eckdaten der Studien.

Zu Drohnen sind bis heute ausschließlich Laborstudien verfügbar, in welchen für akustische oder visuell-akustische Stimuli die akute Lärmwirkung untersucht wurde. Feldstudien zu Langzeitwirkungen von Drohnen sind nicht verfügbar. Mit Ausnahme der Studie von Rizzi et al. (2017) zu einem Flächenflugzeug mit verteiltem elektrischem Propeller-Hochauftriebssystem befassen sich alle Studien mit der Lärmwirkung von Multicoptern (hauptsächlich Quadcopter; in

zwei Studien auch Oktocopter). Bislang wurden die Flugzustände Schweben (Callanan et al., 2020; Gwak et al., 2020; Torija and Li, 2020; Torija et al., 2020; 2019b) und Geradeausflug (Christian and Cabell, 2017; Rizzi et al., 2017; Torija and Li, 2020; Torija et al., 2019b) unter verschiedenen Nutzlasten untersucht. Starts und Landungen wurden nicht untersucht. Ausser Rizzi et al. (2017), welche auralisierte Ereignisse verwendeten, und Callanan et al. (2020), welche während der Versuche Drohnen schweben ließen, basieren die akustischen Stimuli der Studien auf Tonaufnahmen. Eine der in den Review eingeschlossenen Studien zeigt nur die Ergebnisse eines ersten Pilotversuchs sowie das Konzept, wie die eigentliche Laborstudie durchgeführt werden soll (Begault, 2020). Eine weitere Studie zeigt keine experimentellen Ergebnisse, sondern eine Rechenübung mit unterschiedlichen "Psychoacoustic Annoyance"-Modellen (Torija et al., 2019b). Wegen der geringen Anzahl verfügbarer Studien werden letztere beiden Studien hier ebenfalls berücksichtigt. Bisher wurde hauptsächlich die Lästigkeit untersucht – bzw. genauer: die akute, kurzzeitige, perzeptive, (psychoakustische) Lästigkeit unter Laborbedingungen. Die im Labor ermittelte Lästigkeit ist nicht zu verwechseln mit der Psychoacoustic Annoyance, welche auf reinen Modellberechnungen beruht (Fastl and Zwicker, 2007). Die Lästigkeit unterscheidet sich zudem von der Langzeit-Lärmbelästigung im Feld (Guski and Bosshardt, 1992). Nachfolgend wird diese Wirkungsdimension (Lästigkeit unter Laborbedingungen) "**Lästigkeit**" genannt, zur Unterscheidung zur Lärmbelästigung im Feld und zur modellierten Psychoacoustic Annoyance. Ausser bei Torija and Li (2020) war sie Gegenstand aller Studien. Daneben behandelten einzelne Studien aber auch andere Aspekte, wie unten ausgeführt wird.

**Tabelle 9 In das systematische Review zu psychoakustischen Untersuchungen eingeschlossene Studien.**

Studie	Drohnen Manöver	Weitere Schallquellen	Region Studiendesign Qualität	Population	Outcome und Messung	(Psycho-) akustische Charakteristiken †	Psychoakustische Pegeldifferenz
Bergault (2020)	NASA EVTOL-Konzept Vorbeiflug	Verschiedene urbane Soundscapes	USA Studiendesign: k.A., erst Versuchskonzept (++)	k.A.	Lästigkeit, Mischung (Blend), Erkennen: 2-AFC Tests Berücksichtigung Hintergrundgeräusch	Pegeldifferenz (Signal-To-Noise)	-
Callanan et al. (2020)	2 Quadcopter Schweben	Lautsprecher (Sprachsignale)	USA Laborexperiment (+)	n = 30 (M = 15, F = 15), 18-34 J. Ausschluss n = 2	Lästigkeit, Lautheit, Hören/Verstehen, Fähigkeit des Zuhörens: 10 Punkte Skala Leistung (Verständnis): HINT und Alpha-Test	Pegelzeitverläufe, Spektren, $L_{Aeq}$	-
Christian & Cabell (2017)	3 Quadcopter, 1 Oktocopter geradliniger Vorbeiflug	4 Fahrzeuge (Pkw, Kleintransporter, Kastenwagen, Lieferwagen)	USA Laborexperiment (++)	n = 38 (ca. 2/3 M, 1/3 F), ca. 18-50 J.	Lästigkeit: <i>ICBEN</i> 5-Punkte-Skala*	$L_{AE}$ , $L_{CE}$ , $EPNL$ , $N5$	$\Delta L_{AE} = 5,6$ dB $\Delta L_{CE} = 12,8$ dB $\Delta EPNL = 7,6$ dB $\Delta N5 = 7,5$ Phone (Drohne vs. Fahrzeug)
Gwak et al. (2020)	2 Quadcopter, 1 Oktocopter; Schweben	1 Strahlflugzeug	Südkorea 2 Laborexperimente (++)	Exp. 1: n = 50 (M = 35, F = 15), 19-30 J. Exp. 2: n = 25 (M = 13, F = 12), 20-30 J.	%HA aus Lästigkeit: <i>ICBEN</i> 11-Punkte-Skala* Adjektive zu Sinnen und Gefühlen bezüglich Stimuli: 51-Punkte Skala	Spektrogramme, Spektren, $L_{Aeq}$ & weitere akustischer Pegelmasse, N, S, R, FS	$\Delta L_{Aeq} \sim 10$ dB (große Drohne vs. Flugzeug) $\Delta L_{Aeq} \sim 6$ dB (große vs. kleine Drohne) $\Delta L_{Aeq} \sim 4$ dB (kleine Drohne vs. Flugzeug)

Studie	Drohnen Manöver	Weitere Schallquellen	Region Studiendesign Qualität	Population	Outcome und Messung	(Psycho-) akustische Charakteristiken †	Psychoakustische Pegeldifferenz
Rizzi et al. (2017)	Starrflügler (Elektroantrieb) geradliniger Vorbeiflug	-	USA Laborexperiment (++)	n = 32	Lästigkeit: <i>ICBEN</i> 11-Punkte-Skala*	<i>LA5, N5, S5, R5, FS5, T5</i>	-
Torija et al. (2019)	1 Quadcopter geradliniger Vorbeiflug, Schweben	2 Fahrzeugkategorien (Pkw, Motorrad), 2 Strahlflugzeugkategorien (A320, A320neo)	Großbritannien Berechnungen (kein Experiment) (++)	-	"Psychoacoustic Annoyance"-Modelle: 1) Fastl and Zwicker (zitiert nach Ausgabe 2007) 2) PAmoD, Di et al. (2016) 3) PAmoD für Fluglärm, More (2011)	Spektren; <i>N5, S5, R5, FS5, T5</i>	-
Torija et al. (2020)	1 Quadcopter Schweben	7 urbane Soundscapes (Parks in unterschiedlichen Distanzen zu Straßen)	Großbritannien Laborexperiment (3 Teile) (+)	n = 30 (M = 16, F = 14), 21-59 J.	Lautheit, Lästigkeit, Annehmlichkeit: <i>ICBEN</i> 11-Punkte-Skala* Berücksichtigung audio-visuelle Interaktionen und Hintergrundgeräusche	<i>L<sub>Aeq</sub></i> ; Spektren	$\Delta L_{Aeq} = 6$ dB (Belästigung mit Drohne vs. nur Hintergrundgeräusch)
Torija & Zi (2020)	1 Quadcopter geradliniger Vorbeiflug	3 Fahrzeugkategorien (Pkw, Moped, Motorrad), 2 Strahlflugzeugkategorien (A320, A320neo), 2 Referenz-Strahlflugzeuge (B767, B787), (1 Helicopter)	Großbritannien Laborexperiment: Teil 2 von Torija et al. (2020) (+)	n = 30 (M = 16, F = 14), 21-59 J.	Rangfolge bezüglich Präferenz: 101-Punkte-Skala	<i>L<sub>Aeq</sub>, LA5, N5, S5, R5, FS5, T5, EPNL</i>	-

\* *ICBEN*-Skala: Verwendung einer modifizierten Frage zur Lästigkeit unter Laborbedingungen, welche sich von der Langzeit-Lärmbelästigung im Feld unterscheidet.

† (Psycho-)akustische Charakteristiken: *L<sub>A</sub>* (A-bewerteter Pegel), *N* (Lautheit), *S* (Schärfe), *R* (Rauheit), *FS* (Schwankungsstärke), *T* (Tonalität), mit 5 (z. B. *L5*) das 5%-Perzentil

#### 4.4.2.1 Lästigkeit des Lärms von Drohnen

Wie erwartet hängt die Lästigkeit von Drohnenlärm stark vom Pegel ab (Callanan et al., 2020; Christian and Cabell, 2017; Gwak et al., 2020; Rizzi et al., 2017); hier bilden Drohnen keine Ausnahme zu anderen Verkehrslärmarten. Fünf Studien belegen das erhöhte Lästigkeitspotenzial von Drohnen im Vergleich zu anderen Transportmitteln. Christian and Cabell (2017) verglichen in ihrer vielzitierten Studie (der ersten publizierten psychoakustischen Untersuchung zu Drohnenlärm) die Lästigkeitswirkung von Multicopter vorbeifliegen mit Fahrzeugvorbeifahrten. Drohnen wirkten im Mittel deutlich lästiger als Fahrzeuge. Dieser quellenspezifische Lästigkeitsunterschied kann als **psychoakustische Pegeldifferenz ( $\Delta L$ )** quantifiziert werden, welche aufzeigt, bei wieviel höherem Schalldruckpegel eine Referenz-Lärmquelle gleich lästig wirkt wie (in diesem Fall) die Drohnen (vgl. Illustration in Abbildung 16). In der Studie von Christian and Cabell (2017) waren die Drohnen gleich lästig wie Fahrzeuge mit einem **5-6 dB** höheren Ereignispegel ( $L_{AE}$ ) (d.h.  $\Delta L = 5.6$  dB). Für andere Geräuschkenngrößen ( $L_{CE}$ ,  $EPNL$ ,  $N5$ ) resultierten andere Werte (Tabelle 9), wobei der  $L_{AE}$  den stärksten Zusammenhang mit der Lästigkeit aufwies. Gwak et al. (2020) fanden bezüglich Wahrscheinlichkeit für starke Lästigkeit (%HA), dass schwebende Multicopter deutlich lästiger wirkten als ein startendes Strahlflugzeug, mit  **$\Delta L$  von 4–10 dB** für mittlere Pegelbereiche, je nach Drohnengröße<sup>15</sup>. Torija et al. (2020) untersuchten die Wirkung eines schwebenden Quadcopters in verschiedenen Geräuschkulissen (Soundscapes). Sie fanden, dass die Präsenz der Drohne auch in Situationen mit erhöhtem Straßenverkehrslärm ( $L_{Aeq} \approx 65$  dB) zu einer deutlichen Lästigkeitszunahme führte. Dieselbe Lästigkeitszunahme würde durch eine alleinige Pegelzunahme der Geräuschkulisse (ohne Drohne) um 6 dB oder mehr hervorgerufen werden. Bei ruhigeren Geräuschkulissen resultiert sogar ein deutlich stärkerer Effekt. Torija et al. (2019b) schließlich fanden, dass die mit den Modellen von Fastl and Zwicker (2007), Di et al. (2016) bzw. More (2011) rechnerisch ermittelte *Psychoacoustic Annoyance* eines Quadcopters grösser als die von Fahrzeugen und insbesondere von Strahlflugzeugen war. Eine Studie von Torija and Li (2020) zur Präferenz (ein "inverser Indikator" für Lästigkeit) verschiedener Schallquellen stützen diese Befunde: Die Autoren fanden, dass die Präferenz eines Quadcopters deutlich niedriger lag als diejenige von Strahlflugzeugen und Fahrzeugen.

Dass bei gleichem A-bewertetem Pegel deutliche Unterschiede in der Lästigkeit bzw. große psychoakustische Pegeldifferenzen  $\Delta L$  resultierten, ist ein Hinweis darauf, dass klassische A-bewertete Pegelmasse wie der  $L_{AE}$  oder  $L_{Aeq}$  die Wirkung von Drohnenlärm im Vergleich zu anderen Lärmarten nicht zuverlässig abzubilden vermögen: Je stärker eine Geräuschkenngröße mit der Lärmwirkung zusammenhängt, desto geringer wird  $\Delta L$  (Christian and Cabell, 2017).

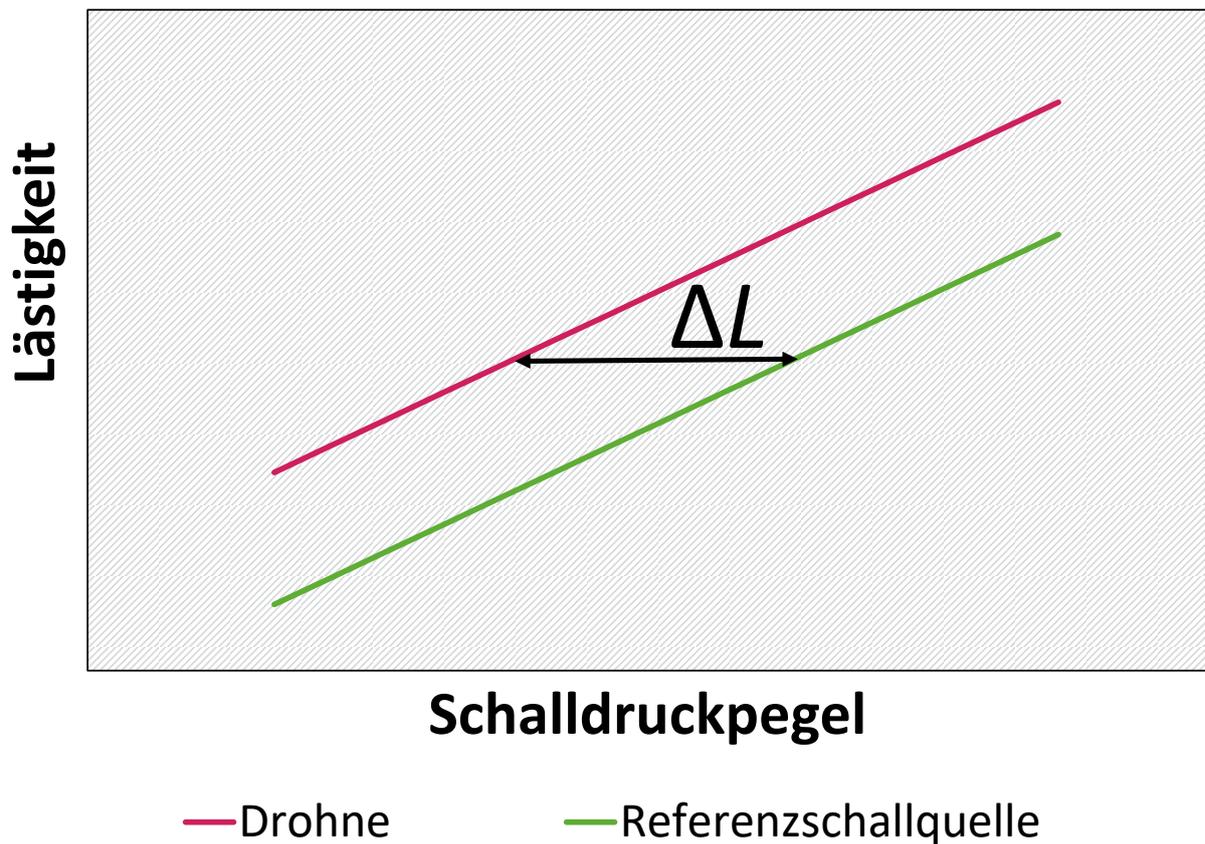
Hier kommen die **psychoakustischen Parameter** ins Spiel (vgl. Abschnitt 4.4.1). Gwak et al. (2020) fanden, dass die Lästigkeitsurteile der Drohnen v.a. durch die Schärfe, Lautheit und Schwankungsstärke beeinflusst werden. Zudem führte insbesondere die Schärfe (aber auch die Lautheit) zu den Lästigkeits-Unterschieden zwischen Drohnen und Strahlflugzeug. Tatsächlich konnten die Autoren in einem zweiten Laborversuch das Unangenehme ("unpleasantness") der Geräusche einer Drohne vermindern, indem sie die Schärfe und Fluktuationsstärke der Stimuli durch Signalverarbeitung verminderten. Die Versuchspersonen nahmen diese Modifikationen wahr und konnten sie semantisch, d.h. mittels ausgewählter Adjektive, beschreiben. Allerdings vermochten die psychoakustischen Parameter die Unterschiede zwischen den größeren Drohnen und der kleinsten Drohne nicht zu erklären. Laut der Autoren könnte ein Grund hierfür die

<sup>15</sup> Auch wenn die Studie von Christian and Cabell (2017) die psychoakustische Pegeldifferenz basierend auf dem absoluten Belästigungsurteil und Gwak et al. (2020) basierend auf der Wahrscheinlichkeit für starke Lästigkeit (binäre Grösse %HA) ermittelten, sind die Differenzen methodisch vergleichbar. So fanden beispielsweise Schäffer et al. (2016) basierend auf beiden Grössen vergleichbare Differenzen  $\Delta L$  zwischen Windturbinen- und Straßenverkehrslärm.

geringere Tonalität der kleinsten Drohne gewesen sein, doch wurde diese nicht untersucht (Gwak et al., 2020). Diese Hypothese wird durch andere Studien gestützt. So hingen die von Torija and Li (2020) beobachteten Präferenzen grösstenteils von der Tonalität sowie der Interaktion von Lautheit mit Schärfe ab. Rizzi et al. (2017) erstellten ein psychoakustisches Modell, welches basierend auf der Lautheit, Rauheit und Tonalität die durch das elektrisch betriebene Flächenflugzeug hervorgerufene Lästigkeit über einen breiten Bereich von Design- und Betriebsparametern und entsprechend unterschiedlichen akustischen Signaturen voraussagt. Und auch die Rechenübung von Torija et al. (2019) zeigt, dass mit psychoakustischen Parametern das (erwartete) erhöhte Lästigkeitspotenzial von Drohnen vorausgesagt werden kann.

**Abbildung 16** Illustration der psychoakustischen Pegeldifferenz ( $\Delta L$ ) zwischen Drohnen und einer Referenzschallquelle: Generische (hypothetische) Lärmwirkungskurven für die Lästigkeit in Abhängigkeit des Schalldruckpegels für eine Drohne und eine Referenzschallquelle, und  $\Delta L$  als Verschiebung der beiden Kurven zueinander auf der Abszisse.

## Psychoakustische Pegeldifferenz ( $\Delta L$ )



Quelle: eigene Darstellung Empa

#### 4.4.2.2 Einfluss von Design und Betrieb von Drohnen auf die Lästigkeit

Aus obigen Ausführungen (Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2.1) geht hervor, dass insbesondere tonale Komponenten sowie hochfrequente breitbandige Geräusche (Schärfe) zur Lästigkeit beitragen. Um die Lästigkeit von Drohnen zu verringern, sollten somit insbesondere diese Geräuschcharakteristiken vermindert werden.

Zurzeit gibt es nur wenige systematische wissenschaftliche Untersuchungen zum Einfluss von Design und Betrieb von Drohnen auf die Lästigkeit. Gwak et al. (2020) fanden, dass die Lästigkeit mit zunehmendem Gewicht bzw. zunehmender Größe der Drohnen anstieg ( $\Delta L \approx 6$  dB zwischen einer kleinen 0,11 kg und großen, bis 11 kg schweren Drohne). Hierbei könnte allerdings – wie bereits in Abschnitt 4.4.2.1 ausgeführt – laut der Autoren der Studie die (nicht quantifizierte) tiefere Tonhaltigkeit der kleinsten Drohne ein Grund für die geringe Lästigkeit gewesen sein. Rizzi et al. (2017) fanden für ihr elektrisch angetriebenes Flächenflugzeug, dass die Lästigkeit mit der Anzahl Propeller (6 – 12 – 18) anstieg. Dies war zu erwarten, da in ihren Ausrüstungen bei jeweils gleicher Anzahl Propellerblätter mit der Anzahl Propeller auch die Schalleistung anstieg. Auch zeitvariable Effekte hatten einen gewissen Einfluss auf die Lästigkeit (Details siehe Rizzi et al., 2017). Hingegen hing die Lästigkeit nicht von Umdrehzahl-Differenzen zwischen den Propellern ab. Die übrigen oben diskutierten Studien (Tabelle 9) untersuchten den Einfluss von Design und Betrieb von Drohnen nicht; sie verwendeten nur einen Drohnentypen (Studien von Torija) oder wiesen die Differenzen zwischen verschiedenen Typen nicht aus (Callanan et al., 2020).

Im Betrieb scheint insbesondere die relativ langsame Fluggeschwindigkeit der Drohnen im Vergleich zu anderen Transportmitteln für die erhöhte Lästigkeit wichtig zu sein. So fanden Christian and Cabell (2017) für Quadcopterüberflüge mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s bei Überflughöhen von 20, 30, 50 und 100 m (und somit zunehmend längerer Dauer) zwar Differenzen im  $L_{AE}$  von bis zu 8 dB, aber keine Änderung im Lästigkeitsurteil. Dementsprechend war ein häufiger Kommentar der Versuchspersonen, dass sie Geräusche, die zu verweilen/trödeln schienen ("loitering"), als lästiger beurteilten als die anderen Geräusche. Auch Torija et al. (2020) fanden, dass sich das Lästigkeitsurteil der verschiedenen Geräuschkulissen bei Anwesenheit einer Drohne über einen Pegelbereich von rund 6 dB kaum änderte. Gemäss Christian and Cabell (2017) könnte dieser Effekt mithilfe eines Verweil-Malus ("loitering penalty") basierend auf geometrischen Betrachtungen berücksichtigt werden, welche die in Abschnitt 4.4.2.1 beschriebene psychoakustische Pegeldifferenz wohl grösstenteils erklären könnte. Allerdings stellt sich den Autoren des vorliegenden Berichts hier die Frage, ob nicht spezifische akustische Charakteristiken wie beispielsweise die Tonalität zusätzlich – separat – berücksichtigt werden müssten.

Neben einer schnelleren Fluggeschwindigkeit könnte es bezüglich der Lärmwirkungen zudem sinnvoll sein, Drohnen in Korridoren entlang lauter Umgebungen (z. B. Straßenverkehrsadern) zu konzentrieren: Je lauter die Geräuschumgebung, desto geringer die potenzielle zusätzliche hervorgerufene Lästigkeit durch Drohnenlärm (Begault, 2020; Torija et al., 2020). Ähnliche Befunde wurden auch in Studien zu anderen Lärmquellen gefunden, beispielsweise wenn Hintergrundgeräusche lauter als Windenergieanlagen sind und diese somit teilweise maskieren (Bolin et al., 2010). Allerdings ist zum Thema Maskierung die noch geringe Studienzahl zu beachten, und aus Lärmwirkungssicht wäre eine wirkungsgerechte Gesamtlärbetrachtung sinnvoll.

#### 4.4.2.3 Weitere Wirkungsaspekte

Neben der Lästigkeit untersuchten verschiedene Studien zusätzliche Aspekte.

Begault (2020) präsentierte in seinem Webinar<sup>16</sup> mit dem Konzept "**Annoyance – Blend – Detection**" die Idee, dass das Drohnengeräusch sich in Geräuschkulissen (Soundscape) einfügen ("Blend", d.h. Mischen) und diese nicht dominieren sollten; ein Betrieb nicht-hörbarer Drohnen (Erkennen, "Detection") ist hingegen kaum realistisch. Hierbei sind alle akustischen Eigenschaften der Drohne wichtig, welche dazu führen, dass sie die Geräuschkulisse nicht dominiert. Zu diesem Konzept sind Hörversuche geplant, um die Schwellen für Lästigkeit, Mischen und Erkennen in Abhängigkeit der Geräuschkulisse zu ermitteln. Resultate eines Pilotversuches legen eine Pegeldifferenz (Signal-Noise-Ratio) zwischen Drohnen- und Geräuschkulissen-Pegel von +10.2 dB (Lästigkeit), +2.8 dB (Mischen) und -8.2 dB (Erkennen) nahe. Ein analoges Konzept ("Annoyance – Noticeability – Audibility") wird auch in NASA (2020) als Alternative zur reinen Lästigkeits-Analyse vorgeschlagen. Es könnte eine Akzeptanz-Schwelle ("Acceptability") definiert werden, ab welcher das Geräusch erkennbar und somit als aufdringlich wahrgenommen wird.

Torija et al. (2020) untersuchten die Wirkung einer schwebenden Drohne in **verschiedenen audio-visuellen Situationen** (urbane Parks in unterschiedlichen Abständen von Straßen mit  $L_{Aeq}$  von 55 bis 70 dBA) auf die Lästigkeit (vgl. Abschnitt 4.4.2.1), Lautheit und Annehmlichkeit ("pleasantness"). Hierbei wurde die Wirkung akustischer Stimuli alleine sowie visuell-akustischer Stimuli (mit zusätzlichen Videoaufnahmen der Parks ohne und mit Drohne) untersucht. Die Drohne hatte einen negativen Effekt auf alle drei Wirkungsdimensionen. Dies war größtenteils auf den durch die Drohne verursachten Pegelanstieg zurückzuführen, aber auch auf deren akustische Eigenschaften (Abschnitt 4.4.2.1). Zudem war auch die Bildinformation wichtig, beeinflusste die verschiedenen Wirkungsdimensionen jedoch unterschiedlich stark. So beeinflusste das Video das Lautheitsurteil kaum, führte aber zu etwas geringerer Lästigkeit und erhöhte die Annehmlichkeit der präsentierten Stimuli deutlich um 47%. Insgesamt hing das subjektive Lautheitsempfinden hauptsächlich vom Pegel ab (unabhängig davon, ob die Drohne diesen bestimmte oder nicht), die Lästigkeit gleichermaßen vom Pegel und der An- bzw. Abwesenheit der Drohne, und die Annehmlichkeit am stärksten vom Pegel und gleichermaßen (schwächer) von der Drohne und der Bildinformation.

Callanan et al. (2020) untersuchten den Einfluss eines Quadcopters auf die **Kommunikation** sowie die subjektiv empfundene Lautheit und Lästigkeit in einer Warenlagersituation, welche eine mögliche Arbeitsumgebung mit Drohnenlärm darstellt. Hierzu wurden mittels eines Lautsprechers verschiedene Sprachsignale abgespielt, und zwar ohne und mit einer real schwebenden Drohne, welche sich beim Lautsprecher befand. Es wurden sequenziell zwei Drohnentypen unterschiedlicher Emissionsstärke eingesetzt (knapp 70 dB(A) vs. knapp 85 dB(A) in Drohnen-nähe). Wie zu erwarten, nahmen Lästigkeit und Lautheit mit zunehmendem Drohnenlärm zu, und die subjektiv empfundene und objektiv gemessene Kommunikation (Sprachverständnis-Tests) wurden umso mehr beeinträchtigt, je lauter die Drohne im Vergleich zum Sprachsignal war (Signal-Noise-Ratio). Gemäss der Autoren dürfte auch der Nachhall des Raums für das Sprachverständnis eine gewisse Rolle gespielt haben, doch wurde dies nicht untersucht (Callanan et al., 2020).

#### 4.4.2.4 Limitationen der Studien

Alle hier betrachteten Studien (Tabelle 9) zeichnen sich durch ein sauberes Studiendesign aus. Dennoch sind bei der Interpretation des systematischen Reviews verschiedene Studienlimitationen zu betrachten.

<sup>16</sup> vgl. <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=pZvKCM5aPgk> (zuletzt besucht am 12.11.2021).

Generell ist die ökologische Validität der heute verfügbaren Literatur zu psychoakustischen Untersuchungen von Drohnenlärm limitiert, da bislang ausschließlich Laborstudien mit einer (für Laborstudien üblichen) begrenzten Anzahl von (25–50) Versuchspersonen zur psychoakustischen Wirkung von Drohnen verfügbar sind, mit einem deutlichen Fokus auf die Lästigkeit. Eine direkte Übertragung dieser Ergebnisse auf die Langzeit-Lärmbelastigung im Feld und auf die Gesamtbevölkerung ist daher nicht möglich. Auch bleibt unbeantwortet, inwieweit die Resultate zum Flugzustand Schweben auf andere Flugzustände (insb. Über- und Vorbeiflüge) übertragbar sind.

Zudem weisen einzelne Studien spezifische Limitationen auf. So präsentierten erstens Callanan et al. (2020) die Stimuli immer in derselben Reihenfolge; eine Verzerrung wegen serieller Positionseffekte (vgl. z. B. Cohen, 2013) ist nicht auszuschließen. Zweitens weisen verschiedene Studien Limitationen bezüglich der statistischen Analyse auf. So berücksichtigten Callanan et al. (2020) und Rizzi et al. (2017) die wiederholten (und somit voneinander abhängigen) Beobachtungen der Versuchspersonen in der statistischen Analyse nicht, was die Annahme unabhängiger Beobachtungen verletzt. Drittens verwendeten Callanan et al. (2020) keine ICBEN-Skala für die Lästigkeit, während Christian and Cabell (2017) zwar die ICBEN 5-Punkte Skala verwendeten, die Resultate aber in eine 10-Punkte-Skala "übersetzten". Beides vermindert die Vergleichbarkeit mit anderen Studien. Viertens erwähnt keine der Studien außer der von Christian and Cabell (2017), welche Studieninformation den Versuchspersonen gegeben wurde. Dies ist insofern eine Studienlimitation, als unbekannt bleibt, inwieweit die Studien dem möglichen Einfluss von Kontextfaktoren Rechnung tragen (z. B. Einsatz der Drohne, vgl. Abschnitt 4.4.3). Und fünftens besteht eine weitere Limitation mehrerer Studien bezüglich ökologischer Validität darin, dass die Nachbearbeitung eines Teils der Stimuli durch reine Pegelskalierung, d.h. ohne Ausbreitungsfilterung, vorgenommen wurde (Christian and Cabell, 2017; Gwak et al., 2020; Torija and Li, 2020; Torija et al., 2020; Torija et al., 2019). Sechstens liefern Gwak et al. (2020) Hinweise darauf, dass die Lästigkeit mit zunehmender Drohnengröße steigt. Neben der Drohnengröße kann aber u.a. auch die Tonalität der Drohnen einen Einfluss auf das Lästigkeitserleben haben (vgl. Abschnitt 4.4.2.1). Diese blieb in der Studie von Gwak et al. (2020) jedoch unberücksichtigt. Eine abschließende Bewertung der Wirkung der Drohnengröße kann beruhend auf der Studie daher nicht erfolgen. Auch Christian and Cabell (2017) untersuchen verschieden große Drohnen. Da die Drohnengröße jedoch nicht als unabhängige Variable untersucht wurde, können keine Aussagen zu deren Einfluss auf die Lästigkeit gemacht werden (vgl. Figur 8 in Christian and Cabell, 2017).

Und schließlich benutzten nicht alle Studien ökologisch valide akustische Stimuli. Die akustisch realistischsten Stimuli verwendeten die Studien der NASA (Christian and Cabell, 2017; Rizzi et al., 2017), wo Über- bzw. Vorbeiflüge von Drohnen mittels eines dreidimensionalen Reproduktionssystem über Lautsprecher auralisiert wurden. Gwak et al. (2020) gaben die mittels Kunstkopf-Aufnahmen gewonnenen Stimuli über Kopfhörer wieder, und Callanan et al. (2020) verwendeten real schwebende Drohnen für ihre Versuche. Beides weist ebenfalls einen hohen Realitätsgrad auf. Torija et al. (2020) und Torija and Li (2020) hingegen verwendeten Monoaufnahmen für den Betriebszustand Schweben. Dies hat wegen fehlender realistischer räumlicher Wiedergabe und somit auch fehlender Immersion eine geringere ökologische Validität zur Folge, auch wenn die Autoren der ersteren Studie argumentieren, dass es Teil des Versuchsdesigns war, Monoaufnahmen mit 360° Videoaufnahmen zu kombinieren. Zudem wurden die Aufnahmen im Labor mit einer fixierten Drohne durchgeführt, was die Repräsentativität für "echtes" Schweben wegen potenziell anderer Geräuschcharakteristiken fixierter als nichtfixierter Drohnen in Frage stellt.

Obige Limitierungen wurden auch in der Bewertung der Studienqualität berücksichtigt (vgl. Tabelle 9).

#### 4.4.3 Akzeptanz von Drohnen

Zur Akzeptanz von Drohnen in der Öffentlichkeit ist bereits eine Reihe von Studien verfügbar. Ein abschließender Überblick kann hier nicht gegeben werden; dies wäre Gegenstand eines separaten systematischen Reviews. Hier sollen anhand einiger Studien wichtige Aspekte erwähnt und soweit möglich hinsichtlich Lärm und Wahrnehmung interpretiert werden. Nachfolgend werden exemplarisch eine australische (Clothier et al., 2015), schweizerische (Klauser and Pedrozo, 2017), amerikanische (Aydin, 2019), und deutsche Befragung (Eißfeldt et al. (2020), Eißfeldt und Vogelpohl, (2019) sowie ein dänisches Feldexperiment (Bajde et al., 2017) diskutiert. Davon geben insbesondere Aydin (2019) und Eißfeldt et al. (2020) einen guten ersten Überblick über die heutige Literatur. Interessanterweise fanden Merkert and Bushell (2020) in einem kürzlich publizierten systematischen Review, dass statt "klassischer" Forschungsthemen zu Drohnen wie Datenschutz, Akzeptanz und Sicherheit zunehmend Studien zum Betrieb einschließlich Interaktion mit und Auswirkungen auf andere Luftraumnutzer durchgeführt werden.

Obige (wie auch andere) Studien decken folgende Aspekte ab: Wissen und Informationsquellen zu Drohnen, Assoziationen mit dem Begriff "Drohne", Akzeptanz der Bevölkerung von Drohnen generell, Akzeptanz verschiedener Drohneneinsätze, soziodemographische Einflussfaktoren auf die Akzeptanz, Akzeptanz von Drohnenüberflügen, Wirkung des Interviews auf die Akzeptanz, Bedenken zu Drohnen, Einfluss von Erfahrung bzw. Wissen auf die Bedenken und (reale oder hypothetische) Bereitschaft zur Verwendung von Drohnen in verschiedenen Anwendungsbereichen. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

Generell scheint heute eine eher neutrale bis sogar eher positive öffentliche Einstellung bzw. Akzeptanz zu Drohnen zu bestehen, wobei die Öffentlichkeit ihre Meinungsbildung wahrscheinlich noch nicht abgeschlossen hat (Aydin, 2019; Clothier et al., 2015; Eißfeldt et al., 2020). Allerdings wurde in einer anderen Studie eine eher ablehnende Haltung der Bevölkerung gegenüber Drohnen attestiert (Sky Limits, 2021). Bezüglich Akzeptanz zeigt sich jedoch eine deutliche Abhängigkeit vom Einsatz der Drohnen: Einsätze für Forschung, Rettung und Zivilschutz bzw. öffentliche Sicherheit genießen eine deutlich höhere Akzeptanz als die Verwendung von Drohnen als Hobby oder zu kommerziellen Zwecken wie für Foto- bzw. Videoaufnahmen oder Paketlieferung (Aydin, 2019; Eißfeldt et al., 2020; Klauser and Pedrozo, 2017). Positiv eingestellte Personen würden Drohnen selbst eher nutzen als negativ eingestellte Personen (Eißfeldt et al., 2020). Generell schlechte Akzeptanz erfahren Überflüge über das eigene Haus (Aydin, 2019; Bajde et al., 2017; Eißfeldt et al., 2020). Ein möglicher wichtiger Einflussfaktor könnten hier Bedenken im Hinblick auf die Privatsphäre sein. Dementsprechend schlugen Bajde et al. (2017) ein konzeptionelles "Privatsphären-Dreieck" ("privacy triangle") mit den Ecken "Not Knowing" (Unsicherheit), "Observed" (Informations-Privatsphäre) und "Intruded Upon" (räumliche Privatsphäre) vor. Daneben hängt die Akzeptanz auch von soziodemographischen Faktoren ab. So sind Männer Drohnen gegenüber positiver eingestellt als Frauen, und jüngere Personen weniger kritisch als ältere (Aydin, 2019; Eißfeldt et al., 2020). Zudem sind Nutzer von Drohnen und/oder besser informierte und/oder technisch interessierte Personen positiver gegenüber Drohnen eingestellt als weniger informierte/interessierte Personen (Aydin, 2019; Eißfeldt et al., 2020).

Drohnen werden mit verschiedenen Begriffen assoziiert. In der Studie von Eißfeldt et al. (2020) wurden in freier Wort-Assoziation die Begriffe Spionage/Überwachung, Film/Video/Foto, Freizeit/Hobby, Paketlieferung/Transport, Gefahr/Unfall/Bedrohung und Militär/Waffe am häufigsten erwähnt; Lärm wurde hingegen kaum erwähnt, namentlich nur sechs Mal bei insgesamt 715 Wortassoziationen (Eißfeldt and Vogelpohl, 2019). Auch bezüglich Bedenken wurde Lärm am

wenigsten erwähnt, während Kriminalität und Missbrauch, sowie Verletzung der Privatsphäre am häufigsten genannt wurden (Eißfeldt et al., 2020). Große Bedenken hinsichtlich der Privatsphäre wurden auch in anderen Studien gefunden (Bajde et al., 2017; Klauser and Pedrozo, 2017). Hierbei spielen insbesondere mit Kamera ausgestattete Drohnen eine Rolle (Aydin, 2019). Geringere Bedenken wegen Lärm fanden auch Clothier et al. (2015), während in der Studie von Aydin (2019) die Öffentlichkeit u.a. auch wegen der potenziellen Lärmbelastung besorgt war.

Mit Ausnahme der Studie von Eißfeldt et al. (2020) sowie Eißfeldt und Vogelpohl (2019) beschäftigten sich die hier diskutierten Studien kaum oder gar nicht mit **Lärmaspekten**. Die Autoren fanden, dass Lärm im Zusammenhang mit Bedenken bezüglich Drohnen nur wenig erwähnt wurde (s. o.); ob man jedoch Lärm-besorgt war oder nicht, bestimmte die Akzeptanz am stärksten, wie eine statistische Analyse nahelegte (Eißfeldt et al., 2020). Spezifisch für Lieferdrohnen hingegen waren Sicherheitsbedenken der wichtigste Faktor für die Akzeptanz, gefolgt von Lärm (Eißfeldt, 2020). Weiter nahmen verschiedene Personengruppen Drohnenlärm als Risiko unterschiedlich wahr. So waren Personen, die bereits Erfahrung mit Drohnen hatten, wegen des Lärms weniger besorgt als Personen ohne Erfahrung, während Personen, welche Drohnen tatsächlich schon gehört hatten, besorgter waren als diejenigen, die noch keine gehört hatten (Eißfeldt und Vogelpohl, 2019).

Da die Öffentlichkeit ihre Meinungsbildung wahrscheinlich noch nicht abgeschlossen hat, und da das Wissen über Drohnen die Akzeptanz beeinflussen kann (s. o.), sollte die Öffentlichkeit über Strategien wie die Risikoverminderung beim Betrieb von Drohnen informiert werden (Aydin, 2019). Dabei sollten insbesondere auch Massenmedien als Kommunikationskanäle genutzt werden, da die Bevölkerung ihr Wissen größtenteils aus Massenmedien und Filmen zu beziehen scheint (Aydin, 2019). Allerdings ist der Einfluss von Information auf die Akzeptanz nicht restlos geklärt. So beeinflusste in den Studien von Aydin (2019) und Eißfeldt et al. (2020) das Interview selbst, in welchem Vor- und Nachteile von Drohnen dargestellt wurden, die Einstellung der Studienteilnehmer kaum.

Obige Ausführungen zeigen, dass der (potenziell lästige) Lärm von Drohnen durchaus einen Einfluss auf deren Akzeptanz in der Bevölkerung haben könnte. Dies könnte in Zukunft wichtig werden, wenn die Bevölkerung vermehrt Drohnenlärm ausgesetzt ist. Die Lärmexposition der Bevölkerung durch Design und Betrieb der Drohnen möglichst gering zu halten, wird wichtig sein, um die Akzeptanz der Drohnen nicht zu gefährden. Weiter ist zu erwarten, dass die Sichtbarkeit von Drohnen wegen Bedenken hinsichtlich der Privatsphäre für die Lärmbelästigung bzw. die Lästigkeit eine wichtige Rolle spielt (audio-visuelle Interaktionen). Schließlich legt die unterschiedliche Akzeptanz verschiedener Einsatzgebiete von Drohnen die Vermutung nahe, dass der Kontext (d.h. der Sach- und Situationszusammenhang, vgl. Abschnitt 4.2), welcher Versuchspersonen in einer Laborstudie gegeben wird, einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Resultate haben könnte.

#### 4.4.4 Diskussion des systematischen Reviews

Das systematische Review zeigt, dass bislang (Stand: Datenbanken ca. Anfang September 2020; Handsuche ca. Ende November 2020) nur wenige Laborstudien mit psychoakustischen Untersuchungen zu Drohnenlärm verfügbar sind, und dass noch keine Feldstudien durchgeführt wurden (Tabelle 9). Zum selben Schluss kommen auch andere Übersichtsarbeiten (Christen et al., 2018; NASA, 2020), und ITF (2021) empfiehlt entsprechend, Forschung zur Wahrnehmung bzw. Lästigkeit von Drohnenlärm zu unterstützen. Die heute verfügbaren Studien liefern jedoch ein recht einheitliches Bild und reihen sich gut in die allgemeine Literatur zu Umweltlärmwirkungen ein.

Bislang wurde hauptsächlich die Wirkung von Multicoptern (insb. Quadcopter) untersucht, ausschließlich für die Flugzustände geradliniger Überflug und Schweben, mit deutlichem Fokus auf die Wirkungsdimension Lästigkeit (Tabelle 9; vgl. auch Zawodny et al., 2018). Daneben wurden auch die subjektiv empfundene Lautheit und Annehmlichkeit, Sprachverständnis, sowie die Präferenz verschiedener Schallquellen untersucht.

Trotz der geringen Anzahl Untersuchungen vermitteln die Studien ein konsistentes Bild mit vergleichbaren Ergebnissen zu Drohnenwirkungen, auch im Vergleich zu anderen Lärmarten, und erhärten den Befund des erhöhten Lästigkeitspotenzials von Drohnen.

Die Studien legen nahe, dass Drohnen bei gleichem Pegel lästiger wirken als Straßenfahrzeuge und Flugzeuge. Dieses **erhöhte Lästigkeitspotenzial von Drohnen** lässt sich mit psychoakustischen Pegeldifferenzen in der Größenordnung von 5 dB quantifizieren (Abschnitt 4.4.2.1). Dies zeigt, dass verfügbare Lärmwirkungsmodelle, z. B. zur Abschätzung der von Flugzeugen hervorgerufenen hohen Belästigung (Miedema and Oudshoorn, 2001), sich kaum auf Drohnenlärm übertragen lassen. Um die hervorgerufenen Reaktionen in der Bevölkerung zuverlässig abschätzen und Drohnenlärm beurteilen zu können, sind somit weitere psychoakustische sowie sozioakustische Untersuchungen zu Drohnenlärm nötig.

Die erhöhte Lästigkeit von Drohnenlärm kann mit **Pegelkorrekturen** (Störungszuschlägen) abgebildet werden. Basierend auf den heute greifbaren Studien lassen sie sich jedoch solche Korrekturterme noch nicht zuverlässig quantifizieren. So ist erstens zurzeit die Datengrundlage zu gering (2 Studien mit 38 resp. 50 Versuchspersonen: Christian and Cabell, 2017; Gwak et al., 2020). Zweitens ergaben sich für Straßenfahrzeuge und Strahlflugzeuge ähnlich große Pegeldifferenzen, obwohl Fluglärm deutlich belästigender wirkt als Straßenverkehrslärm, mit einer Pegeldifferenz von > 5 dB (Brink et al., 2019; Miedema and Oudshoorn, 2001). Dass in den Laborstudien für beide Lärmarten vergleichbare Pegeldifferenzen resultierten, ist auf den sogenannten „Anker-Effekt“ von Laborstudien zurückzuführen: Jeder Versuch hat einen anderen Referenzrahmen, da der Bezug zur realen (Geräusch-)Umgebung fehlt. Dies hat zur Folge, dass die Pegeldifferenz Drohne vs. Fahrzeug von Christian and Cabell (2017) nicht direkt mit der Differenz Drohne vs. Flugzeug von Gwak et al. (2020) vergleichbar ist. Drittens fehlt zurzeit der Vergleich des Lästigkeitspotenzials von Drohnen mit Helicoptern. Torija and Li (2020) präsentierten zwar einige synthetische Stimuli in ihren Versuchen, schlossen diese jedoch aus der Analyse aus, da sie zu unrealistisch klangen. Dieser Vergleich wäre interessant, da die Multicopter eine ähnliche Bauweise wie Helicopter aufweisen und zudem in urbanen Gebieten für ähnliche Zwecke eingesetzt werden könnten. Die akustischen Signaturen beider Quellen unterscheiden sich jedoch stark, so dass deren Lärmwirkungen nicht vergleichbar sind. Schließlich wäre es wünschenswert, die individuellen Beiträge verschiedener Aspekte, insb. der Tonalität, hochfrequenten Anteile und des Verweilens (langsame Fluggeschwindigkeiten), zur totalen psychoakustischen Pegeldifferenz zu quantifizieren. Zur Definition von Pegelkorrekturen sind somit weitere Studien nötig, um die Erkenntnisse auf eine breitere (mehr Studien), einheitlichere (z. B. bezüglich akustischer und psychoakustischer Größen, Wirkungsdimensionen und deren Erhebungsmethodik) und verallgemeinerbare (z. B. Vergleich der Lärmwirkung von Drohnen, Helicoptern, Flugzeugen und Straßenfahrzeugen in einem Versuch) Datenbasis zu stellen.

Die Lästigkeit der Drohnen wird durch deren im Vergleich zu "herkömmlichen" Verkehrsarten **speziellen akustischen Eigenschaften** hervorgerufen, insbesondere durch tieferfrequente Reintöne und hochfrequentes breitbandiges Rauschen (vgl. Abschnitt 4.4.1). Diese Charakteristiken (bzw. die Unterschiede zu anderen Lärmarten) werden durch klassischen Pegelmaße wie den  $L_{Aeq}$  oder den für die Flugzeugzertifizierung üblichen effektiv wahrgenommenen Lärmpegel (Effective Perceived Noise Level, *EPNL*) bezüglich ihrer Lärmwirkung nicht adäquat abgebildet, sodass obige Pegeldifferenzen resultieren; denn je besser ein akustisches Maß die subjektive

Wahrnehmung abzubilden vermag, desto kleiner fällt die Differenz aus (Christian and Cabell, 2017). Entsprechend sind auch die heute für Flugzeuge üblichen Lärmzertifizierungsmethoden, basierend auf dem *EPNL*, für Drohnen kaum angemessen (Senzig and Marsan, 2018).

Die speziellen (psycho-)akustischen Charakteristiken können hingegen durch **psychoakustische Parameter** gut beschrieben werden (für Drohnen insbesondere die Schärfe und Tonalität, aber auch die Lautheit und Fluktuationstärke). Die Verwendung solcher Parameter vermag die quellenspezifische psychoakustische Pegeldifferenz zu vermindern. Ob sie jedoch eine entsprechende Pegelkorrektur gänzlich hinfällig machen, ist fraglich, da die Lästigkeit auch durch nicht-akustische Faktoren wie die **langsameren Fluggeschwindigkeiten** der Drohnen (Verweilen, "loitering"), sowie durch **individuelle Charakteristiken** der Bevölkerung wie Alter und Geschlecht, Lärmsensitivität, Einstellung zur Lärmquelle usw. beeinflusst wird. Dennoch sollten in Zukunft vermehrt psychoakustische Parameter eingesetzt werden, um Drohnenlärm zu beurteilen und allenfalls, um neue Designs bezüglich Lärmwirkung statt rein pegelbasiert zu optimieren ("**perception-influenced design**": Rizzi, 2016). Tatsächlich führte der Einsatz lärmoptimierter Drohnen (verminderte Gesamtemissionen, hochfrequente Komponenten und Tonalität) im Probebetrieb eines Drohnenlieferdienstes in Australien nur zu wenigen Lärmbeschwerden trotz tausender Lieferungen (Burgess, 2020).

Zwei wichtige Aspekte der Lärmwirkung von Drohnen sind zurzeit gänzlich unterforscht: der Einfluss des Kontexts und der visuell-akustischen Interaktionen.

**Kontext:** Der Kontext (Sach- und Situationszusammenhang wie z. B. Einsatzbereich der Drohnen, vgl. Abschnitt 4.2) dürfte wegen dessen Einfluss auf die Akzeptanz (vgl. Abschnitt 4.4.3) ein wichtiger Faktor für die Lästigkeit sein. Jedoch gibt außer Christian and Cabell (2017) keine der Studien Aufschluss darüber ob/welcher Kontext den Versuchspersonen gegeben wurde. Christian and Cabell (2017) gaben den Versuchspersonen keine Informationen zur Studie, und nur wenige erkannten die Drohnen als solche. Die Autoren des vorliegenden Reviews gehen daher davon aus, dass die dort ermittelte psychoakustische Pegeldifferenz weitgehend Kontext-frei ist, d.h. alleine durch die akustischen Charakteristiken hervorgerufen und nicht von der Einstellung der Versuchspersonen den Drohnen gegenüber beeinflusst wurde. Welche psychoakustische Pegeldifferenz jedoch mit entsprechendem Kontext resultiert wäre, bleibt unbeantwortet.

**Visuell-akustische Interaktionen:** Der Einfluss der Bildinformation auf das Lästigkeitsurteil akustischer Stimuli dürfte wichtig sein. Tatsächlich zeigten Torija et al. (2020), dass die Lästigkeit durch Präsentation von Bildinformation vermindert wurde. Eine geringere Lästigkeit visuell-akustischer im Vergleich zu rein akustischen Stimuli wurde auch für andere Lärmquellen gefunden (z. B. Schäffer et al., 2019, für eine Windenergieanlage). Hier könnte das Ablenken des Videos von den lästigen Geräuschen eine Rolle spielen. Hingegen untersuchte bislang keine Studie zu Drohnenlärm, welchen Einfluss die Sichtbarkeit der Drohne auf die Lästigkeit hat. Es wäre eine erhöhte Lästigkeit bei Sichtbarkeit generell zu erwarten (z. B. Bangjun et al., 2003; Schäffer et al., 2019), und speziell für Drohnen wegen Bedenken bezüglich der Sicherheit und Privatsphäre (vgl. Abschnitt 4.4.3). Schließlich könnte die Wirkung der Sichtbarkeit auch von der Umgebung abhängen. Für Windenergieanlagen beispielsweise fanden Pedersen and Larsman (2008), dass der Einfluss der (Einstellung bezüglich) Sichtbarkeit auf die Lästigkeit von der Landschaft abhängt. Inwieweit dies auch für Drohnen zutrifft, ist zurzeit nicht bekannt.

#### **Implikationen für den Themenbereich Geräuschemissionen:**

Die Arbeiten legen nahe, dass spezielle akustische Eigenschaften von Drohnen nach Möglichkeit explizit ausgewiesen werden sollten. Neben der Schalleistungs- bzw. Emissionspegeln sollte insbesondere die Tonhaltigkeit quantifiziert werden, beispielsweise als Pegelzuschlag

basierend auf der Hörbarkeit von Tönen den (ISO, 2017). Zudem sollte auch ein Terzbandspektrum ausgewiesen werden, um hochfrequente Energieanteile als Proxy für die Schärfe zu quantifizieren. Psychoakustische Parameter wären wünschenswert, sind aber heute wohl noch zu wenig verbreitet, um sie verbindlich für die akustische Charakterisierung oder gar Lärmzertifizierung von Drohnen festzulegen.

#### **Implikationen für den Themenbereich Rechtliche Rahmenbedingungen:**

Solange die Beurteilung von Drohnen anhand "klassischer" Pegelmaße wie dem  $L_{Aeq}$  vorgenommen wird, sollten für Drohnen Pegelkorrekturen definiert werden, um die erhöhte Lästigkeit bestimmter akustischer Charakteristiken abzubilden. Eine pauschale Korrektur von rund 5 dB im Vergleich zu Straßenverkehrslärm scheint vernünftig, muss aber durch weitere Studien gestützt werden. Zurzeit ist es noch nicht möglich, spezifische Korrekturterme für Tonalität, hochfrequente Breitbandgeräusche und/oder Fluggeschwindigkeit festzulegen.

#### **4.4.5 Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen**

Trotz heutigem Fokus auf die Lästigkeit sollten auch künftige Untersuchungen vorerst auf diese Wirkungsdimension fokussieren, da erstens noch eine Reihe offener Fragen besteht und da die Langzeit-Lärmbelastigung (für welche die Lästigkeit im Labor als Proxy dient) neben der Schlafstörung die wichtigste Gesundheitsbeeinträchtigung der Bevölkerung darstellt (WHO, 2011). Basierend auf dem Stand des Wissens und dessen Lücken wären hierbei folgende Studien von Interesse (vgl. hierzu auch die Empfehlungen in Abschnitt 4.4 von NASA, 2020):

- ▶ **Laborstudien:** Die Studien sollten mit hochqualitativen Stimuli wie in den NASA-Studien folgende Aspekte untersuchen:
  - **Psychoakustische Pegeldifferenzen zu anderen Transportlärmmarten:** Vergleich der durch Drohnen-, Helicopter-, allenfalls Propellerflugzeug- und Strahlflugzeugüberflügen sowie Straßenfahrzeugvorbeifahrten hervorgerufenen Lästigkeit in einer umfassenden Studie zur Bestimmung psychoakustischer Pegeldifferenzen (→ quellenspezifische Pegelkorrekturen)
  - **Einfluss von Design und Betrieb von Drohnen:** Vergleich verschiedener Multicopter-Typen unterschiedlicher Gewichtsklassen und mehrerer Flugzustände (insb. Starts, Landungen und Überflüge mit verschiedenen Nutzlasten und Geschwindigkeiten). Die Triage der Drohnen und Flugzustände sollten anhand der häufigsten Einsätze (vgl. Kap. 2.3.2) erfolgen. Spezieller Fokus sollte auf den langsamen Vorbeiflug ("loitering") gelegt werden. Um die Resultate in Zusammenhang mit bekannten Lärmmarten zu bringen, sollte mindestens eine zusätzliche Referenzschallquelle eingeschlossen werden.
  - **Besonders lästige (psycho-)akustische Charakteristiken:** Systematische Variation der (psycho-)akustischen Charakteristiken von Drohnen(stimuli), um deren Beitrag zur Lästigkeit separat zu untersuchen und nach Möglichkeit mit individuellen Pegelkorrekturen zu quantifizieren. Darauf basierend könne auch ein psychoakustisches Modell zur Abschätzung der Lästigkeit entwickelt werden.
  - Versuche zu **visuell-akustischen Interaktionen:** Es sollte untersucht werden, wie die Sichtbarkeit von Drohnen deren Lästigkeit beeinflusst und in wieweit dies von der Umgebung abhängt (z. B. städtisch vs. ländlich).

- **Klangumgebung:** Vertiefte Untersuchung des Einflusses der Klangumgebung auf die Lärmwirkung von Drohnen (analog zu Torija et al., 2020). Spezifischer Aspekt könnte hier das Konzept von "Annoyance – Blend – Detection" sein (Begault, 2020).
- **Kontext:** Systematische Untersuchung des Einflusses des Sach- und Situationszusammenhangs auf die Lästigkeit (z. B. Drohneneinsatz für Hobby oder Lieferdienst vs. Rettung). Hierzu sollte die Studieninformation für die Versuchspersonen systematisch variiert werden.
- ▶ **Feldstudien:** Für reale (Test-)Betriebe von Drohnen, z. B. für medizinische Einsätze oder als Lieferdienst, sollten Feldstudien durchgeführt werden, um ökologisch valide Abschätzungen der Lärmwirkungen von Drohnen, insb. Lärmbelästigung, zu erhalten.

Generell sind in naher Zukunft Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Lärmwirkung zu erwarten. So gab es bereits nach dem hier durchgeführten systematischen Review eine Sonderausgabe in der Zeitschrift "International Journal of Environmental Research and Public Health" zu Drohnenlärm<sup>17</sup>, wo weitere Studien zur Wirkung von Drohnenlärm publiziert wurden. (In derselben Sonderausgabe wurden auch die vorliegenden Ergebnisse der zu Geräuschmessungen von Drohnen (Kap. 3) und zu psychoakustischen Untersuchungen (Kap. 4) publiziert (Schäffer et al., 2021).

---

<sup>17</sup> Special Issue "Drone Noise: A New Public Health Challenge", URL: [https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special\\_issues/drone\\_noise](https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/drone_noise) (zuletzt besucht am 14.11.2021)

## 5 Rechtliche Rahmenbedingungen

### 5.1 Derzeitige Situation (Stand 8-2021)

#### 5.1.1 Einleitung

Die unbemannte Luftfahrt wird, soviel scheint sicher, in den kommenden Jahren immer weiter an Bedeutung gewinnen. Mit dem erhöhten Verkehrsaufkommen unbemannter Luftfahrzeuge (im Folgenden „Drohnen“ genannt) steigt der Bedarf rechtlicher Rahmenbedingung für deren Konstruktion und Betrieb (siehe hierzu auch Josipovic, 2019 und Krumm, 2019). Für die Industrie besteht eine besondere Herausforderung derzeit darin, ein neues Produkt zu entwerfen und zu produzieren, für welches nicht alle einzuhaltenden rechtlichen Parameter abschließend feststehen. Die Regulierung wird ihrerseits dadurch erschwert, dass die technische Entwicklung noch anhält. Daher wurde auch bei den Drohnen auf EU-Ebene zunächst ein erster regulatorischer Rahmen geschaffen, der nun fortgeschrieben werden wird und muss. Dasselbe gilt auf der nationalen Ebene. Nicht nur die technische Entwicklung, auch die Rechtslage bleibt so im Fluss.

Nachfolgend wird in Kap. 5.1.3 bis 5.1.4 der derzeitige Rechtsrahmen mit Stand 8-2021 im Überblick dargestellt. In Kap.5.1.5 erfolgt eine Anwendung auf vier Beispiele aus der Praxis. Davon ausgehend wird in Kap. 5.2.1 der Frage nachgegangen, wie eine mögliche Weiterentwicklung der rechtlichen Vorgaben zum drohnenbezogenen Lärmschutz erfolgen könnte.

#### 5.1.2 Vorgaben über die Zulassung und Luftraumnutzung für Drohnen im Unionsrecht

##### 5.1.2.1 Die EASA-Grundverordnung 2018/1139

Den Grundpfeiler für die Regulierung des EU-Luftverkehrs setzt seit 2018 die als European Union Aviation Safety Agency (EASA) - Grundverordnung bezeichnete Verordnung 2018/1139<sup>18</sup>. Ihre Vorgängerverordnung 2016/2008 schloss unbemannte Luftfahrzeuge mit einer maximalen Startmasse (maximum take-off mass, MTOM) von bis zu 150 kg noch von ihrem Anwendungsbereich aus.<sup>19</sup> Deren praktische Relevanz für den Drohnenmarkt war daher relativ gering (siehe auch Krumm 2019, S. 114 f und Josipovic 2019, S. 439 f). Dies ändert sich mit der neuen EASA-Grundverordnung, die in ihrem Anwendungsbereich<sup>20</sup> nun sämtliche Drohnen erfasst. Ihnen ist der siebte Abschnitt der Grundverordnung gewidmet.

Nach Art. 55 der Grundverordnung 2018/1139 gelten für die Konstruktion, die Herstellung, die Instandhaltung und den Betrieb von Drohnen die grundlegenden Anforderungen des Anhang IX

<sup>18</sup> Verordnung (EU) 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04.07.2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 2111/2005, (EG) Nr. 1008/2008, (EU) Nr. 996/2010, (EU) Nr. 376/2014 und der Richtlinien 2014/30/EU und 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 552/2004 und (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EWG) Nr. 3922/91 des Rates, ABl. L 212/1 vom 22.08.2018.

<sup>19</sup> S. Artikel 4 Abs. 1 und 4 in Verbindung mit Anhang II, lit. i) der Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Februar 2008 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Europäischen Agentur für Flugsicherheit, zur Aufhebung der Richtlinie 91/670/EWG des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1592/2002 und der Richtlinie 2004/36/EG, ABl. L 79/1 vom 19.03.2008.

<sup>20</sup> Nach Art. 2 Absatz 1 Buchstaben a und b der Verordnung 2018/1139, s. deren Art. 55.

der Grundverordnung. Dazu gehört auch die Berücksichtigung des Umweltschutzes.<sup>21</sup> Über einen Verweis auf Anhang III müssen Drohnen so konstruiert sein, dass Lärm soweit wie möglich minimiert wird.<sup>22</sup> Jenseits dieser recht allgemein gehaltenen Vorgaben bietet die EASA-Grundverordnung vor allem die regulatorische Grundlage für weitergehende drohnenbezogene Vorgaben. Diese werden auf delegierte Durchführungsrechtsakte verlagert, zu deren Erlass die EU-Kommission in Bezug auf den Betrieb, das beteiligte Personal einschließlich der Fernpiloten und der an diesen Tätigkeiten beteiligten Organisationen ermächtigt wird.<sup>23</sup> Dasselbe gilt für Vorgaben zur Konstruktion, Herstellung und Instandhaltung unbemannter Luftfahrzeuge in Form der Ermächtigung sog. delegierter Rechtsakten der EU-Kommission.<sup>24</sup> Die EU reguliert damit sowohl betriebs- als auch produktbezogene Vorgaben für Drohnen.

### 5.1.2.2 Verordnungen der EU-Kommission

Die EU-Kommission hat von diesen Ermächtigungen Gebrauch gemacht:

- ▶ In Bezug auf die Anforderungen an die *Konstruktion und Herstellung* (sowie Betreiber aus Drittländern) finden sich Konkretisierungen in der Delegierten Verordnung 2019/945.<sup>25</sup>
- ▶ Vorschriften und Verfahren für den *Betrieb* unbemannter Luftfahrzeuge finden sich in der Durchführungsverordnung 2019/947.<sup>26</sup>

Beiden Rechtsakten aus 2019, die im vergangenen Jahr signifikant modifiziert und ergänzt wurden, liegt die in Art. 3 ff. der betriebsbezogenen Durchführungsverordnung 2019/947 vorgegebene Unterscheidung zwischen den Betriebskategorien „offen“, „speziell“ und „zulassungspflichtig“ zugrunde (s. auch Art. 2 der konstruktions- und herstellungsbezogenen Delegierten Verordnung 2019/945). Die Unterscheidung der drei Kategorien knüpft vor allem an das Betriebsrisiko der Drohnen an, sodass Aspekte wie die Nähe zu Menschen<sup>27</sup> oder der Transport von gefährlichen Gütern ebenso eine Rolle spielen<sup>28</sup>, wie die Größe und die Masse einer Drohne.<sup>29</sup> Je größer das Risiko, desto mehr Vorgaben und Einschränkungen sind bei der Zulassung und dem Betrieb zu berücksichtigen.

<sup>21</sup> Siehe etwa die Ziffer 1.1 und 1.3 von Anhang IX. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass die Kommission über die DurchführungsVO bzw. einen delegierten Rechtsakt auch die Anhänge II, IV und V auf Drohnen erstrecken kann. Hiervon hat die Kommission bisher keinen Gebrauch gemacht.

<sup>22</sup> S. Ziffer 3 des Anhang IX.

<sup>23</sup> Art. 57 Verordnung 2018/1139.

<sup>24</sup> Art. 58 Verordnung 2018/1139.

<sup>25</sup> Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12.03.2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme, ABl. L 152/1 vom 11.06.2019. Sie trat zwanzig Tage nach der Veröffentlichung im Amtsblatt in Kraft, s. deren Art. 42.

<sup>26</sup> Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24.05.2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge, ABl. L 152/45 vom 11.06.2019. Der Geltungsbeginn wurde infolge der SARS-CoV-2-Pandemie auf den 31.12.2020 verschoben, s. DurchführungsVO (EU) 2020/746 der Kommission vom 04.06.2020 zur Änderung der DurchführungsVO (EU) 2019/947 hinsichtlich der Verschiebung der Anwendungsfristen bestimmter Maßnahmen im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie.

<sup>27</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. c) DurchführungsVO 2019/947. Hiernach sind Drohnen auch „in sicherem Abstand zu Menschen“ zu halten.

<sup>28</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. f) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>29</sup> Siehe zum Beispiel Art. 4 Abs. 1 lit. b) DurchführungsVO 2019/947 (offene Kategorie: bis zu 25 kg); Art. 40 Abs. 1 lit. a) Delegierte VO 2019/945 i.V.m. Art. 6 DurchführungsVO 2019/947 (zulassungspflichtige Kategorie: Drohnen mit einer charakteristischen Abmessung von mehr als 3m).

#### 5.1.2.2.1 Die „offene“ Kategorie

Mit der offenen Kategorie sind die geringsten Voraussetzungen für den Drohnenbetrieb verbunden. Es bedarf keiner Genehmigung. Auch muss zuvor keine Betriebserklärung abgegeben werden.<sup>30</sup>

Drohnen, die in der offenen Kategorie betrieben werden sollen, müssen grundsätzlich einer der im Anhang zur Delegierten VO 2019/945 festgelegten Drohnenklassen entsprechen.<sup>31</sup> Dabei gilt:

- ▶ Sie dürfen lediglich eine MTOM von bis zu 25 kg aufweisen<sup>32</sup>
- ▶ und nur unter ständiger Beobachtung durch den Fernpiloten oder unter anderweitiger visueller Kontrolle – geflogen werden (sog. VLOS-Betrieb).<sup>33</sup>
- ▶ Ein Betrieb ist mit Ausnahme von Hindernisüberflügen nur bis zu einer Höhe von 120 Meter über dem nächstgelegenen Punkt auf der Erdoberfläche erlaubt.<sup>34</sup>
- ▶ Der Flug über Menschenansammlungen<sup>35</sup> ist nicht gestattet.<sup>36</sup>
- ▶ Gefährliche Güter dürfen nicht transportiert werden,
- ▶ es dürfen keine Materialien abgeworfen werden.<sup>37</sup>

Der Betrieb in der offenen Kategorie ist in drei Unterkategorien (A1 – A3) aufgeteilt,<sup>38</sup> in denen wiederum eine Reihe von Begrenzungen eingreifen. Die Abstufung orientiert sich insbesondere auch an der Nähe des geplanten Betriebs zu Menschen. Details ergeben sich aus Teil A des Anhangs der Durchführungsverordnung 2019/947.

Für die (regelmäßig in der offenen Kategorie betriebenen) Luftfahrzeugklassen C1 und C2 mit einer Startmasse bis 4 kg MTOM gibt Anhang Teil 2 zur Delegierten Verordnung 2019/945 in Bezug auf Konstruktion und Herstellung maximale Schalleistungspegel vor (s. Teil 15 des Anhangs dieser VO bzw. nachstehende Tabelle 10):

<sup>30</sup> Art. 3 Abs. 1 DurchführungsVO 2019/947.

<sup>31</sup> Siehe Art. 4 Abs. 1 lit. a) DurchführungsVO 2019/947. Die „offene“ Betriebskategorie knüpft ihrerseits an die in den Teilen 1 bis 5 des Anhangs der Delegierten VO 2019/945 festgelegten Drohnenklassen an (C0-C4). Zudem stellt Art. 4 Abs. 1 Delegierte VO 2019/945 an Drohnen in der „offenen“ Kategorie wiederum die Anforderung, dass sie mit den Vorgaben der Teile 1 bis 6 des Anhangs übereinstimmen müssen. Teil 6 des Anhangs gilt für Zusatzgeräte für eine direkte Fernidentifizierung, ist also keine eigenständige zusätzliche Drohnenklasse.

<sup>32</sup> S. Art. 4 Abs. 1 lit. b) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>33</sup> Siehe Art. 4 Abs. 1 lit. d) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>34</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. e) DurchführungsVO 2019/947. Die Norm ist missverständlich formuliert, denn sie stellt eine Obergrenze dar und nicht etwa eine „Mindesthöhe“, die dauerhaft einzuhalten ist.

<sup>35</sup> Zu diesem Begriff siehe Art. 2 Nr. 3 DurchführungsVO 2019/947.

<sup>36</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. c) DurchführungsVO 2019/947. Hiernach gilt, dass das unbemannte Luftfahrzeug „in einer sicheren Entfernung von Menschen gehalten und nicht über Menschenansammlungen geflogen wird“.

<sup>37</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. f) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>38</sup> Art. 4 Abs. 2 DurchführungsVO 2019/947 in Verbindung mit Teil A des Anhangs.

**Tabelle 10 Delegierte VO 2019/945: Maximale Schalleistungspegel je UA-Klasse (einschließlich Übergangszeiträumen)**

UA-Klasse	MTOM in Gramm	Maximaler Schalleistungspegel $L_{WA}$ in dB		
		Ab Inkrafttreten	Ab 2 Jahre nach Inkrafttreten	Ab 4 Jahre nach Inkrafttreten
C1	$250 \leq m < 900$	85	83	81
C2	$900 \leq m < 4000$	$85 + 18,5 \lg(m/900)$	$83 + 18,5 \lg(m/900)$	$81 + 18,5 \lg(m/900)$

Dabei ist „lg“ die Basis 10 des Logarithmus

Quelle: Delegierte Verordnung 2019/94, Teil 15

Für die Klasse C3 ist ein garantierter Höchstwert anzugeben, der jedoch nicht vorgegeben wird (s. Teil 14 des Anhangs der VO). Eine Regelung zur Sammlung der für die einzelnen Drohnen ermittelten Schalleistungspegel, wie mit Artikel 16 der EU-Richtlinie 2000-14<sup>39</sup> für zur Verwendung im Freien vorgesehene Geräte und Maschinen vorgesehen, findet sich nicht.

Die vorstehend genannten Anforderungen gelten allerdings nicht für Starrflügler. Es ist zu vermuten, dass dies darin begründet ist, dass Starrflügler vielfach nicht in der Lage sind, über einem Punkt zu schweben. Dies ist jedoch der Betriebszustand, den die Drohne während der Schalleistungsmessungen einnehmen sollen. Um Schalleistungsmessungen an Drohnen einer beliebigen Bauform vornehmen zu können, ist daher das Messverfahren zu überarbeiten oder mindestens zu ergänzen. Unabhängig davon existieren bislang keine Geräuschgrenzwerte für Drohnen mit einer MTOM von mehr als 4 kg.

Damit liegt mit der Verordnung derzeit keine umfassende Regulierung von Grenzwerten für Geräuschemissionen von Drohnen im offenen Bereich vor, es finden sich gleichwohl ausdrücklich konkrete lärmbezogene Vorgaben.

#### 5.1.2.2.2 Die „spezielle“ Kategorie

Soweit Drohnen weder in der offenen noch der zulassungspflichtigen Kategorie betrieben werden, fallen sie unter die spezielle Kategorie (siehe Art. 5 Abs. 1 Durchführungsverordnung 2019/947).

Diese Betriebsart unterliegt grundsätzlich einer Genehmigungspflicht durch die Mitgliedstaaten. Alternativ ist eine Konformitätserklärung des hierzu (nach Durchlaufen eines Genehmigungsverfahrens) besonders qualifizierten Betreibers möglich.<sup>40</sup>

Die Genehmigungserteilung richtet sich nach Art. 5 Abs. 1 und Art. 12 Durchführungsverordnung 2019/947. Dem Antrag für die Betriebsgenehmigung ist eine Risikobewertung gemäß Art. 11 Durchführungsverordnung 2019/947 beizufügen.<sup>41</sup> Die Genehmigung setzt u.a. auch voraus, dass der Antragsteller zuvor erklärt hat, dass der beabsichtigte Betrieb die Vorschriften zum Umweltschutz einhalten wird.<sup>42</sup>

<sup>39</sup> Richtlinie 2000/14/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 8.5.2000 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehene Geräte und Maschinen, geändert durch Richtlinie 2005/88/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2005

<sup>40</sup> S. für Details Art. 5 DurchführungsVO 2019/947.

<sup>41</sup> Art. 5 Abs. 2 DurchführungsVO 2019/947.

<sup>42</sup> Art. 12 Abs. 2 lit. c) DurchführungsVO 2019/947. Siehe auch UAS.SPEC.050 in Teil B des Anhangs zur DurchführungsVO 2019/947.

Die Genehmigung kann für einzelne oder mehrere Einsätze erteilt werden.<sup>43</sup> Soweit der geplante Betrieb einem der in Anlage 1 des Anhangs festgelegten Standardszenarien entspricht. Bislang sind zwei erste Szenarien eingeführt worden:

- ▶ Betrieb über einem kontrollierten Bereich am Boden in einem bewohnten Gebiet innerhalb des Sichtbereichs des Piloten (VLOS)
- ▶ Betrieb über einem kontrollierten Bereich am Boden in einem dünn besiedelten Gebiet mit Luftraumbeobachtern außerhalb des Sichtbereichs des Piloten (BVLOS)

Vom Betreiber wird demgegenüber lediglich eine Erklärung über die Konformität mit dem Standardszenario verlangt. (siehe auch EASA Opinion 05/2019 sowie <sup>44</sup>) Ist der Betreiber in Besitz eines sogenannten „Betriebszeugnisses für Leicht-UAS“ (kurz: LUC)<sup>45</sup>, kann er den Betrieb der erfassten Drohnen selbst genehmigen.<sup>46</sup>

Die Regelungen dienen vornehmlich der Sicherheit des Drohnenbetriebs. Abgesehen von der vorgenannten Erklärung, wonach der beabsichtigte Betrieb unter anderem die Vorschriften der Union und der Mitgliedstaaten zum Umweltschutz einhalten wird,<sup>47</sup> ist der Betreiber angehalten, „Leitlinien für Fernpiloten für die Planung des UAS-Betriebs [aufzustellen], damit Belästigungen, auch durch Lärm und sonstige Emissionen für Mensch und Tier so gering wie möglich gehalten werden“.<sup>48</sup> Der Betreiber hat zudem ein unbemanntes Luftfahrzeug einzusetzen, das so konstruiert ist, dass Lärm und sonstige Emissionen unter Berücksichtigung des beabsichtigten Betriebs und der geografischen Gebiete, in denen der Lärm und die sonstigen Emissionen von Luftfahrzeugen ein Problem darstellen können, minimiert werden.

Drohnen, die in der „speziellen“ Kategorie betrieben werden, unterliegen, soweit ersichtlich, derzeit keinen für diese Kategorie angeordneten speziellen Konstruktionsvorgaben zu Lärmemissionen. Gemäß Art. 40 Abs. 3 Delegierte Verordnung 2019/945 müssen die Drohnen in der speziellen Kategorie lediglich so konstruiert sein, dass sie die Anforderungen an den Betrieb (Betriebsgenehmigung) in dieser Kategorie erfüllen können.

Soweit aus der Betriebsgenehmigung hervorgeht, dass die Drohne, die eigentlich in der speziellen Kategorie betrieben werden soll, ein Betriebsrisiko verursacht, welches über Vorgaben in der Betriebsgenehmigung nicht angemessen abgemildert werden kann, unterliegt diese Drohne einer Zulassungspflicht.<sup>49</sup> Dann gelten die nachfolgenden Ausführungen.

#### **5.1.2.2.3 Vorgaben in der „zulassungspflichtigen“ Kategorie**

Für Drohnen, die in der „zulassungspflichtigen“ Kategorie eingesetzt werden sollen, gelten die strengsten Anforderungen. Sie unterliegen – in Bezug auf Produkt und Betrieb – den allgemeinen Regeln der bemannten (zivilen) Luftfahrt.<sup>50</sup> Ausgehend von Art. 40 Abs. 2 Delegierte VO 2019/945 greifen für sie damit alle Vorgaben, die in der Luftfahrt generell zu beachten

<sup>43</sup> Art. 5 Abs. 4 lit. a) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>44</sup> Art. 5 Abs. 5, 12 Abs. 5 DurchführungsVO 2019/947 und Anlage 1 des Anhangs der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, STS-01 und STS-02;

<sup>45</sup> Siehe Anhang Teil C zur DurchführungsVO 2019/947.

<sup>46</sup> DurchführungsVO 2019/947, Art. 5 Abs. 6 lit. a) in Verbindung mit UAS.LUC.060 im Anhang Teil C der DurchführungsVO 2019/947

<sup>47</sup> Art. 12 Abs. 2 lit. c der DurchführungsVO 2019/947.

<sup>48</sup> Siehe UAS.SPEC.050 in Teil B des Anhangs zur DurchführungsVO 2019/947.

<sup>49</sup> Vgl. Art. 40 Abs. 1 lit. d) Delegierte VO 2019/945 in Verbindung mit Art. 12 Abs. 4 lit. b) iii) DurchführungsVO 2019/947. Siehe hierzu auch den 46. Erwägungsgrund zur Delegierten VO 2019/945.

<sup>50</sup> Art. 40 Abs. 2 Delegierte VO 2019/945.

sind, und damit u.a. die Lärmgrenzwerte, die für Luftfahrzeuge nach dem ICAO Annex 16 - Environmental Protection - Volume I - Aircraft Noise zum Internationalen Abkommen über die zivile Luftfahrt gelten.<sup>51</sup>

In die zulassungspflichtige Kategorie fallen neben Drohnen, deren Betriebsrisiko anders als vorstehend beschrieben nicht abgemildert werden kann,

- ▶ Drohnen, deren charakteristische Abmessung mindestens 3 m beträgt und die so konstruiert sind, dass sie über Menschenansammlungen betrieben werden können,
- ▶ Drohnen, die für die Beförderung von Menschen konstruiert sind,
- ▶ Drohnen, die für den Transport gefährlicher Güter konstruiert sind und ein hohes Maß an Robustheit zur Minderung der Risiken für Dritte bei einem Unfall aufweisen
- ▶ und bei denen Menschenansammlungen überflogen, Menschen befördert oder aber gefährliche Güter transportiert werden, welche bei einem Unfall ein hohes Risiko darstellen können.<sup>52</sup>

Die EASA hat bereits angekündigt, dass nach und nach alle wesentlichen Vorgaben für die Zulassung aus der bemannten Luftfahrt überarbeitet und angepasst werden müssten, um auf Drohnen sinnvoll angewandt werden zu können. Dieser Aufgabe will die Agentur sich schrittweise nähern (vgl. EASA Certified Category – Civil Drones 2021). Weitergehende Regelungen zum Lärmschutz für den Drohnenbetrieb aus anderen Regelungen der EU sind nicht ersichtlich.<sup>53</sup>

### 5.1.2.3 Spielräume für Mitgliedstaaten: Geografische UAS-Gebiete

Für Drohnen bestehen im Lichte dieser Vorgaben derzeit (noch) vergleichsweise wenige lärmbezogene Normen im Anwendungsbereich der Grundverordnung 2018/1139. Diese könnten jedoch schrittweise durch die EASA entworfen und über die Kommission zu unmittelbar und vorrangig geltendem Recht werden.

#### 5.1.2.3.1 Vorrang der Vorgaben der Union

Die beschriebenen Vorgaben der EU-Grundverordnung machen deutlich, dass darin eine weitgehende Harmonisierung für produkt- und betriebsbezogene Vorgaben der Drohnen erfolgt. Art. 56 Abs. 8 der Grundverordnung 2018/1139 stellt zugleich klar, dass Abschnitt VII über unbemannte Luftfahrzeuge unbeschadet der für die Mitgliedstaaten bestehenden Möglichkeit gilt, nationale Vorschriften zu erlassen, um den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge aus Gründen, die

<sup>51</sup> Dies ergibt sich aus dem Verweis auf VO (EU) 748/2012, die wiederum an den Anhang 16-I anknüpft, siehe Anhang 1, Teil 21, Hauptabschnitt A, Abschnitt B, 21.A.18, lit. a), Abschnitt I, 21.A.204 lit b) ii), Hauptabschnitt B, Abschnitt H, 21.B.320 der VO (EU) 748/2012. Anhang 16-I zum Luftfahrtabkommen enthält insbesondere Grenzwerte für Strahlflugzeuge, Propellerflugzeuge und Hubschrauber. Zwar können Drohnen prinzipiell unter verschiedene dieser Kategorien fallen. In der Regel wird jedoch davon auszugehen sein, dass Drohnen die jeweiligen Grenzwerte nicht überschreiten und die nötigen Zulassungen folglich erhalten werden.

<sup>52</sup> S. Art. 6 Abs. 1 und 2 DurchführungsVO 2019/947.

<sup>53</sup> Insbesondere die Verordnung 598/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.04.2014 über Regeln und Verfahren für lärmbedingte Betriebsbeschränkungen auf Flughäfen der Union, ABl. L 173/65 vom 12.06.2014, Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, ABl. L 189/12 vom 18.07.2002, oder die Richtlinie 2000/14/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 08.05.2000, ABl. L 162/1 vom 03.07.2000 beinhalten keine Regelungen, die auf Drohnen anwendbar wären.

nicht in den Anwendungsbereich der Verordnung fallen, an bestimmte Bedingungen zu knüpfen. Sowohl konstruktions- als auch betriebsbezogene Anforderungen an Drohnen auch für den Umweltschutz sind jedoch explizit Teil der Grundverordnung 2018/1139 und der Durchführungs- bzw. Delegierten Verordnungen.<sup>54</sup> Die Grundverordnung will unter anderem auch zu einem hohen, einheitlichen Umweltschutzniveau beizutragen. Nicht zuletzt im Lichte der angestrebten Harmonisierung<sup>55</sup> wird die den Mitgliedstaaten verbleibende Regulierungsbefugnis daher restriktiv auszulegen sein – soweit die Grundverordnung und die darauf aufbauenden Verordnungen derartige Spielräume nicht ausdrücklich eröffnen.

#### 5.1.2.3.2 Geographische UAS-Gebiete

Derartige Gestaltungsspielräume der Mitgliedstaaten bestehen nach den Vorgaben der EU-Verordnungen insbesondere bei der Bestimmung der Bereiche, in denen Drohnen zum Einsatz kommen sollen. Nach Art. 15 der Durchführungsverordnung 2019/947 können die Mitgliedstaaten sog. geografische UAS-Gebiete festlegen und für diese Gebiete die Betriebsbedingungen vorgeben.

Ein UAS-Gebiet beschreibt den von der zuständigen Behörde festgelegten Teil des Luftraums, der den UAS-Betrieb ermöglicht, einschränkt oder ausschließt, um den mit dem UAS-Betrieb verbundenen Risiken für die Sicherheit, den Schutz der Privatsphäre und personenbezogener Daten, die Sicherheitslage oder die Umwelt Rechnung zu tragen.<sup>56</sup>

Mitgliedstaaten können daher nach Art. 15 der Durchführungsverordnung 2019/947 für geografische UAS-Gebiete aus Gründen der Sicherheit und Gefahrenabwehr, des Schutzes der Privatsphäre oder der Umwelt:

- ▶ einen bestimmten oder sämtlichen UAS-Betrieb untersagen, besondere Auflagen für einen bestimmten oder sämtlichen UAS-Betrieb verhängen oder UAS-Betreiber verpflichten, eine Fluggenehmigung für einen bestimmten oder sämtlichen UAS-Betrieb zu beantragen,
- ▶ für den UAS-Betrieb bestimmte Umweltauflagen festlegen,
- ▶ nur bestimmten UAS-Klassen den Zugang gewähren,
- ▶ den Zugang nur solchen UAS gewähren, die mit bestimmten technischen Merkmalen, insbesondere mit Fernidentifizierungssystemen oder Geo-Sensibilisierungssystemen ausgerüstet sind.

Die Verordnung erlaubt zur Erleichterung von UAS-Flügen auch auf der Grundlage einer Risikobewertung der zuständigen Behörde bestimmte geografische Gebiete auszuweisen, in denen der UAS-Betrieb von einer oder mehreren Anforderungen des Betriebs in der offenen Kategorie ausgenommen ist.

Den Mitgliedstaaten ist es somit zwar nicht generell produkt- und betriebs-, so doch *gebietsbezogen* gestattet, Regelungen für UAS-Flüge für ein bestimmtes von ihnen ausgewiesenes Gebiet zu erlassen und hierfür (auch umweltbezogene) Auflagen festzulegen, UAS-Flüge auszuschließen oder einzuschränken oder auf bestimmte Klassen zu beschränken.<sup>57</sup>

<sup>54</sup> Siehe den Umweltschutz betreffend auch Art. 1 Abs. 2 lit. c) VO 2018/1139, sowie den zweiten Erwägungsgrund zur Delegierten VO 2019/945.

<sup>55</sup> Art. 1 Abs. 2 lit. b VO 2018/1139.

<sup>56</sup> S. die Definition in Art. 2 Ziff. 4 der DurchführungsVO 2019/947.

<sup>57</sup> Zum Begriff „geografisches UAS-Gebiet“ siehe Art. 2 Nr. 4 DurchführungsVO 2019/947.

### 5.1.3 Der deutsche Rechtsrahmen für den Luftverkehr

Das deutsche Recht enthält derzeit (Stand 8-2021) im groben Überblick u.a. folgende Vorgaben, die bei der Entwicklung lärmbezogener Vorgaben für Drohnen im Blick behalten werden müssen:

#### 5.1.3.1 Das Luftverkehrsgesetz

Die wesentlichen luftverkehrsbezogenen Vorgaben in Deutschland finden sich im Luftverkehrsgesetz (LuftVG)<sup>58</sup>. Drohnen werden vom Gesetz seit 2012 als „unbemannte Luftfahrtsysteme“ erfasst (vgl. § 1 Abs. 2 S. 3 LuftVG sowie Holle/Breddebach 2020 und Solmecke/Nowak, 2014)

##### 5.1.3.1.1 Flugplatzzwang?

Nicht abschließend geklärt ist, ob Drohnen derzeit dem Flugplatzzwang nach § 25 LuftVG unterliegen, ob sie also *„außerhalb der für sie genehmigten Flugplätze nur starten und landen, wenn der Grundstückseigentümer oder sonst Berechtigte zugestimmt und die Luftfahrtbehörde eine Erlaubnis erteilt“* hat. Das Bundesverwaltungsgericht hat dies für Modellflugzeuge verneint, da Flugplätze im Sinne des LuftVG und der LuftVZO<sup>59</sup> vor allem solche sind, deren Flugverkehr dem Transport von Personen und Waren dient. Dies gelte für Modellflugzeuge nicht (vgl. BVerwG, Urteil vom 10.05.1985 – 4 C 36/82 –, Rn. 13, BVerwG, Urteil vom 10.05.1985 – 4 C 69/82 – Rn. 10, kritisch: Bittlinger 1986). Jedenfalls dort, wo diese Funktion erfüllt wird und bei/ab einer Vergleichbarkeit von Frequenz und Betriebsart mit dem konventionellen Flugverkehr dürften Drohnenflugplätze als spezielle Flugplätze zu qualifizieren sein (vgl. auch Bittlinger 1986, Risch 2020). Mit der Schaffung der „zulassungspflichtigen“ Kategorie hat der europäische Verordnungsgeber zudem solche Drohnen den Bestimmungen der zivilen (bemannten) Luftfahrt unterworfen, welche für die Beförderung von Menschen und gefährlichen Gütern konstruiert sind und insoweit jene Funktionen erfüllen, welche das Bundesverwaltungsgericht für den Flugverkehr der in der LuftVG und LuftVZO genannten Flugplätzen zuschreibt. Ein Flugplatzzwang liegt also zumindest für diese Drohnenkategorie nach geltendem Recht nahe, ohne dass dieses auf Drohnen und deren Spezifika insoweit besonders zugeschnitten wäre.

##### 5.1.3.1.2 Flugplatzvorgaben

Das Anlegen und der Betrieb von Flugplätzen unterliegen gemäß § 6 Abs. 1 S. 1 LuftVG einem Genehmigungsvorbehalt.<sup>60</sup> Das deutsche Recht bündelt hier bei der Zulassung des Zwangspunktes für den startenden und landenden Luftverkehr Prüfungen zum Schutze Dritter und der Natur. Vor Erteilung der Genehmigung muss u.a. sichergestellt werden, dass den Erfordernissen des Natur- und Lärmschutzes ausreichend Rechnung getragen wurde, § 6 Abs. 2 S. 1 LuftVG, was u.a. über eine Verkehrs- und eine Lärmprognose ermittelt und abgewogen wird (ausführlich siehe Reidt et al 2015 und Risch 2020. Bei Flughäfen mit sog. beschränktem Bauschutzbereich (nach § 17 LuftVG) ist zudem gemäß § 8 Abs. 1 S. 1 LuftVG ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen. Auch hiernach ist der im Einwirkungsbereich entstehende Lärm zu betrachten, wobei regelmäßig den Werten des § 2 Abs. 2 des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm besondere Bedeutung zukommt (dazu auch weiter unten).<sup>61</sup>

<sup>58</sup> Luftverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 698), das zuletzt durch Artikel 131 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist

<sup>59</sup> LuftVZO, Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 19. Juni 1964 (BGBl. I S. 370), die zuletzt durch Artikel 132 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist

<sup>60</sup> Dieser Begriff umfasst nach § 6 Abs. 1 S. 1 Flughäfen, Landeplätze und Segelfluggelände.

<sup>61</sup> Werte für neue oder wesentlich baulich erweiterte zivile Flugplätze: Tag-Schutzzone 1:  $L_{Aeq\ Tag} = 60$  dB(A), Tag-Schutzzone 2:  $L_{Aeq\ Tag} = 55$  dB(A), Nacht-Schutzzone  $L_{Aeq\ Nacht} = 50$  dB(A),  $L_{Amax} = 6$  mal 53 dB(A). Für ältere und militärische Flughäfen bestehen abweichende Vorgaben.

### 5.1.3.1.3 § 29 LuftVG

Nach § 29 Abs. 1 LuftVG sind Flugplatzunternehmer, Luftfahrzeughalter und Luftfahrzeugführer zudem generell dazu verpflichtet, beim Betrieb von Luftfahrzeugen in der Luft und am Boden vermeidbare Geräusche zu verhindern und die Ausbreitung unvermeidbarer Geräusche auf ein Mindestmaß zu beschränken, wenn dies erforderlich ist, um die Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm zu schützen. Auf die Nachtruhe der Bevölkerung ist in besonderem Maße Rücksicht zu nehmen. § 29 Abs. 2 LuftVG enthält für die Luftfahrtbehörden und die Flugsicherungsorganisation die Vorgabe, dass diese auf den Schutz der Bevölkerung vor unzumutbarem Fluglärm hinzuwirken haben.

### 5.1.3.1.4 Flugverfahren

Diese Vorgaben sind auch bei der Festlegung von Flugverfahren („Flugrouten“) nach § 33 Abs. 2 LuftVO von Bedeutung. Nach § 33 Abs. 1 LuftVO hat der Luftfahrzeugführer bei Flügen innerhalb von Kontrollzonen, bei Anflügen zu und Abflügen von Flugplätzen mit Flugverkehrskontrollstelle sowie bei Flügen nach Instrumentenflugregeln die vorgeschriebenen Flugverfahren zu befolgen. Das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) ist ermächtigt, die Flugverfahren durch Rechtsverordnung festzulegen. In der Abwägung der möglichen Flugwege spielen daher neben den öffentlichen Belangen der Flugsicherung in Form des flüssigen, geordneten und sicheren Verkehrs (§ 27c Abs. 1 LuftVG) die Lärmschutzbelange der über die Bündelung des Luftverkehrs unterhalb der Flugwege betroffenen Bevölkerung eine maßgebliche Rolle. Die Verordnungen werden daher auch im Benehmen mit dem Umweltbundesamt erlassen (§ 32 Abs. 4 Satz 1 Nr. 8, Abs. 4c Satz 2 LuftVG). Diese gilt namentlich für die An- und Abflugwege zu und von den Verkehrsflughäfen, da die Luftfahrzeuge aufgrund der geringen Flughöhen neben der hohen Verkehrsfrequenz – anders als bei der Reiseflughöhe – zu besonderen Lärmbelastungen am Boden führen. Der Abwägung der Streckenführung kommt infolge der damit einhergehenden Verteilung des Lärms für die betroffene Bevölkerung besondere Bedeutung zu.

### 5.1.3.2 Fluglärmschutzgesetz und Landeplatz-Lärmschutz-Verordnung

Neben den beschriebenen Vorgaben sieht das deutsche Recht zudem mit dem Fluglärmschutzgesetz (FluglärmG)<sup>62</sup> und der Landeplatz-Lärmschutz-Verordnung<sup>63</sup> Normen vor, die Lärmemissionen und -immissionen im Zusammenhang mit Flugplätzen regeln.

Das FluglärmG vermindert die Auswirkungen des Fluglärms durch die Festsetzung von Lärmschutzbereichen in der Umgebung von großen Flugplätzen, innerhalb derer – unter bestimmten Voraussetzungen – baulicher Schallschutz an Wohngebäuden vorgenommen wird und zudem bauliche Nutzungsbeschränkungen bestehen, um das Heranrücken von Siedlungen an Flugplätzen zu beschränken.<sup>64</sup> Die Landeplatz-LärmschutzV greift im Gegensatz hierzu auf einen aktiven Regelungsansatz zurück und sieht in bestimmten Fällen zeitliche Betriebsbeschränkungen vor, vgl. § 1 Abs. 1 LärmschutzV.

Für den Drohnenbetrieb dürften aktuell weder das FluglärmG noch die Landeplatz-LärmschutzV aufgrund ihrer beschränkten Anwendungsbereiche Wirkungen entfalten. Die Landeplatz-Lärm-

---

<sup>62</sup> Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550).

<sup>63</sup> Landeplatz-LärmschutzV vom 5. Januar 1999 (BGBl. I S. 35), die durch Artikel 5 der Verordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894) geändert worden ist.

<sup>64</sup> § 2 Abs. 2 FluglärmG. Zu den Beschränkungen, siehe §§ 5, 6 FluglärmG. Dem stehen Ausgleichs- und Entschädigungsansprüche gegen die Flugplatzbetreiber gegenüber, die in den §§ 8 ff. FluglärmG geregelt sind.

schutzV ist (nur) auf die Regulierung von Starts und Landungen von propellergetriebenen Flugzeugen und Motorseglern bis zu 9 000 kg höchstzulässiger Startmasse zugeschnitten,<sup>65</sup> diese werden in bestimmten Zeiten untersagt. Das FluglärmG knüpft wiederum als Auslöseschwelle für den (an einem Flughafen) einzurichtenden Lärmschutzbereich an die Schwelle der Lärmpegel nach § 2 Abs. 2 FluglärmG an und erforderte auch für Verkehrslandeplätze – also Landeplätze, die nicht für besondere (beschränkte) Zwecke eingerichtet werden<sup>66</sup> – sowohl einen Fluglinien- oder Pauschalflugreiseverkehr als auch ein Verkehrsaufkommen von über 25 000 Bewegungen pro Jahr.<sup>67</sup> Schon am Fluglinienverkehr (§ 21 Abs. 1 LuftVG) wird es fehlen, wenn in unregelmäßigen Abständen oder nicht über linienförmige Verbindungen Ziele im sog. Gelegenheitsverkehr (§ 22 LuftVG) angesteuert werden. Zudem müsste das Verkehrsaufkommen die beschriebene Grenze überschreiten.

### 5.1.3.3 Die Luftverkehrs-Ordnung

Die Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) konkretisiert Voraussetzungen und Vorgaben für die Teilnahme am Luftverkehr weiter. Der Betrieb von Drohnen wird seit 2017 ebenfalls in der LuftVO geregelt. Mit Gesetz vom 14. Juni 2021<sup>68</sup> erfolgte zuletzt zudem vor allem in der LuftVO und deren – 2017 eingefügten – Abschnitt 5a eine Aktualisierung und Anpassung an die unionsrechtlichen Vorgaben in der (weiter oben dargestellten) Durchführungsverordnung 2019/947.

Für nationale Regelungen, die die Durchführungsverordnung 2019/947 betreffen, wurde der Oberbegriff „unbemanntes Fluggerät“ übernommen. Hierunter fallen sowohl „Flugmodelle“ als auch „unbemannte Luftfahrtsysteme“. Flugmodelle dienen dabei allein zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung. Unbemannte Luftfahrtsysteme hingehen können für sonstige, insbesondere gewerbliche Zwecke eingesetzt werden. Sprachlich wird für die am Betrieb beteiligten Personen und die geforderten Befähigungsnachweise und Erlaubnisse zum Betrieb im Einklang mit der Durchführungsverordnung von „Fernpiloten“, „Fernpiloten-Zeugnissen“ sowie „Kompetenznachweisen“ gesprochen (siehe hierzu Bundestag 2021/29354).

Insbesondere aber wurde die bestehende Verbots-Ausnahme-Systematik überarbeitet und an die Möglichkeit, geographische UAS Gebiete auszuweisen, angepasst. §§ 21a ff. LuftVO a.F. sahen grundsätzlich eine Erlaubnispflicht für unbemannte Luftfahrtsysteme und Flugmodelle mit mehr als 5 kg Startmasse vor. Eine Vielzahl von Drohnenbetriebsarten wurden zugleich grundsätzlich verboten, darunter bspw. der BVLOS-Betrieb, konnten jedoch in begründeten Ausnahmefällen genehmigt werden. Diese Vorgaben wurden im Abschnitt 5a „Betrieb von unbemannten Fluggeräten“ im Überblick nun wie folgt gefasst:

<sup>65</sup> S. § 1 Abs. 1 und 2 und § 2 Landeplatz-LärmschutzVO.

<sup>66</sup> S. § 49 Abs. 2 Nr. 1 und 2 LuftVZO.

<sup>67</sup> § 4 Abs. 1 FluglärmG.

<sup>68</sup> BGBl. 2021, I -1766.

**a. §§ 21a - §21e LuftVO: Zuständige Behörden und benannte Stellen**

§§ 21a - d LuftVO regeln die Zuständigkeit der Behörden (insb. Luftfahrtbundesamt bzw. Luftfahrtbehörden der Länder) für die Prüfung, Bescheinigung und Überwachung des Betriebes und die Erteilung von Genehmigungen, entsprechend den Anforderungen der verschiedenen Betriebskategorien offen, speziell und zulassungspflichtig.

§ 21c Abs. 2 LuftVO sieht zugleich für den Betrieb in der Betriebskategorie „zulassungspflichtig“ die Geltung der Verkehrsvorschriften für bemannte, motorgetriebene Luftfahrzeuge entsprechend vor, soweit sie Einfluss auf die Belange des Umwelt-, Lärm<sup>69</sup>- oder Naturschutzes haben können.

**b. § 21h LuftVO: Geografische UAS-Gebiete**

Von besonderer Bedeutung ist der neu eingeführte § 21h Abs. 1 LuftVO. Demnach ist – insoweit im Einklang mit § 1 LuftVG – die Benutzung des Luftraums durch unbemannte Fluggeräte frei – soweit diese Nutzung nicht durch das Luftverkehrsgesetz, durch die zu seiner Durchführung erlassenen Rechtsvorschriften (also insbesondere die LuftVO), durch im Inland anwendbares internationales Recht, durch Rechtsakte der Europäischen Union und die zu deren Durchführung erlassene Rechtsvorschriften eingeschränkt wird.

Diese grundsätzlich freie Benutzung des Luftraums beschneidet § 21h Abs. 2 LuftVO dahingehend, dass der Betrieb in den Kategorien „offen“ und „speziell“ in bestimmten geografischen Gebieten unter einschränkenden Bedingungen erfolgt. Die vor der Novellierung geltende „Verbots-Ausnahme-Systematik“ – wonach grundsätzlich ein Verbot gilt, von dem über eine Erlaubnis abgewichen werden kann – wird so zur Förderung eines drohnenfreundlichen Klimas in eine „Erlaubnis-Einschränkungs-Systematik“ umgekehrt.

Wenngleich Abs. 3 einleitend zu den Ziffern 1. bis 11 sodann – sprachlich ins Positive gewendetformuliert, dass der Betrieb in den nachstehenden geographischen Gebieten unter den Voraussetzungen *zulässig* ist, so schwingt davon gedanklich einschränkend das Wort „*nur*“ mit. Denn der nach Abs. 1 grundsätzlich freie Betrieb wird hier nur unter Bedingungen gestattet. In den nachfolgenden Fällen finden sich daher auch die bisher von der Verbotsnorm des § 21b LuftVO a.F. benannte besondere Bereiche, in denen ein Betrieb gefahrgeneigter erscheint oder sensible Bereiche betrifft, darunter u.a. der Betrieb in der Nähe von Flugplätzen und Flughäfen, Industrieanlagen, Justizvollzugsanstalten, Grundstücken der Verfassungsorgane oder oberen Bundes- und Landesbehörden oder über und innerhalb eines seitlichen Abstandes von 100 Metern von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen, Freibädern, Badestränden, Krankenhäusern ebenso wie Unfall- und Einsatzorten etc.<sup>70</sup> Hier sind vielfach Zustimmungen vorab einzuholen bzw. wird im Rahmen der Betriebsgenehmigung in der Kategorie „speziell“ eine Bewertung des Einsatzes durchzuführen sein. In Kontrollzonen muss eine Flugverkehrskontrollfreigabe (nach § 21 LuftVO) eingeholt werden.

Während bei den vorstehenden Beispielen die Lärmauswirkungen (mit Ausnahme der Krankenhäuser) weniger im Mittelpunkt stehen werden als Sicherheitserwägungen, werden Lärmbe-lange u.a. bei Flügen mit Bezug zu den durch das Bundesnaturschutzgesetz (BNatschG)<sup>71</sup> besonders geschützten Gebieten (§ 21h Abs. 3 Nr. 6 LuftVO) und über Wohngrundstücken (§ 21h Abs.

<sup>69</sup> Hier dürften insbesondere die Lärmschutzwerte, welche für Luftfahrzeuge nach dem Anhang 16-I zum Internationalen Abkommen über die zivile Luftfahrt gelten, relevant sein.

<sup>70</sup> S. § 21h Abs. 3 Nr. 1 – 5 LuftVO.

<sup>71</sup> BNSchG, Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist

3 Nr. 7 LuftVO) besonders relevant werden. So bedarf es einer Zustimmung der Naturschutzbehörde nicht, wenn der Fernpilot neben weiteren Vorgaben (darunter eine Mindesthöhe von 100 Metern und das Erfordernis des nicht freizeit-/sportbedingten Überflugs für den Betrieb) den Schutzzweck des betroffenen Schutzgebietes kennt und diesen in angemessener Weise berücksichtigt.<sup>72</sup> Für den Betrieb *über Wohngrundstücken* (nicht schon in Wohngebieten) sieht die LuftVO nunmehr zudem ausdrücklich vor, dass u.a. nicht zu erwarten sein darf, dass durch den Betrieb die Immissionsrichtwerte nach Nummer 6.1 der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)<sup>73</sup> überschritten werden.<sup>74</sup>

Eine genauere Konkretisierung findet sich nicht. So bleibt insbesondere unklar, wie mit Geräuscheinwirkungen durch mehreren Drohnenflüge während eines Tages sowie mit der Vorbelastung durch andere Geräuschquellen, die unter den Geltungsbereich der TA Lärm fallen, umzugehen ist. Geht man vom Bewertungsgrundsatz der TA Lärm aus, demzufolge die Immissionsrichtwerte für die Summe aller Geräuschimmissionen gelten, die unter den Geltungsbereich der TA Lärm fallen, so wären zumindest die Geräusche aller Drohnenflüge, die auf einen Immissionsort einwirken, zusammen zu bewerten. So lange alle Drohnenflüge durch den gleichen Betreiber erfolgen, wäre dies eventuell noch leistbar. Finden jedoch Drohnenflüge verschiedener Betreiber statt, so wäre eine auch lärmtechnische Koordination notwendig.

Die vorstehend genannten naturschutz- und wohngebietsbezogenen Vorgaben sollen daher u.a. „insbesondere mit Blick auf den Lärmschutz“ über einen Zeitraum von zwei Jahren evaluiert werden (§ 21h Abs. 5).

Die Luftfahrtbehörde des Landes kann in begründeten Fällen den Betrieb in diesen Gebieten auch in anderen Fällen zulassen. Dies setzt neben einer Sicherheitsbewertung ebenfalls voraus, dass der Schutz vor Fluglärm angemessen berücksichtigt wird.<sup>75</sup> Die zuständige Luftfahrtbehörde des Landes kann daher auch vor Erteilung der Ausnahmegenehmigung eine fachspezifische Bewertung oder ein Gutachten, insbesondere zum Natur- und Lärmschutz einfordern.<sup>76</sup>

Die Norm sieht schließlich in Abs. 4 vor, dass das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) oder eine von ihm bestimmte Bundesbehörde neben den genannten Bereichen daher „*weitere geografische Gebiete nach Artikel 15 Absatz 1 und 2 der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 festlegen und Einzelheiten zum Betrieb der unbemannten Fluggeräte bestimmen*“ kann.

Nach dem über die angepasste LuftVO geltenden Bundesrecht gilt damit grundsätzlich eine freie Luftraumnutzung, die derzeit nur für die vorgenannten besonders sensiblen Bereiche eingeschränkt und unter Voraussetzungen ermöglicht wird. Zugleich besteht mit der Delegation an das BMVI oder einer von ihm bestimmten Bundesbehörde die Option, weitere Gebiete vorzugeben, in denen eine Drohnennutzung an Betriebsbedingungen geknüpft ist.

---

<sup>72</sup> § 21h Abs. 3 Nr. 6 c) LuftVO.

<sup>73</sup> Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503). Sie beruht auf der Ermächtigungsgrundlage in § 48 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BImSchG.

<sup>74</sup> § 21h Abs. 3 Nr. 7 dd) LuftVO.

<sup>75</sup> § 21i Abs. 1 Nr. 2 LuftVO.

<sup>76</sup> § 21i Abs. 2 Nr. 3 LuftVO.

#### 5.1.3.4 Der Regelungsrahmen für sonstigen Lärm

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) dient dem Zweck, schädliche Umwelteinwirkungen zu verhindern, § 1 Abs. 1 BImSchG.<sup>77</sup> Die bereits erwähnte Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) sieht für die nach der Baunutzungsverordnung (BauNVO) vorgegebenen Gebietstypen verschiedene Immissionsrichtwerte vor (s. Ziffer 6.1 TA Lärm). Diese sind zu prüfen, wenn eine Anlage, welche nicht nach Ziffer 1. vom Anwendungsbereich ausgenommen ist, Gegenstand eines Erlaubnis- oder Genehmigungs- oder dort genannten behördlichen Überprüfungsverfahrens ist oder eine Entscheidung oder Untersagung im Einzelfall im Raume steht. (siehe Ziffer 1, Abs. 2 TA Lärm<sup>78</sup> hierzu auch Jarrass, 2020)

#### 5.1.3.5 Fahrzeuge zur Teilnahme am Verkehr im Einzelfall sind keine Anlagen

Fahrzeuge, inklusive Luftfahrzeuge,<sup>79</sup> gelten gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG indes grundsätzlich *nicht* als Anlagen und unterfallen folglich auch nicht der TA Lärm. Maßgebliches Unterscheidungskriterium ist jedoch die Teilnahme des jeweiligen Fahrzeugs am Verkehr im konkreten Einzelfall, etwa zu Transportzwecken (vgl. Landmann/Rohmer, 2017). Im Übrigen ist der Anwendungsbereich der §§ 38 ff. BImSchG eröffnet (vgl. Jarass, 2020). Auch Luftfahrzeuge müssen demnach so beschaffen sein, dass ihre durch die Teilnahme am Verkehr verursachten Emissionen bei bestimmungsgemäßem Betrieb die zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen einzuhaltenden Grenzwerte nicht überschreiten. Sie müssen so betrieben werden, dass vermeidbare Emissionen verhindert und unvermeidbare Emissionen auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben. Die praktische Bedeutung dieser Vorschrift, die vielfach durch spezielle (verkehrsrechtliche) Vorgaben – insb. auch auf EU-Ebene – überlagert oder ergänzt wird, wird vor diesem Hintergrund als gering beschrieben (vgl. Jarass 2020, § 38 Rn. 1). §§ 38 Abs. 2, 39 BImSchG enthalten zudem Verordnungsermächtigungen, um (u.a.) Anforderungen an die Beschaffenheit oder den Betrieb von Fahrzeugen aufzustellen, zum Beispiel in Form von Emissionshöchstwerten. Auf § 38 Abs. 2 sowie § 39 S. 1 (und verkehrsrechtliche Ermächtigungen) wurde bspw. die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)<sup>80</sup> gestützt, die Regelungen zur Geräusentwicklung der (Straßen-) Fahrzeuge in § 49 StVZO vorsieht. Darin wird auf die Einhaltung des nach dem Stand der Technik unvermeidbaren Maß der Geräusentwicklung und einschlägige EU-Richtlinien verwiesen (vgl. z. B. Jarass 2020, § 38 Rn. 31).

#### 5.1.3.6 Fahrzeuge als Arbeitsmittel

Die Vorgaben für *Anlagen* sind nach dem Vorgesagten nur dann auf Fahrzeuge anwendbar, soweit diese *nicht* im Verkehr sondern als Arbeitsmittel eingesetzt werden (vgl. Landmann/Rohmer 2017). Soweit Fahrzeuge den Anforderungen an Anlagen unterworfen sind, unterliegen sie in der Regel den §§ 22 ff. BImSchG als genehmigungsfreie Anlagen (vgl. Jarass, 2020, § 38 Rn. 6). Sie sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen soweit als möglich vermieden werden.<sup>81</sup> Die auf § 37 BImSchG gestützte 32. BImSchV sieht zu diesem Zweck

<sup>77</sup> Schädliche Umwelteinwirkungen sind „Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen“, § 3 Abs. 1 BImSchG.

<sup>78</sup> Die TA Lärm richtet sich als Verwaltungsvorschrift grundsätzlich an die Verwaltung. Allerdings kommt ihr darüber hinaus eine gewisse Außenwirkung zu, sodass die in ihr enthaltenen Grenzwerte grundsätzlich einzuhalten sind

<sup>79</sup> Diesbezüglich ist auf den Luftfahrzeugbegriff des § 1 Abs. 2 LuftVG zurückzugreifen. Damit sind auch Drohnen umfasst.

<sup>80</sup> Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist

<sup>81</sup> Siehe auch Ziffer 4.1 TA Lärm.

unter anderem zeitliche Betriebsbeschränkungen für bestimmte Geräte vor;<sup>82</sup> für Drohnen gilt dies derzeit nicht.

#### 5.1.3.7 Fahrzeuge, die dem Betrieb einer Anlage zuzurechnen sind

Weiterhin kann Fahrzeuginlärm insoweit den Regeln für Anlagen unterworfen sein, als das Fahrzeug dem Betrieb einer Anlage zuzurechnen ist (vgl. Landmann/ Rohmer 2017, § 2 Rn. 22). Denkbar ist dies grundsätzlich auch für den Einsatz von Drohnen auf Industrieanlagen.

#### 5.1.3.8 Keine Anwendung auf Flugplätze

Flugplätze sind demgegenüber, wie dargelegt, einem eigenen Regelungsrahmen unterworfen und vom BImSchG ausgenommen, § 2 Abs. 2 S. 1 BImSchG<sup>83</sup> (siehe hierzu etwa Schulte und Michalk, 2019, § 2 Rn. 16 f). Anwendbar sind lediglich die §§ 47a ff. BImSchG, sodass auch Flugplätze in die Erstellung der Lärmkarten und Lärmaktionspläne nach den §§ 47c, 47d BImSchG einzubeziehen sind (Siehe etwa Schulte und Michalk, 2019, § 2 Rn. 16).

### 5.1.4 Gebietsbezogene Naturschutz-Vorgaben

Allgemeine Naturschutzregeln zum Schutz der Tierwelt und ihrer Lebensräume sind für den Drohnenbetrieb durchaus relevant. Auf der Ebene des Unionsrechts gilt dies insbesondere für die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-RL)<sup>84</sup> und der Vogelschutzrichtlinie<sup>85</sup>. In Umsetzung dieser Vorgaben gilt in Deutschland ein Genehmigungsvorbehalt für die Durchführung von „Projekten“ nach § 34 BNatSchG.<sup>86</sup> Projekte sind vor ihrer Zulassung oder Durchführung auf ihre Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen eines Natura 2000-Gebiets zu überprüfen, wenn sie einzeln oder im Zusammenwirken mit anderen Projekten oder Plänen geeignet sind, das Gebiet erheblich zu beeinträchtigen, § 34 Abs. 1 S. 1 BNatSchG.<sup>87</sup> Sowohl der Projekt-Begriff, als auch der Maßstab der Erheblichkeit einer Beeinträchtigung werden in der Praxis weit ausgelegt (vgl. Landmann/Rohmer 2020). Vor allem lärmbedingte Einwirkungen können im Einzelfall, ungeachtet ihrer Quelle, die geschützte Fauna stören (vgl. OVG Lüneburg 2020, für Tiefflüge siehe z. B. BVerwG 2013 4 C 3.12). Gerade bei Lärmemissionen muss darauf geachtet und ggfls. mittels einer (Vor-) Prüfung untersucht werden, ob diese sich soweit verdichten, dass die Erhaltungsziele eines betroffenen Natura 2000-Gebietes beeinträchtigt werden können.

### 5.1.5 Auswirkungen auf den Betrieb von Drohnen mit Blick auf spezifische Anwendungen

Nach geltendem Recht ist für die in der Studie angesprochenen Anwendungsfälle folgendes zu beachten:

<sup>82</sup> Siehe §§ 3 und 7 32. BImSchV. Dies dient auch der Umsetzung der Richtlinie 2000/14.

<sup>83</sup> Es gilt insofern der Begriff des § 6 Abs. 1 LuftVG, in Verbindung mit den §§ 38 und 49 LuftVZO, Diese Beschränkung gilt jedenfalls bezüglich des Fluglärms. Ob auch andere Emissionen von der Bereichsausnahme erfasst sind, ist umstritten.

<sup>84</sup> FFH-RL, Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21.05.1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen, ABl. L 206 vom 22.07.1992, S. 7.

<sup>85</sup> Vogelschutzrichtlinie, Richtlinie 2009/147/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.11.2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (kodifizierte Fassung), ABl. L 20 vom 26.01.2010, S. 7.

<sup>86</sup> Diese Norm dient der Umsetzung von Art. 6 Abs. 3 und 4 der FFH-RL.

<sup>87</sup> Die Prüfung erfolgt dabei in der Regel im Rahmen anderer Verwaltungsverfahren.

### 5.1.5.1 Anwendungsfall 1: Inspektion von technischen Anlagen und landwirtschaftlichen Flächen

Der erste Anwendungsfall betrifft Drohnenflüge zu Inspektionszwecken über linienförmigen oder flächenhaften Anlagen, sowie landwirtschaftlichen Flächen.<sup>88</sup> Hierfür sollen demnach vor allem Drohnen mit einer MTOM bis 9 - 12 kg und einer maximalen Länge bzw. Breite von 245 cm eingesetzt werden. Der Betrieb dürfte in der Regel zwar periodisch, aber eher vereinzelt und ohne feste Start- oder Landeplätze stattfinden.

Nach dem Unionsrecht werden Drohnen dieses Anwendungsbereichs ihrer Konstruktion nach somit in die offene Kategorie fallen, da sie weder eine größere MTOM als 25 kg aufweisen, noch in ihren charakteristischen Abmessungen mehr als 3 m aufweisen (vgl. EU 2019/945). Aus den Charakteristika folgt zudem, dass die aktuell verwendeten Drohnen der Klasse C3 angehören dürften.<sup>89</sup> Dies bedeutet, dass die für die Klassen C1 und C2 geltenden Lärmgrenzwerte hierbei nicht einzuhalten sind.

Ist ein BVLOS-Betrieb angestrebt, so werden die Grenzen der offenen Kategorie verlassen. Der Betrieb in der Kategorie „speziell“ erfordert grundsätzlich eine Betriebsgenehmigung nach Art. 5 Abs. 1 i.V.m. Art. 12 der Durchführungsverordnung 2019/947. Diese wird von der Luftfahrtbehörde des je nach Unternehmenssitz zuständigen Bundeslandes gem. § 21b Abs. 2 LuftVO bei Erfüllung der Voraussetzungen nach Art. 12 der Durchführungsverordnung 2019/947 erteilt.<sup>90</sup> Der UAS-Betreiber hat dabei u.a. eine Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass der beabsichtigte Betrieb den einschlägigen Vorschriften, insbesondere auch in Bezug auf den Umweltschutz genügt (Art. 12 Abs. 2 c der Delegierten VO 2019/947). Er muss zudem eine Risikobewertung vorlegen sowie eine Liste vorgeschlagener Risikominderungsmaßnahmen aus denen die Angemessenheit der Maßnahmen zur Minderung der Risiken bewertet werden kann. Darunter fallen beispielsweise auch Leitlinien für die Planung des UAS-Betriebs, damit Belästigungen, auch durch Lärm so gering wie möglich gehalten werden. Er hat außerdem dafür Sorge zu tragen, dass ein unbemanntes Luftfahrzeug eingesetzt wird, das so konstruiert ist, dass Lärm und sonstige Emissionen unter Berücksichtigung des beabsichtigten Betriebs und der geografischen Gebiete, in denen Lärm und die sonstigen Emissionen von Luftfahrzeugen ein Problem darstellen können, minimiert werden.<sup>91</sup>

Die Einschränkungen für einen Betrieb in geografischen Gebieten nach § 21h Abs. 2 und Abs. 3 LuftVO sind zu beachten. Ein Betrieb über und innerhalb eines seitlichen Abstands von 100 Metern von der Begrenzung von Industrieanlagen ist demnach grundsätzlich nur mit Zustimmung des Betreibers möglich. Auch der Einsatz über Naturschutzgebieten unterliegt grundsätzlich der Zustimmung der zuständigen Naturschutzbehörde. Erhebliche Beeinträchtigungen der Erhaltungsziele von Natura 2000-Gebieten sind zu vermeiden und wären insbesondere bei Flügen von einer gewissen Regelmäßigkeit vorab über eine Vorprüfung auszuschließen.

### 5.1.5.2 Anwendungsfall 2: Flüge zur Erlangung von Geoinformationen (z. B. Baufortschritt auf Baustellen oder Erstellung von Thermobildern)

Im Rahmen des zweiten Anwendungsfalles werden aktuell kleinere Drohnen eingesetzt (< 4 kg), um Bilddaten zu bestimmten Flächen zu sammeln. Diese Drohnen unterfallen somit nach dem

<sup>88</sup> Als linienförmige Anlagen können etwa oberirdische Stromleitungen verstanden werden. Flächenhafte Anlagen sind zum Beispiel Werksgelände oder Industrieanlagen.

<sup>89</sup> Siehe Teil 4 des Anhangs zur EU 2019/945.

<sup>90</sup> Weitere Einzelheiten ergeben sich aus Teil B des Anhangs der Delegierten VO 2019/947, s. insb. UAS.SPEC.030 ff.

<sup>91</sup> Siehe Teil B des Anhangs zur Delegierten VO 2019/947, UAS SPEC 50 Abs. 1 i) unter ii).

Unionsrecht der Klasse C2, sodass der oben dargelegte höchstzulässige Schalleistungspegel zu beachten ist.<sup>92</sup>

Eine Erlaubnispflicht besteht für diese Drohnen mit Blick auf ihr niedriges Gewicht als Teil der offenen Kategorie nach dem Unionsrecht und auch nach der novellierten LuftVO grundsätzlich nicht.

Abweichungen können sich ergeben, wenn mit dem Einsatz besondere Gefahren einhergehen werden, etwa Menschenansammlungen überflogen werden können oder ein BVLOS-Betrieb angestrebt wäre, womit eine genehmigungsbedürftige Klassifizierung im „speziellen“ Betrieb verbunden wäre (s. für die Anforderungen dann Anwendungsfall 1). Die Einschränkungen nach § 21h LuftVO in Bezug auf die (bisher) definierten geografischen Gebiete sind zu beachten.

### 5.1.5.3 Anwendungsfall 3: Lieferung von kleineren Paketen bis zu 5 kg

Dieser Anwendungsfall geht von einem Paketlieferdienst im Verhältnis „Business to Consumer“ (B2C) aus.<sup>93</sup> Das bedeutet, dass kleinere Pakete mittels Drohnen an Verbraucher ausgeliefert werden sollen. Dabei dürfte in der Regel der Startpunkt ein Lager beziehungsweise Versandzentrum sein, während der Landepunkt einer Transportdrohne sich in einem bewohnten Gebiet befindet.

Die derzeit zur Lieferung kleinerer Waren eingesetzten Drohnen (MTOM bis ca. 18 kg) unterfallen damit in der Regel der C3-Klasse. Allerdings ist zu beachten, dass der Abwurf von Material in der offenen Kategorie nicht gestattet ist.<sup>94</sup> Ein VLOS-Betrieb erscheint kaum realisierbar. Die Drohnenflüge werden daher regelmäßig jedenfalls der speziellen Kategorien unterfallen und damit nach Unionsrecht wie im Anwendungsfall 1 der Betriebsgenehmigung bedürfen (s. insoweit für die übertragbaren Einzelheiten den Anwendungsfall 1).

Sofern Pakete „gefährliche Güter“ enthalten, fällt der Betrieb (sogar) in die zulassungspflichtige Kategorie,<sup>95</sup> die auch bei Annahme eines hohen Betriebsrisikos etwa im Falle des Überfluges von Gewerbe- und Wohngebieten und von Straßen und damit Menschen im Ergebnis einer Abwägung eröffnet sein könnte. Dann wären die Vorgaben der zivilen Luftfahrt, insbesondere auch an die Konstruktion der Drohnen (Musterzulassung, Zulassungen der Entwicklungs- und Herstellungsbetriebe etc.) zu erfüllen, die in weiten Teilen noch der Fortschreibung und Anpassung bedürfen.

Im Übrigen gilt bei unterstellter Anwendbarkeit der speziellen Kategorie, dass auch in diesem Fall eine Betriebsgenehmigung beantragt werden müsste, die wie beim Anwendungsfall 1 insbesondere eine Risikobewertung mit angemessener Risikominderung und die dargelegten Angaben zur Lärminderung umfasst.

Gerade bei dem Einsatz von Transportdrohnen können die Vorgaben zu geografischen Gebieten nach § 21h Abs. 3-7 LuftVO zu Einschränkungen führen. So sind u.a. die besonderen Gefahren des Überflugs von Bundesfernstraßen bei der Erteilung der Betriebsgenehmigung und der damit verbundenen Risikobewertung nach Art. 11 der Durchführungsverordnung 2019/947 zu beachten.<sup>96</sup> Beim Abliefern von Paketen könnten auch Wohngrundstücke überflogen werden. Dies

---

<sup>92</sup> Teil 3, Ziffer 10 zum Anhang der Delegierten VO 2019/945. Hierzu oben S. 2.

<sup>93</sup> Dies folgt insbesondere aus der aktuell nur kleinen transportierbaren Paketgröße. In der Zukunft könnte – je nach Leistungsstärke einer Drohne – auch ein Waren- oder Rohstofftransport zwischen verschiedenen Firmen möglich sein.

<sup>94</sup> Art. 4 Abs. 1 lit. f) DurchführungsVO 2019/947.

<sup>95</sup> Diese werden in Art. 2 Nr. 11 DurchführungsVO 2019/947 als Stoffe definiert, die bei einem Zwischenfall oder Unfall eine Gefahr für die Gesundheit, die Sicherheit, Sachen oder die Umwelt darstellen. Beispielfhaft werden explosive oder ätzende Stoffe genannt.

<sup>96</sup> § 21h Abs. 3 Nr. 5 lit. a) LuftVO.

wäre gem. § 21h Abs. 3 Nr. 7 lit. c) LuftVO u.a. nur dann zulässig, wenn nicht zu erwarten ist, dass durch den Betrieb die (dort einschlägigen) Immissionsrichtwerte nach Nummer 6.1 der TA Lärm überschritten werden. Würden die Transportdrohnen sich demgegenüber ausschließlich über Landesstraßen bewegen, so wird diese Vorgabe der TA Lärm dem Wortlaut nach auch in Wohngebieten nicht unmittelbar zur Anwendung kommen.

Geht man von einem Überflug von Wohngrundstücken aus, stellen sich zahlreiche weitere bisher offene Fragen. So dürfte es bei den Richtwerten der TA Lärm auf den kumulierten Lärmpegel ankommen, da die in Ziffer 6.1 aufgeführten Werte Immissionsrichtwerte sind, also solche, welche bei der Messung an einem bestimmten Ort auf diesen einwirkende (Lärm-) Beeinträchtigungen darstellen. Die Einwirkung anderer Lärmquellen – darunter auch weiterer Drohnen – könnte demnach prognostisch ebenso mit zu berücksichtigen sein wie die Vorbelastung des Gebietes. Dies erscheint jedoch, falls es intendiert sein sollte, bei einem Flugbetrieb (anders als bei einer Anlagenplanung) nur bedingt praktikabel.

Weitere Vorgaben aus dem BImSchG dürften sich in diesem Anwendungsfall nicht ergeben. Transportdrohnen stellen Fahrzeuge im Sinne des BImSchG dar, sodass die Grenzwerte der TA Lärm für sie prinzipiell keine Anwendung finden. Über den Warentransport erfüllen diese Drohnen eine klassische Verkehrsfunktion. Drohnenbezogene Vorgaben sehen die zu den §§ 38 Abs. 2, 39 BImSchG erlassenen Verordnungen, bisher ebenfalls nicht vor.

Soweit für Transportdrohnen ein fester Start- und Landepunkt vorgesehen ist (etwa das Lager eines Versandhändlers), könnte der dort entstehende Fluglärm grundsätzlich als Anlagenlärm qualifiziert werden. Flugplätze fallen jedoch gerade nicht unter das Regime des BImSchG.<sup>97</sup>

Soweit ein umfangreicher Transportbetrieb am (Groß-) Lager dazu führen sollte, dass von einem Flugplatz auszugehen ist, so wäre der Lärmschutz in einem Genehmigungsverfahren nach § 6 Abs. 2 S. 1 LuftVG zu berücksichtigen.

#### **5.1.5.4 Anwendungsfall 4: Lichtshows**

Bei diesem Anwendungsfall dienen die Drohnen Unterhaltungszwecken, ähnlich einem Feuerwerk. Die hierfür eingesetzten Drohnen sind vergleichsweise klein, da sie in einer größeren Anzahl als Schwarm eingesetzt werden. Sie dürften folglich zwar grundsätzlich die technischen Anforderungen erfüllen, um in der offenen Kategorie und damit genehmigungsfrei betrieben zu werden.

Gleichwohl ist zu bedenken, dass mit Blick auf den Unterhaltungszweck nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Lichtshows über Menschenansammlungen abgehalten werden, was sie (jedenfalls) der speziellen Kategorie zuweist. Zudem steigert die Vielzahl an gleichzeitig eingesetzten Drohnen das Potential für Unfälle und Kollisionen, sodass auch insoweit ggf. ein erhöhtes Betriebsrisiko anzunehmen sein wird, was den Einsatz ebenfalls jedenfalls der „speziellen“ Kategorie zuweisen oder gar „zulassungspflichtig“ machen kann.

Innerhalb von Ortschaften sind zudem die anlagenbezogenen Richtwerte der TA Lärm zu beachten, da Drohnen für eine Lichtshow keinem Verkehrszweck dienen und somit nicht als Fahrzeuge qualifiziert werden können.

Die von ihnen ausgehenden Beeinträchtigungen (Lärm, auch in Verbindung mit dem Licht) sind ggfls. im Rahmen des § 34 Abs. 1 BNatSchG zu prüfen (Natura 2000-Gebiete). Auch bei dem Betrieb zum Zwecke von Lichtshows sind die Einschränkungen für geografische UAS-Gebiete zu berücksichtigen.

---

<sup>97</sup> § 2 Abs. 2 S. 1 BImSchG. Siehe hierzu oben, S. 8 f.

## 5.2 Vorschläge für eine Weiterentwicklung des Rechtsrahmens

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass für den Drohnenbetrieb bisher recht wenige spezifische Lärmvorgaben existieren. Auf eine signifikante Lärmzunahme am Boden infolge eines starken Verkehrsaufkommens bei gerade im Vergleich zum konventionellen Luftverkehr vergleichsweise geringer Flughöhe erscheinen die wenigen bestehenden Vorgaben nicht ausgerichtet. Dies verwundert insoweit nicht, als die Entwicklung des Rechtsrahmens derzeit schrittweise mit der Drohnenentwicklung voranschreitet und erkennbar noch nicht abgeschlossen ist. Hierbei wird auch die Frage beantwortet werden müssen, wie mit Lärmauswirkungen von Drohnen am Boden umgegangen werden soll.

### 5.2.1 EU-Vorgaben

Hinsichtlich der Kompetenzverteilung steht zunächst fest, dass die Europäische Union für produktbezogene Vorgaben zuständig ist und bleibt, sodass Konstruktionsvorgaben nur unionsweit einheitlich eingeführt werden können. Nur dies erscheint auch sinnvoll. Konstruktionsbedingte Lärmvorgaben existieren derzeit für die Extrembereiche der leichten und kleinen Drohnen der offenen Kategorie und über die (weiter anpassungsbedürftigen) Vorgaben der zulassungspflichtigen Kategorie für große Drohnen und gefahrgeneigte Drohneneinsätze. Für Letztere wird ein differenzierteres Grenzwertsystem etabliert werden müssen, welches einerseits – wie auch der Anhang 16, Band I zum Chicagoer Abkommen – an der Masse der Drohnen anknüpfen mag, andererseits aber auch den konkreten Betriebsmodus berücksichtigen kann. Die EASA ist bereits im Begriff, diesbezüglich den Eigenheiten von Drohnen besser gerecht zu werden (siehe Certified Category-Civil Drones 2021).

Auch in Bezug auf den Betrieb ist es die EU, welche die hierbei einzuhaltenden Parameter insbesondere zum zulassungsfreien und zulassungspflichtigen Betrieb vorgibt und mit der Regulierung von Vorgaben, darunter auch Standardszenarien zur Erleichterung der Genehmigungen, begonnen hat. Es ist absehbar, dass über weitere Standardszenarien die Zulassungsverfahren schlanker gefasst und weitere Nutzungen erleichtert werden.

### 5.2.2 Mitgliedstaaten

Den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union verbleibt daneben vor allem die Möglichkeit, in den nach dem EU-Recht erforderlichen Zulassungsverfahren auf die Einhaltung der nationalen und etwaigen unionsrechtlichen Vorgaben des Natur- und Lärmschutzes zu achten, diese abzusichern und zudem über gebietsbezogene Vorgaben die Einsatzorte und den Einsatzumfang der Drohnen zu steuern, wovon der deutsche Gesetzgeber mit der Novellierung der LuftVO bei grundsätzlicher Freigabe des Luftraums ersten, vorsichtigen Gebrauch gemacht hat

Vor allem für die städtischen Räume stellt sich die Frage, ob und inwieweit hier über gebietsbezogene Vorgaben sinnvoll reguliert werden kann und soll oder ob es bei dem punktuellen Schutz besonders vulnerabler Einrichtungen verbleiben wird, flankiert durch konstruktionsbezogene Vorgaben, die an die Drohnen und Betriebsgenehmigung zur Minderung der betrieblichen Einsatzrisiken anknüpfen.

#### 5.2.2.1 Infrastruktur

Hinsichtlich der zu nutzenden Infrastruktur (Start-Landeplätze) mögen regulatorische Parallelen zum Flugplatz naheliegen. Dabei kann jedoch nicht übersehen werden, dass ein großer Vorteil bei der Nutzung von Drohnen der flexiblere Einsatz sein dürfte. Gerade weil diese regelmäßig ohne Verbrennungsmotor senkrecht starten und landen können, ist der Raumbedarf ein anderer und es könnte insoweit auch eine abweichende Regulierung erwogen werden.

Dort, wo jedoch eine zentrale Infrastruktur in größerem Umfang für An- und Abflüge von Drohnen genutzt werden soll, liegt es nahe, über die Zulassung der Infrastruktur wie bisher auch im LuftVG weiterhin über die Zulassungsverfahren (§§ 6, 8, 10 LuftVG) die Lärmauswirkungen in der Region, die über diese Infrastruktur als Quelle hervorgerufen werden, zu betrachten.

Dort, wo wiederum (nur) eine kleinere Infrastruktur etwa als Start- und Landepunkt errichtet wird, die Frequenz der An- und Abflüge und die damit einhergehende Lärmbelastung daher auch deutlich geringer ist als bei Flugplätzen, könnte ein schlankeres Zulassungsverfahren greifen.

#### **5.2.2.2 Betrieb**

Für den Betrieb und dessen Regulierung in den dargelegten Kategorien (offen, spezifisch und zulassungspflichtig) ist grundsätzlich die Europäischen Union zuständig, die wie aufgezeigt worden ist, bereits einige, wenige produktbezogene Lärmschutzvorgaben in der Kategorie „offen“ für Schalleistungshöchstwerte gemacht hat. Weitere Vorgaben könnten folgen.

Die EU-Regulierung sieht wie beschrieben zugleich eine Öffnung für die Mitgliedstaaten vor, denen neben der Erlaubnis, gebietsbezogene Vorgaben für die Nutzung der Drohnen zu machen, gestattet wurde, den Einsatz in ihrem Territorium für bestimmte Areale zu regulieren. Dabei ist es den Mitgliedstaaten gestattet, den Betrieb zuzulassen, einzuschränken oder auszuschließen, sodass die gesamte Bandbreite an Vorgaben denkbar und möglich erscheint. Zugleich wird in Abgrenzung zur EU-Kompetenz und dem Gegenstand der Verordnungen und der damit bezweckten Harmonisierung ein konkreter Gebietsbezug der Vorgaben gewahrt bleiben müssen, um nicht letztlich betriebsbezogene, generelle Vorgaben in einem Mitgliedstaat einzuführen, was der angestrebten Zulassung und Harmonisierung entgegenwirkte.

#### **5.2.2.3 Fallbezogene Erlaubnisse**

Dort wo Genehmigungen im Einzelfall auf Antrag erteilt werden müssen wird in dem beschriebenen Rahmen auch der erforderliche Lärmschutz Berücksichtigung finden, wie etwa § 21i Abs. 1 Nr. 2 LuftVO hervorhebt.

In der Abwägung der Zulassung kann darauf hingewirkt werden, dass Lärmbelastungen soweit wie möglich minimiert werden. Überall dort, wo auf den Schutz vor Lärmbelastungen verwiesen wird, könnten ergänzende Richtwerte bezüglich der am Boden je nach Gebiet und zu erwartenden Betroffenen oder Einrichtungen bei der Einschätzung der zu tolerierenden Lärmbelastung den Behörden und Antragstellern eine Hilfestellung dabei geben, wie mit den derzeit noch sehr abstrakten Vorgaben umzugehen ist. Dabei wird u.a. auch berücksichtigt werden müssen, welche Lärmbelastung Drohnen der einzusetzenden Art nach dem Stand der Technik unvermeidbar hervorrufen werden (hier dürfte die EU nach und nach weitere Vorgaben machen), wobei auch die vorgegebenen und einzuhaltenden Überflughöhen Berücksichtigung finden und Gebiete am Boden hinsichtlich ihrer Sensibilität unterschiedlich bewertet werden dürften.

#### **5.2.2.4 Gebietsbezogene Nutzungsvorgaben**

Bedeutung kann nach dem derzeitigen Regelungsstand dabei des Weiteren möglichen gebietsbezogenen Vorgaben zukommen, welche die Mitgliedstaaten über Art. 15 der Durchführungsverordnung 2019/947 vorsehen und das BMVI oder eine andere vom Ministerium bestimmte Bundesbehörde nach § 21h Abs. 4 LuftVG festlegen können.

In der Abwägung, ob in bestimmten Gebieten Nutzungen künftig eingeschränkt oder untersagt werden sollen, werden die mit dieser Nutzung einhergehenden Lärmauswirkungen einzubeziehen sein. Ausgehend von dem Stand der Technik und der je nach Einsatzzweck möglichen Flughöhen könnten auch Gebiete identifiziert werden, die für (bestimmte) Drohnenutzungen nur in

einem vorgegebenen Rahmen zugänglich sein sollen. Dabei könnten über Industrie- und Gewerbegebieten oder über bestimmten dünn besiedelten Flächen weit weniger oder andere Vorgaben, als etwa bei besonders dicht besiedelten Wohngebieten.

In Bezug auf besonders sensible Gebiete, namentlich Natura 2000-Gebiete, gibt uns das geltende Recht zugleich bereits einen Rahmen vor. Erhebliche Beeinträchtigungen sind hier grundsätzlich unzulässig und nur in Ausnahmen zulassungsfähig (§ 34 Abs. 3, 4 BNatSchG). Dies gilt für jede Art der Beeinträchtigung; Drohnen bilden hier keinen Sonderfall. Ein regelmäßiger Drohnenüberflug in diesen Bereichen jedenfalls in niedrigeren Höhen erscheint daher wenig realistisch, wenngleich hier einer naturschutzfachlichen Bewertung nicht vorgegriffen werden kann oder soll.

#### **5.2.2.5 Bündelung auf „Flugrouten“**

Mit Blick auf die den Mitgliedstaaten eröffnete Möglichkeit, für ihren Luftraum Vorgaben zum Einsatz von Drohnen zu machen, könnte beim Masseneinsatz größerer Drohnen oder einer absehbaren intensiven Luftraumnutzung für den Transport von Gütern je nach Lärmbelastung am Boden auch das Vorbild der Flugverfahren („Flugrouten“) dienlich sein.

Da der Lärm bemannter Luftfahrzeuge mit Blick auf die Reiseflughöhe vor allem bei Start- und Landung an Verkehrsflughäfen entsteht, werden für An- und Abflüge wie dargelegt Flugverfahren festgelegt, wobei neben Sicherheitsbelangen die Lärmabwägung eine besondere Rolle spielt.

Sollte die voraussichtlich anhaltend deutlich niedrigere Flughöhe bei Drohnen dazu führen, dass der Verkehr und Lärm bspw. in bestimmten Bereichen gebündelt und nicht über die generelle Freigabe des Luftraums breit verteilt und gestreut werden soll, so besteht hierfür das Modell der Flugverfahren und mit dem Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung und der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH Einrichtungen mit großem Erfahrungsschatz bei der Festlegung und Abwägung solcher Verfahren. Dabei werden die Verkehrsströme über Meldepunkte in einem Korridor in der Luft geleitet und die damit einhergehenden Betroffenheit am Boden antizipiert und in einer Abwägung im Benehmen mit dem Umweltbundesamt berücksichtigt.

## 6 Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Ein wichtiges Werkzeug zur Ermittlung der Auswirkungen von schallverursachenden Anlagen und/oder Vorgängen im Vorfeld der Entstehung der Geräusche sind Schallimmissionsprognosen. Insofern wäre es wünschenswert, Schallimmissionsprognosen auch für den Betrieb von Drohnen durchführen zu können.

Da es bislang keine auf die speziellen Eigenschaften von Drohnen angepassten Berechnungsmethoden gibt, wurde im Rahmen dieses Projektes untersucht, inwieweit eine Schallimmissionsprognose unter Verwendung der nachstehend genannten Normen möglich ist, bzw. welche Modifikationen notwendig wären, um Schallimmissionsprognosen durchführen zu können.

- DIN 45684-1 „Ermittlung von Fluggeräuschimmissionen an Landeplätzen – Teil 1: Berechnungsverfahren“ 7-2013 und
- DIN ISO 9613-2 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Allgemeines Berechnungsverfahren“, 10-1999

### 6.1 Berechnungsmethoden

#### 6.1.1 DIN 45684-1

Anwendungszweck der DIN 45684-1 ist die Berechnung von Geräuschimmissionen infolge des Flugbetriebs in der Nachbarschaft an Landeplätzen. Zur Durchführung der Berechnungen werden die an einem Landeplatz verkehrenden Luftfahrzeuge einzelnen Luftfahrzeuggruppen zugeordnet und für jede Luftfahrzeuggruppe akustische Kenngrößen angegeben. In DIN 45684-1 sind akustische Kenngrößen für Ultraleichtflugzeuge, Motorsegler, Propellerflugzeuge, Strahlflugzeuge mit höchstzulässiger Startmasse bis 20 000 kg sowie Hubschrauber mit einer höchstzulässigen Startmasse bis 10 000 kg angegeben.

Die Berechnungsmethodik ist dabei speziell auf den Anwendungsfall von leichten Luftfahrzeugen angepasst. So können sich verändernde Fluggeschwindigkeiten und statistische Abweichungen vom Sollweg einfach berücksichtigt werden. Seit einiger Zeit sind die auf dem Markt angebotenen Softwareprodukte auch in der Lage, Flugrouten digital einzulesen und dadurch eine aufwändige händische Modellierung zu vermeiden. Ein Anwendungsbeispiel stellt das Einlesen von Radarspuren dar.

Die in DIN 45684-1 implementierten akustischen Kenngrößen sind offen gestaltet, so dass es prinzipiell möglich ist, einzelne Parameter eines Kenngrößensatzes an neue Gegebenheiten anzupassen oder auch zusätzliche, neue Luftfahrzeuggruppen zu definieren. Begrenzt wird die Möglichkeit zur Anpassung durch den Umfang des für die Beschreibung einer Luftfahrzeuggruppe bereitgestellten Parametersatzes. So ist zwar die Berücksichtigung einer horizontalen, nicht aber einer vertikalen Richtcharakteristik möglich. Wie in Kap. 3.3.3 ausgeführt, weisen Drohnen vom Typ Multicopter eine ausgeprägte vertikale Richtcharakteristik auf. In horizontaler Richtung existiert hingegen keine ausgeprägte Richtcharakteristik.

In Bezug auf die Berechnung der Geräuschimmissionen beinhaltet die DIN 45684-1 ein für den Anwendungsfall optimiertes, sehr effizientes und damit schnelles Verfahren. Auf die Berücksichtigung von Abschirmungen wird dabei i.d.R. verzichtet, da Luftfahrzeuge i.d.R. so hoch fliegen, dass Abschirmungen keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Berücksichtigung von Reflexionen an Gebäuden o.ä. ist nicht vorgesehen<sup>98</sup>. Insgesamt führt die Optimierung und

<sup>98</sup> Unabhängig vom Normtext bieten zumindest einige Software-Hersteller die Möglichkeit, Reflexionen auch im Anwendungsfall der DIN 45684-1 zu berücksichtigen

Vereinfachung des Berechnungsverfahrens zu kurzen Rechenzeiten, so dass auch Berechnungen für große Gebietsumgriffe in adäquater Zeit durchgeführt werden können.

### **6.1.2 DIN ISO 9613-2**

Die DIN ISO 9613-2 ist in Deutschland derzeit das Standardverfahren zur Berechnung der Geräuschemissionen von Geräuschquellen, für die kein spezielles Berechnungsverfahren vorhanden oder vorgeschrieben ist. Sie wird insbesondere im Geltungsbereich der TA Lärm angewendet.

Hinsichtlich der Möglichkeiten, Geräuschquellen und Lagesituation zu modellieren, ist die DIN ISO 9613-2 sehr flexibel, so dass nahezu alle Situationen modelliert werden können. Auch können sowohl Abschirmungen als auch Reflexionen berücksichtigt werden. Das Verfahren ist allerdings auf statische oder sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegendes Geräuschquellen ausgelegt. Sich verändernde Geschwindigkeiten können daher nur durch eine Zerlegung der gesamten Strecke in mehrere Abschnitte mit jeweils konstanter Geschwindigkeit modelliert werden.

Das Standard-Berechnungsverfahren mit frequenzabhängiger Bodendämpfung ist nur für den Fall einer bodennahen Schallausbreitung vorgesehen. Daneben gibt es ein alternatives Verfahren mit frequenzunabhängiger Bodendämpfung, welches für höher gelegenen Geräuschquellen (z. B. größere Windenergieanlagen) zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung führt.

Die Flexibilität des Verfahrens und die Berücksichtigung vieler, die Schallausbreitung beeinflussenden Faktoren kann jedoch zu sehr langen Rechenzeiten führen, was bei großen Rechengebieten problematisch sein könnte. Dies gilt insbesondere im Falle der Berücksichtigung von Reflexionen höherer (3. oder höherer) Ordnung.

## **6.2 Modellierung und Berechnungsergebnisse**

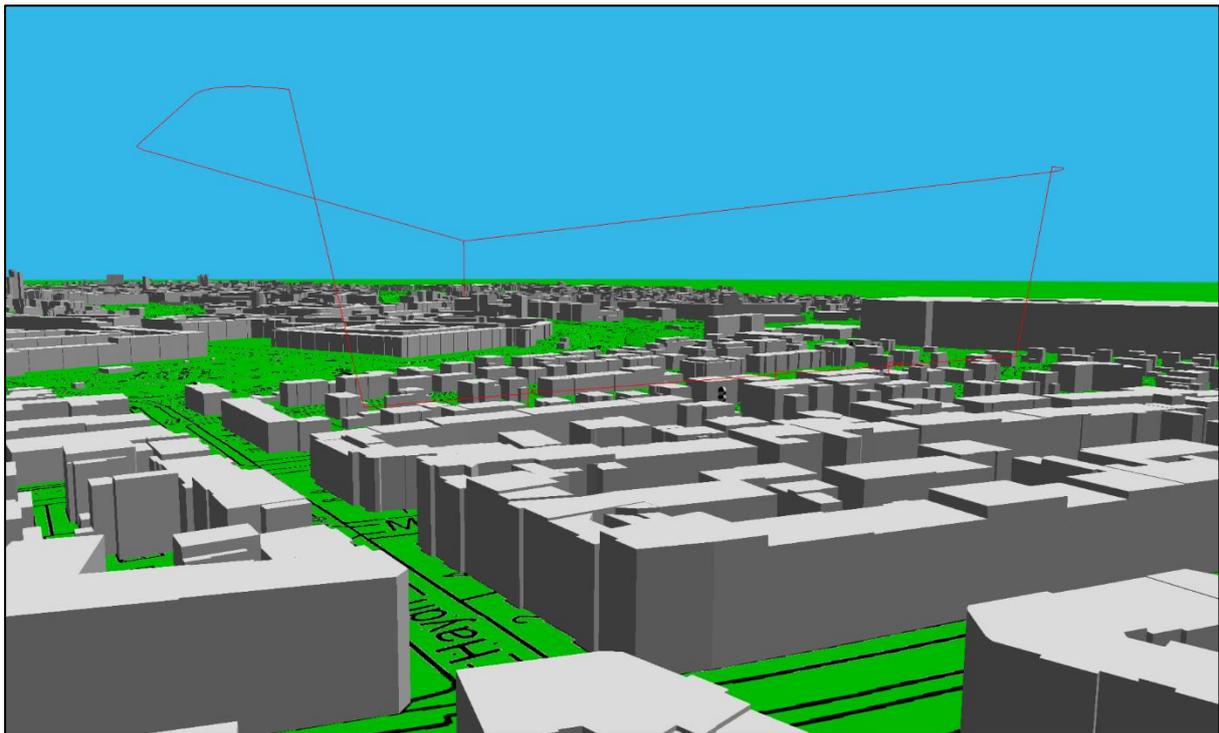
### **6.2.1 Allgemeines**

Im Rahmen des Projektes wurden Schallausbreitungsberechnungen für die folgenden Szenarien durchgeführt:

- A. Warenlieferung vor die Haustür
- B. Geoerkundung eines Gebietes durch langsames Überfliegen
- C. Licht-Show mit mehreren hundert Drohnen

Zur Berechnung der vorstehend genannten Szenarien wurde das Softwarepaket CADNA/A, Version 2021.181 verwendet. Zur Berücksichtigung einer realistischen Umgebung wurde im Falle der ersten beiden Szenarien ein Ausschnitt aus dem digitalen Gelände- und Gebäudemodell (LOD1) der Stadt Berlin verwendet (vgl. Abbildung 17). Für das dritte Szenario wurde von einem ebenen Gelände ausgegangen.

**Abbildung 17** Ausschnitt aus dem verwendeten 3D-Modell (verwendet für Szenarien A und B)



Quelle: eigene Darstellung BeSB

**Modellierung nach DIN 45684-1**

Vorliegend wurden die Szenarien A und B nach DIN 45684-1 modelliert. Dabei wurde in beiden Fällen von einem identischen Start- und Landeplatz ausgegangen. Modelltechnisch wurde an dieser Stelle ein Flugplatz berücksichtigt, von dem die Drohne startet und zu dem sie wieder zurückkehrt. Grundsätzlich entspricht der Vorgang somit der Durchführung einer Platzrunde an einem „normalen“ Landeplatz. Platzrunden setzen sich nach DIN 45684-1 aus Start-, Horizontalflug- und Landeteil zusammen. Das Umschalten zwischen der Start- und der Landesituation ist im Falle eines Drohnenfluges jedoch nur schwer realisierbar. Deshalb wurde im ersten Schritt nur eine Flugroute ohne Höhen definiert (vgl. Abbildung 18). (Sollte die Flugroute in Form von Radarspuren o.ä. digital vorliegen, so könnten diese auch direkt für die Berechnungen verwendet werden.)

**Abbildung 18** Beispiel Eingabefeld Flugroute in CADNA A

Geradeaus	Kurve		Korridorbreite	Höhe (MIL)	Hover
	L/R	Winkel			
(m)		(°)	(m)	(m)	(m)
	L	91.00	0.00	0.00	0.00
1130.00				0.00	0.00
	R	80.50	15.00	0.00	0.00
340.00				0.00	0.00
	R	117.67	30.00	0.00	0.00
1223.00				0.00	0.00

Quelle: eigene Darstellung BeSB

Informationen zu Geräuschemissionen, Flughöhe und zur Geschwindigkeit der Drohne wurden in der Fluggruppenbeschreibung berücksichtigt. Das Schweben einer Drohne an einem bestimmten Ort (z. B. bei der Auslieferung) wurde durch eine sehr langsame Fluggeschwindigkeit modelliert.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass damit die Luftfahrzeuggruppe für jede Flugroute einzeln angelegt oder zumindest modifiziert werden muss. Geschieht dies händisch, so ist dies ein zeitlich aufwendiger Prozess. Ein Beispiel für eine an eine Drohnenflugstrecke angepasste Luftfahrzeuggruppe zeigt Abbildung 19.

**Abbildung 19 Beispiel Eingabefeld Fluggruppe in CADNA A**

Flugzeuggruppe

Bez.:  Art:

Schallleistungspegel Lw (dB)  s0 (m):

63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
98.3	95.8	94.1	97.1	99.6	97.7	97.5	97.0

Richtungsfaktor Rn:

Rn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rn1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rn2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rn3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Kenngrößen: Variable X =

Bogenlänge s'	Zusatzpegel Z	Geschwindigkeit V	Flughöhe H
(m)	(dB)	(m/s)	(m)
0	0	0,005	0
0.1	0	0,005	50
40	0	17	50
1090	0	17	50
1130	0	5.5	50
1151.075	0	5.5	50
1171.075	0	5.5	15
1243.075	0	5.5	15
1248.075	0	0.028	15

Anstiege:  
dZ/ds:   
dV/ds:   
dH/ds:

Quelle: eigene Darstellung BeSB

Die spezielle vertikale Richtcharakteristik von Drohnen der Bauform Multicopter kann in der DIN 45684-1 nicht berücksichtigt werden. Die Berechnungen wurden daher mit einer kugelförmigen Richtcharakteristik durchgeführt. Bei Flugbewegungen, die oberhalb eines betrachteten Immissionspunktes stattfinden, führt dies zu einer Unterschätzung des berechneten Pegels.

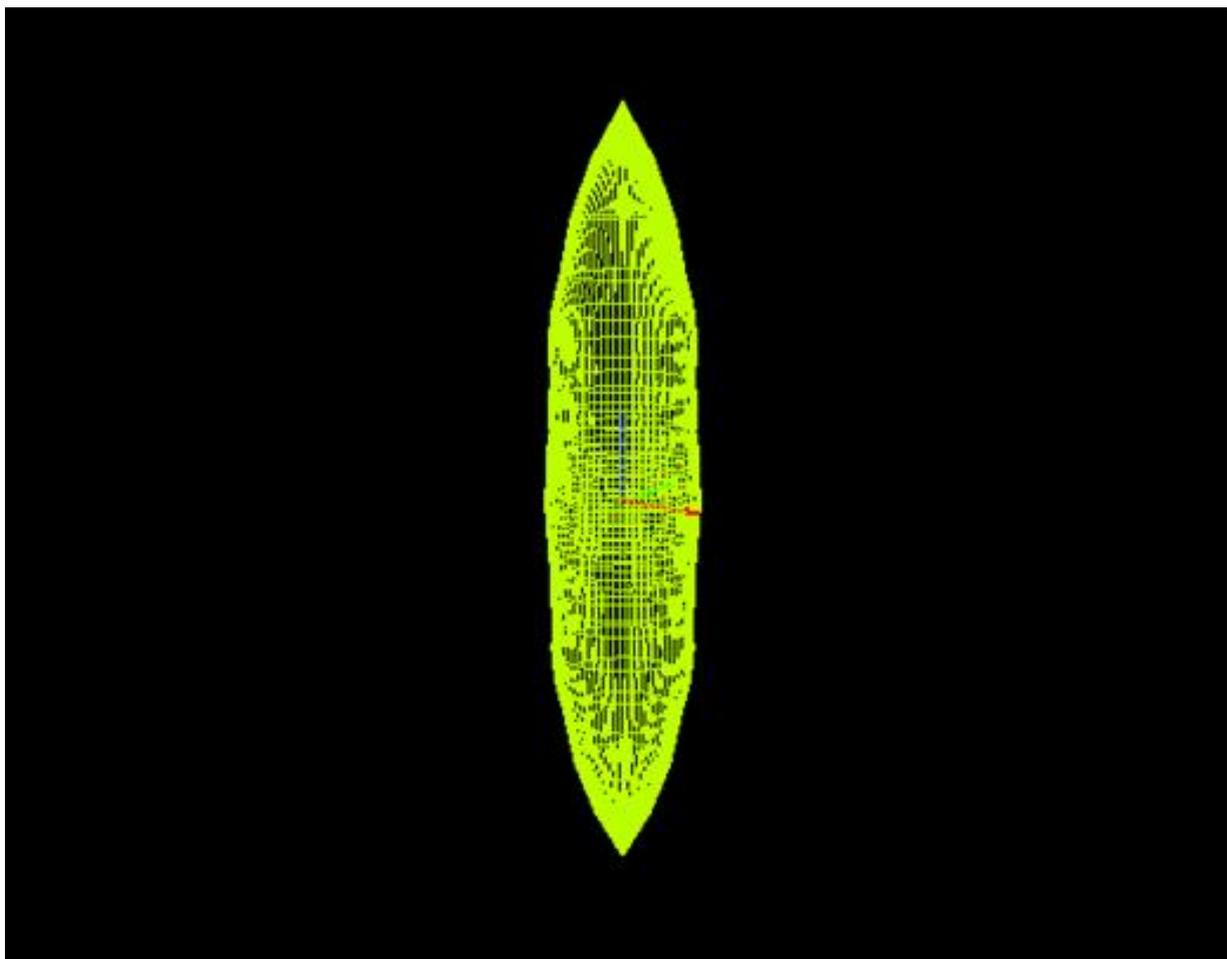
### **Modellierung nach DIN ISO 9613-2**

Im Falle von Berechnungen nach DIN ISO 9613-2 wurden Reflexionen bis zur 3. Ordnung berücksichtigt und für alle Häuser ein Reflexionsverlust von 1 dB angenommen. Eine Windstatistik wurde nicht verwendet, d.h. es wurde für alle Berechnungen von einer die Schallausbreitung begünstigenden(förderlichen) Wetterlage ausgegangen.

Die Modellierung der Flugstrecke und Flugbewegung erfolgte durch Linien- und Punktquellen. Die Linienquellen repräsentieren dabei den Streckenflug, während die Punktquellen die Geräuschemissionen an einem festen Punkt (z. B. Schweben während des Ausliefern) repräsentieren. Den Linienquellen wird dabei eine bestimmte Fluggeschwindigkeit zugeordnet, wodurch die durchschnittliche Aufenthaltszeit auf der Strecke der Linienquelle bestimmt wird. Die Zuordnung erfolgt im Rechenprogramm CADNA/A automatisch. Die Punktquellen werden zur Modellierung des Schwebens einer Drohne über einem festen Punkt verwendet. Die Geräuschimmissionen einer jeden Linien- oder Punktschallquelle werden zunächst einzeln berechnet und anschließend energetisch addiert.

Die Berücksichtigung von dreidimensionalen Richtcharakteristiken ist in DIN ISO 9613-1 möglich, indem die Abweichung vom Mittelwert für einzelne Winkelsegmente quellenspezifisch eingegeben wird, wie das Beispiel in Abbildung 20 zeigt.

**Abbildung 20 3D-Darstellung der in CADNA/A berücksichtigten Richtcharakteristik eines Multicopters**



Quelle: eigene Darstellung BeSB

Die Vor- und Nachteile der beiden untersuchten Berechnungsmethoden sind nachstehend nochmals zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 11 Vor- und Nachteile der untersuchten Berechnungsmethoden im Falle einer Anwendung auf Drohngeräusche.**

DIN 45684-1		DIN ISO 9613-2	
+	Einfache Berücksichtigung spezieller flugtechnischer Eigenschaften wie: kontinuierliche Veränderungen der Geschwindigkeit und der Höhe und Flugkorridore zur Berücksichtigung von Abweichungen vom Sollweg	+	Modellierung durch Linienquellen und Punktquellen ist sehr schnell und flexibel. (Nachträgliche Veränderungen können leicht realisiert werden)
+	Schneller Berechnungsalgorithmus. Damit ist die Berücksichtigung größerer Umgriffe möglich, sofern die Berechnung streng nach DIN 45684 erfolgt und auf die Berücksichtigung von Abschirmungen verzichtet wird	+	Die Berücksichtigung der für Multicopter typischen vertikalen Richtcharakteristik ist möglich
-	Modellierung aufwendig, da das Höhenprofil der Flugroute sowie die Geschwindigkeiten entlang der Flugroute einzeln eingegeben werden müssen. Nachträgliche Veränderungen der Flugroute sind sehr aufwendig	+	Reflexionen und Abschirmungen werden in der Berechnung berücksichtigt
-	Keine Berücksichtigung der für Multicopter typischen vertikalen Richtcharakteristik	-	Die Berücksichtigung spezieller flugtechnischer Eigenschaften wie kontinuierliche Veränderungen der Geschwindigkeit und der Höhe und Flugkorridore zur Berücksichtigung von Abweichungen vom Sollweg ist nicht oder nur mit großem Modellieraufwand möglich
-	Keine Berücksichtigung von Reflexionen vorgesehen (in manchen Softwarepaketen aber dennoch optional möglich)	-	Rechenzeit hoch (insbesondere bei Berücksichtigung von Abschirmungen und Reflexionen)

## 6.2.2 Szenario A – Auslieferung von Waren

### 6.2.2.1 Modellierung

Als Beispiel für eine Auslieferung wurde die Lieferung einer Zeitung durch eine Drohne mit ca. 15 kg Startmasse an drei Häusern in einer Straße betrachtet (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Für die Berechnungen wurde angenommen, dass die Drohne in einem Gewerbegebiet startet und nach der Tour wieder am selben Punkt landet.

Der Ablauf des Flugs wurde wie folgt angenommen: Nach dem Start steigt die Drohne senkrecht auf eine Höhe von 100 m und beschleunigt danach auf eine Fluggeschwindigkeit von 60 km/h. Die Drohne fliegt dann auf direktem Wege zum Beginn der Straße, in der die Auslieferung stattfinden soll. Bevor die Drohne auf eine Flugrichtung entlang der Straße schwenkt, verlangsamt sie den Flug auf eine Geschwindigkeit von 20 km/h. Nachdem die Drohne auf die Flugrichtung entlang der Straße eingeschwenkt ist, sinkt sie auf eine Flughöhe von 15 m (vorliegend ca. 2 – 3 m über den Häuserdächern) und fliegt die Straße entlang. An den drei Auslieferungspunkten schwenkt die Drohne von der Straße in Richtung Grundstück. Über dem Grundstück, am festgelegten Auslieferungspunkt, stoppt die Drohne den Vorwärtsflug und sinkt senkrecht auf die Auslieferungshöhe von 4 m über Boden. An diesem Punkt schwebt die Drohne für 12 Sekunden

und klinkt die Zeitung aus. Mit Beendigung der Auslieferung steigt sie wieder auf 15 m Höhe, beschleunigt auf 20 km/h und verlässt das Grundstück, um den Flug entlang der Straße fortzusetzen. An den nächsten zwei Auslieferungspunkten wiederholt sich der beschriebene Ablauf. Nach Beendigung aller drei Auslieferungen fliegt die Drohne zum Ende der Straße, steigt dort wieder auf 100 m Flughöhe und schwenkt dann auf einen Kurs Richtung Ausgangspunkt. Dabei beschleunigt sie wieder auf 60 km/h. Vor dem Start-/Landepunkt bremst die Drohne bis zum Stillstand ab und sinkt senkrecht Richtung Boden bis zur Landung.

Bei der Modellierung nach DIN 45684-1 können Strecken auf denen beschleunigt wird oder Strecken mit gleichbleibender Geschwindigkeit gleichermaßen berücksichtigt werden. Dies geht bei der Modellierung nach DIN ISO 9613-2 nicht. Hier können nur konstante Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Im Sinne eines Ansatzes zur sicheren Seite, wurde bei den Berechnungen nach DIN ISO 9613-2 für die Beschleunigungs- bzw. Bremsstrecken eine insgesamt längere Aufenthaltszeit berücksichtigt, in dem eine konstante, geringere Geschwindigkeit von 10 km/h angesetzt wurde.

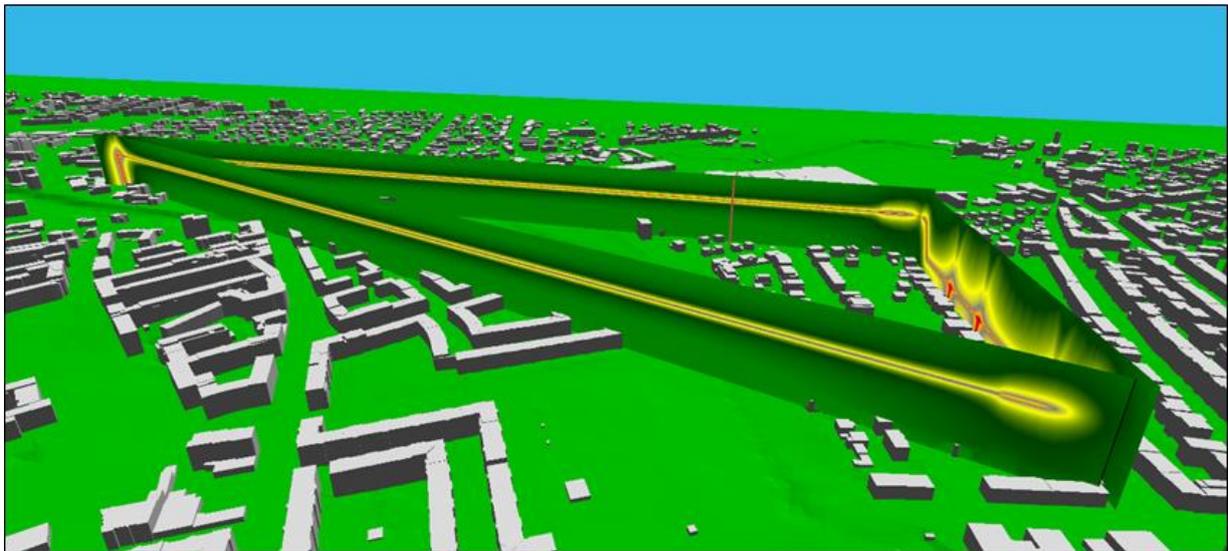
Der Zustand des Schwebens während der Auslieferung wurde im Anwendungsfall der DIN ISO 9613-2 durch eine statische Punktquelle unter Berücksichtigung der entsprechenden Aufenthaltsdauer der Drohne modelliert. Bei Anwendung der DIN 45684-1 wurde an der Auslieferungsstelle ein Weglängenstück von 0,1 m definiert und die vordefinierte Aufenthaltsdauer von 12 Sekunden durch eine entsprechend niedrige Fluggeschwindigkeit berücksichtigt.

Hinsichtlich der Geräuschemissionen der Drohne während des Fluges wurde auf die in Kap. 3.3.2 angegebenen Ergebnisse zurückgegriffen. Demzufolge ist davon auszugehen, dass eine Drohne mit einer Startmasse von 15 kg im Betrieb einen Schallleistungspegel von 105 dB(A) aufweist. Ein Lästigkeitszuschlag wurde nicht berücksichtigt.

Zur Verifizierung der Modellierung sowie der Berechnungssystematik wurden vertikale Raster entlang der Flugbahnen berechnet (vgl. Abbildung 21). Die farbliche Darstellung der berechneten Mittelungspegel in den vertikalen Rastern wurde so angepasst, dass die Vorgänge möglichst gut nachvollziehbar sind. So ist am linken Abbildungsrand der Start- und Landebereich ersichtlich. Hier ergeben sich aufgrund der geringeren Fluggeschwindigkeit und der Nutzung des gleichen Flugweges für Start und Landung relativ lange Aufenthaltsdauern und in Folge dessen auch relativ hohe Geräuschmissionen.

Am rechten Rand der Abbildung ist die Geräuschsituation infolge der Auslieferung zu erkennen. Wie zu erwarten, ergeben sich die höchsten Geräuschmissionen dort, wo die Drohne zum Zwecke der Auslieferung für eine Weile dicht über dem Boden und nah zu den Gebäuden schwebt. An diesen Stellen ist auch die vertikale Richtcharakteristik der Drohne erkennbar (diese ist in der Berechnung nach DIN 45684-1 nicht ersichtlich, da sie dort nicht berücksichtigt werden kann).

**Abbildung 21** Berechnete vertikale Raster nach DIN ISO 9613-2 Szenario A – Auslieferung



Quelle: eigene Darstellung BeSB

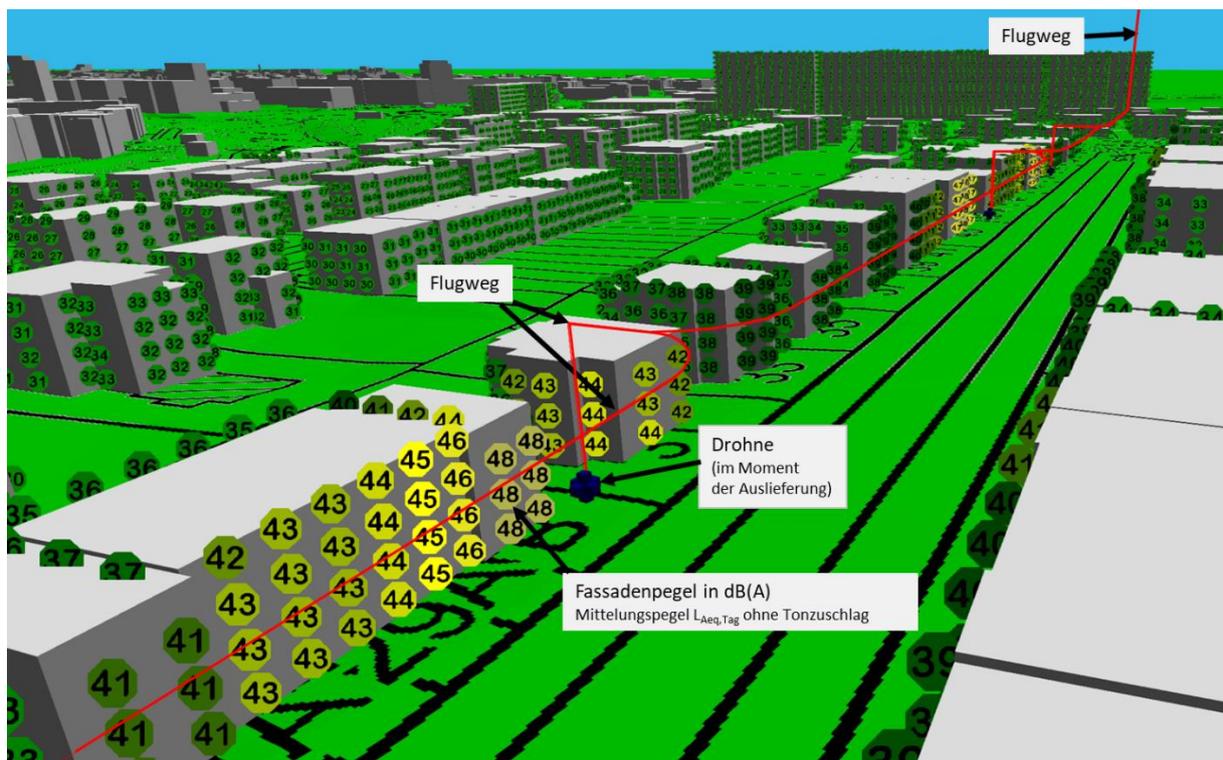
### 6.2.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Berechnung nach DIN ISO 9613-2 des gleichen Vorgangs als drei-dimensionale Fassadenpegel dargestellt. Die angegebenen Zahlenwerte geben den über den gesamten Tag (16 Stunden) gemittelten energetischen Mittelungspegel an ( $L_{Aeq,Tag}$ ), wobei von einem Vorgang pro Tag ausgegangen wurde.

Eine Mittelungszeit von 16 Stunden wurde gewählt, da sich abzeichnet, dass derartige Vorgänge anhand der Immissionsrichtwerte der TA Lärm zu bewerten sind (vgl. Kap. 5.1.3.3). Die Immissionsrichtwerte der TA Lärm für die Tageszeit entsprechen dem energetischen Mittelungspegel über den Zeitraum von 06:00 bis 22:00 Uhr  $L_{Aeq,Tag}$  zzgl. Zuschlägen für Geräuscheinwirkungen in den Tagesrandzeiten sowie für ton- und/oder impulshaltiger Geräusche (Beurteilungspegel). Während eine Impulshaltigkeit eher auszuschließen ist, ist mindestens im Nahbereich ein Tonzuschlag zu berücksichtigen. Ausgehend von den in Kap. 4.4.2.1 dargestellten Ergebnissen dürfte im Nahbereich der Höchstwert des Tonzuschlags von 6 dB gerechtfertigt sein.

Die in Abbildung 22 dargestellten energetischen Mittelungspegel  $L_{Aeq,Tag}$  enthalten noch keine Zuschläge und sind hier orientierend zu verstehen, da die bislang vorliegenden Angaben zu den Geräuschemissionen von Drohnen noch wenig belastbar sind. Insbesondere fehlen Angaben, inwieweit sich die Geräuschemissionen der einzelnen Flugphasen voneinander unterscheiden. Darüber hinaus ist die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens derzeit noch unklar.

**Abbildung 22** Berechnungsergebnisse Szenario A – Auslieferung, energetischer Mittelwert  $L_{Aeq,Tag}$  bei einer Auslieferung pro Tag



Quelle: eigene Darstellung BeSB

In Abbildung 22 sind die höheren Pegel deutlich in denjenigen Bereichen zu erkennen, in denen die Drohne auf eine niedrige Flughöhe sinkt und die Zeitung ausliefert. So wurden für die Gebäude, für die die Auslieferung bestimmt ist, energetische Mittelungspegel von  $L_{Aeq,Tag} = 48$  dB(A) berechnet. Für direkte Nachbargebäude (z. B. Reihenhauser) sind 2 dB geringere Pegel ermittelt. Handelt es sich um benachbarte Einzelhäuser, so ergeben sich je nach Abstand 4-6 dB geringere Pegel. Häuser auf der gegenüberliegenden Straßenseite weisen mit bis zu  $L_{Aeq,Tag} = 41$  dB(A) bis zu 7 dB geringere Pegel auf.

Wie oben ausgeführt, müsste bei einer beispielhaften Bewertung nach TA Lärm zu den berechneten Mittelungspegeln noch ein Zuschlag für die Tonhaltigkeit in Höhe von 6 dB berücksichtigt werden. Würde man des Weiteren die belieferten Häuser aus der Bewertung ausschließen<sup>99</sup> und nur die betroffenen Nachbarhäuser betrachten, würden sich bei unmittelbar anschließenden Nachbargebäuden (Reihenhäuser) ein Beurteilungspegel von 52 dB(A) ergeben; bei einer Auslieferung per Drohne am Tag. Bereits eine zweite Drohne würde zu einem Beurteilungspegel von 55 dB(A) führen. Für eine Wohnnutzung in einem „allgemeinen Wohngebiet“ würde dies bereits eine vollständige Ausschöpfung des Immissionsrichtwertes nach TA Lärm bedeuten. Die Einhaltung der Anforderungen der TA Lärm könnte daher je nach Entfernung zu schützenswerten Nutzungen und der Anzahl an Flügen problematisch werden.

Wird ein Haus in 100 m überflogen, so ergeben sich weit geringere Mittelungspegel. In dem gewählten Beispiel ergeben sich Mittelungspegel von bis zu 24 dB(A), bei einer überfliegenden Drohne am Tag. Bei der Annahme von 100 Drohnen, die ein Haus überfliegen, würden sich ein

<sup>99</sup> Die Immissionsrichtwerte der TA Lärm dienen zum Schutz fremder Nutzungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diejenige Person, die eine Lieferung per Drohne in Auftrag gegeben hat, die damit verbundene Geräuschbelastung auf dem eigenen Grundstück billigend in Kauf nimmt.

energetischer Mittelungspegel von  $L_{Aeq,Tag} = 44$  dB(A) ergeben. Selbst wenn man einen Tonzuschlag von 6 dB berücksichtigten würde, ergäbe sich immer noch eine Unterschreitung der Immissionsrichtwerte der TA Lärm für allgemeine Wohngebiete zur Tageszeit um 5 dB. Streckenflüge in großer Höhe dürften somit in der Regel unkritisch in Bezug auf die Einhaltung der Anforderungen der TA Lärm sein.

Die Berechnungen nach DIN 45684-1 führen grundsätzlich zu ähnlichen Ergebnissen. Aufgrund der Nichtberücksichtigung von Reflexionen an den Häuserfassaden und der Nichtberücksichtigung der vertikalen Richtcharakteristik werden jedoch innerhalb des Straßenzugs, in dem die Auslieferung stattfindet, niedrigere (und damit vermutlich zu geringe) Geräuschimmissionen berechnet. Entlang des übrigen Teils der Flugroute ergeben sich hingegen sehr ähnliche Geräuschimmissionen.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die berechneten Mittelungspegel orientierend zu verstehen sind, da die bislang vorliegenden Angaben zu den Geräuschemissionen von Drohnen noch wenig belastbar sind und darüber hinaus die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens derzeit noch unklar ist.

### **6.2.3 Szenario B – Geoerkundung**

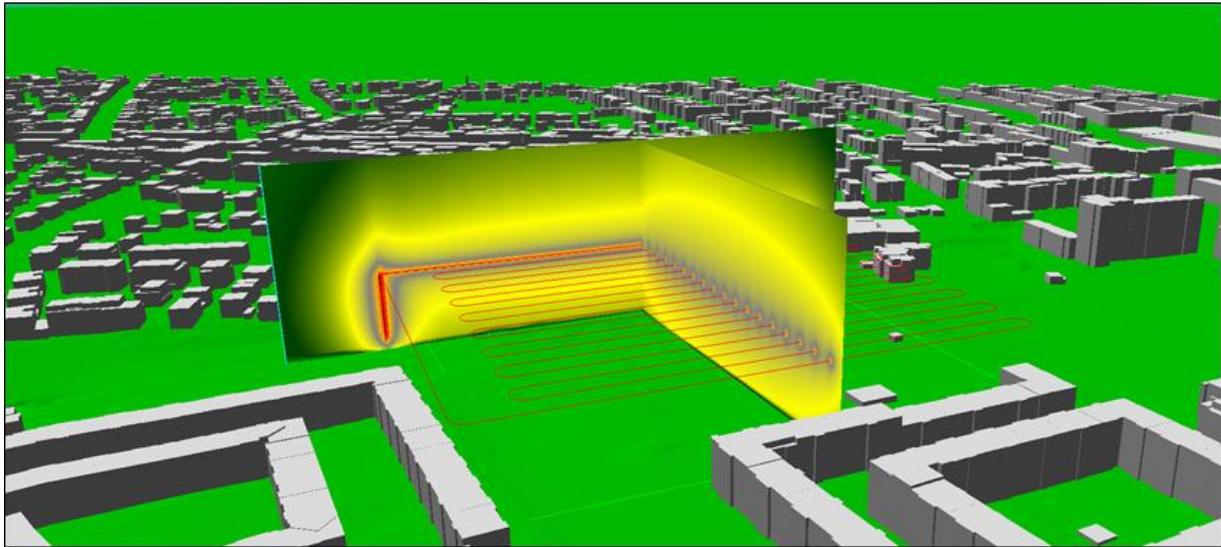
#### **6.2.3.1 Modellierung**

Für dieses Szenario wurde die Untersuchung eines Gebietes von ca. 3,5 ha betrachtet (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24). Es wird angenommen, dass die Drohne durch ein Fahrzeug angeliefert wird und direkt neben dem zu untersuchenden Gebiet startet und wieder landet. Für die Berechnung wurde angenommen, dass die Drohne das zu untersuchende Gebiet in konstanter Höhe (50 m über Boden) in mehreren Schleifen mäanderförmig mit konstanter Geschwindigkeit (5 km/h) überfliegt. Für das gewählte Beispiel ergibt sich mit den vorstehenden Angaben eine Flugdauer von ca. 45 Minuten.

Da die Drohne außer einer Kamera keine Lasten tragen muss, wird eine 5 kg schwere Drohne als ausreichend angenommen. Gemäß den in Kap. 3.3.2 dargestellten Ergebnissen ist für ein derartiges Gerät von einem Schalleistungspegel von 97 dB(A) auszugehen.

In Abbildung 23 sind die berechneten vertikalen Raster zur Verifizierung der Modellierung sowie der Berechnungssystematik ersichtlich. Auch hier wurde die farbliche Darstellung der berechneten Mittelungspegel in den vertikalen Rastern so angepasst, dass eine möglichst gute Nachvollziehbarkeit der Vorgänge entsteht. Auch hier ist zu erkennen, dass die Flugstrecke der Drohne in der Berechnung gut berücksichtigt werden konnte. Ebenfalls ist die gleichmäßige Pegelverteilung entlang der Flugstrecke zu erkennen, die aufgrund der konstanten Fluggeschwindigkeit entsteht. Einzig im Bereich des Starts und der Landung treten aufgrund der zweifachen Nutzung der Flugstrecke höhere Geräuschimmissionen auf.

**Abbildung 23** Berechnete vertikale Raster nach DIN ISO 9613-2 Szenario B - Geoerkundung



Quelle: eigene Darstellung BeSB

### 6.2.3.2 Ergebnisse

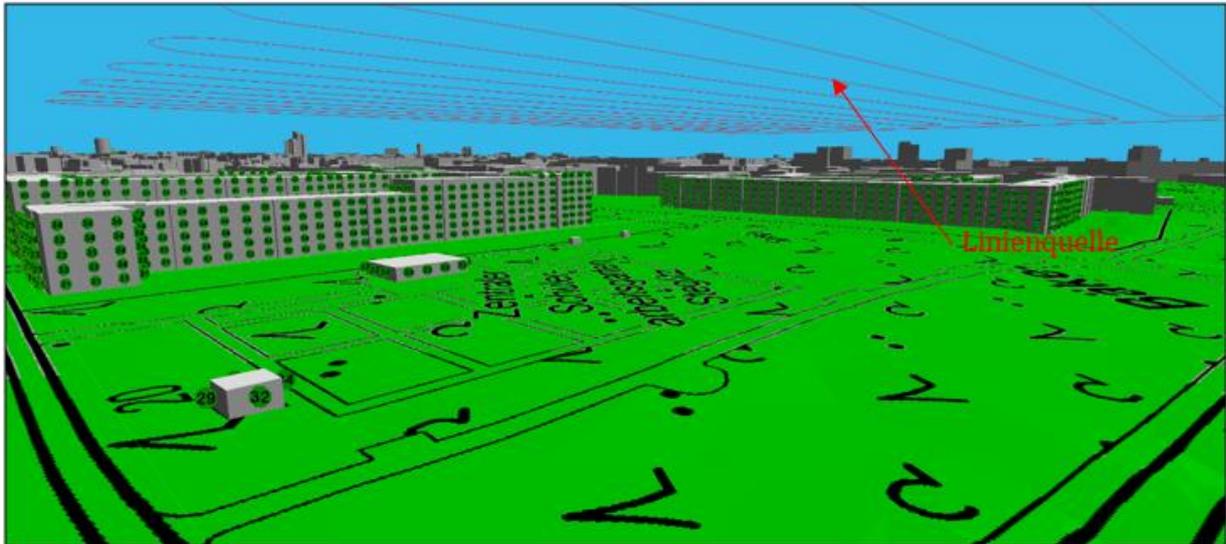
In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der Berechnung nach DIN ISO 9613-2 als dreidimensionale Fassadenpegel dargestellt. Für Gebäude, die sich am nächsten zur Flugstrecke der Drohne befinden, wurden energetische Mittelungspegel  $L_{Aeq,Tag}$  von 35 dB(A) berechnet. Es ist aber davon auszugehen, dass der Erkundungsflug im Bereich der nächstgelegenen Anwohnenden gut hörbar sein dürfte, so dass zur Ermittlung des Beurteilungspegels gemäß TA Lärm ein Tonzuschlag in Höhe von 6 dB gerechtfertigt erscheint. Damit würde sich für die nächstgelegenen Anwohnenden ein Beurteilungspegel von 41 dB(A) ergeben. Der Immissionsrichtwert der TA Lärm für die Tageszeit für allgemeine Wohngebiete von 55 dB(A) würde damit deutlich unterschritten werden.

Die Ergebnisse nach DIN 45684-1 führen zu ähnlichen Ergebnissen, da sich bei diesem Anwendungsfall die Unterschiede der Berechnungsverfahren nicht relevant auswirken.

Es sei aber noch einmal darauf hingewiesen, dass die berechneten Mittelungs- und Beurteilungspegel auch in diesem Anwendungsfall nur orientierend zu verstehen sind, da sie neben den bereits beschriebenen Unsicherheiten (Geräuschemissionen der eingesetzten Drohne und der Genauigkeit des Verfahrens) maßgeblich auch durch die Zeitdauer der Befliegung sowie den minimalen Abstand zur nächstgelegenen schützenswerten Nutzung bestimmt werden.

**Abbildung 24** Berechnungsergebnisse Szenario B - Geoerkundung energetischer Mittelwert

$L_{Aeq,Tag}$

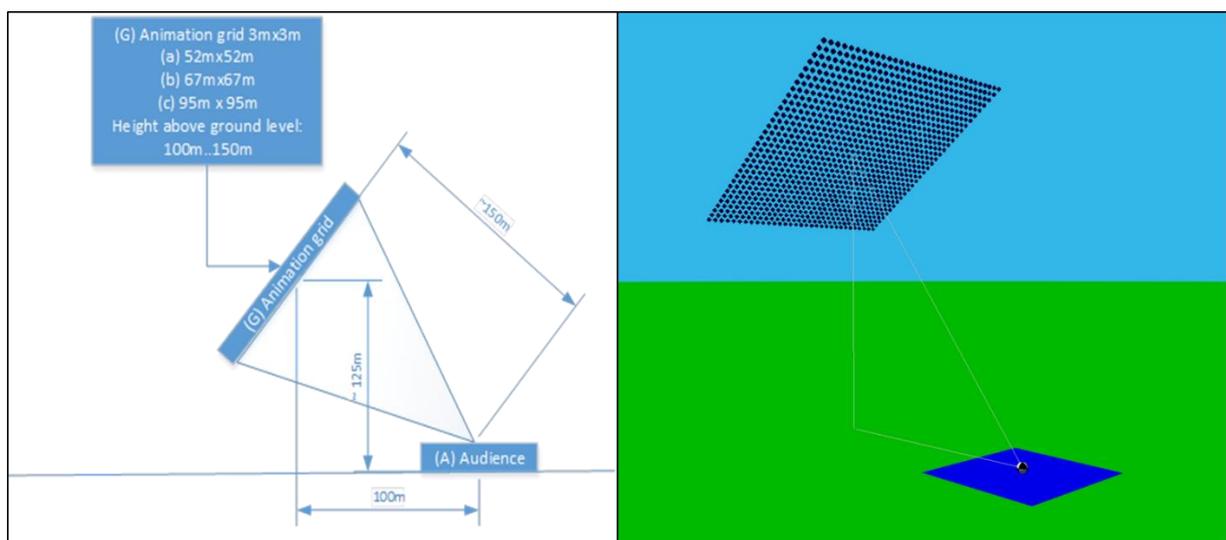


Quelle: eigene Darstellung BeSB

### 6.2.4 Szenario C – Drohnen-Lichtshow

Für Lichtshows werden sehr viele kleine Drohnen eingesetzt, die mit ansteuerbaren Leuchtelementen ausgestattet sind. Die nach Auskunft eines Betreibers derzeit übliche Konstellation zur Durchführung von Lichtshows mit Drohnen ist in Abbildung 25 dargestellt. Demzufolge schweben die Drohnen während der Vorführung innerhalb eines fest vorgegebenen Bereichs am Himmel (sog. Animation grid), der sich vor dem Publikum befindet. Innerhalb des Animation grids sind die Drohnen gitterförmig angeordnet, wobei zwischen den einzelnen Drohnen ein Abstand von ca.  $3 \times 3$  m besteht. Das Zentrum des Animation grids befindet sich ca. 125 m über Boden in einer horizontalen Entfernung von ca. 100 m zum Zentrum der Zuschauerfläche (vgl. Abbildung 25).

**Abbildung 25** Szenario C – Drohnen-Lichtshow, Prinzipielle Anordnung und 3D-Darstellung des Berechnungsmodells



Quelle: eigene Darstellung BeSB

Für die Berechnungen wurde angenommen, dass die Veranstaltung auf einem freien Feld oder Platz stattfindet und somit Abschirmungen sowie Reflexionen unberücksichtigt bleiben können. Da sich die Drohnen nur in einem begrenzten Bereich bewegen und keine längeren Flugstrecken zurücklegen, ist eine Berechnung nach DIN 45684-1 nicht sinnvoll. Es wurden daher ausschließlich Berechnungen nach DIN ISO 9613-2 durchgeführt. Dabei wurde jede Drohne durch eine eigene Punktquelle berücksichtigt (vgl. Abbildung 25).

Für die Berechnungen wurde eine Veranstaltung mit 1024 Drohnen unterstellt, die jeweils eine Masse von 0,35 kg aufweisen. Hinsichtlich der Geräuschemissionen einer einzelnen Drohne wurde von einem Schalleistungspegel von 91 dB(A) ausgegangen.

Mit den vorstehend genannten Annahmen würde sich im Zuschauerbereich während der Durchführung der Veranstaltung ein Schalldruckpegel von ca. 67 dB(A) ergeben. Üblicherweise werden solche Veranstaltungen mit Musik untermalt. Es ist zu vermuten, dass die durch die Begleitmusik erzeugten Schalldruckpegel in der Regel höher sind, als die durch die Drohnen-Lichtshow erzeugten Schalldruckpegel.

## 7 Fazit und Ausblick

Die technische Entwicklung ziviler Drohnen sowie deren rechtliche Einordnung ist bis heute nicht abgeschlossen, so dass die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens zusammengetragenen Ergebnisse nur eine Momentaufnahme darstellen.

So ist die Anzahl der sich in Betrieb befindlichen Drohnen wesentlich davon abhängig, in welchem Umfang diese genutzt werden können. Die Nutzungsmöglichkeiten aber werden im Wesentlichen durch den rechtlichen Rahmen vorgegeben.

In Bezug auf rechtliche Vorgaben liegt der Schwerpunkt der Zuständigkeit bei der EU. Diese gibt u.a. Regelungen für die Herstellung und Entwicklung der Geräte sowie grundsätzliche Vorgaben zu deren Betrieb vor. Den Mitgliedstaaten ist es demgegenüber möglich, über gebietsbezogene Regelungen zu bestimmen, wo ihr Luftraum von Drohnen unter welchen Bedingungen genutzt werden kann.

Mit der jüngsten Novellierung der LuftVO vom Juni 2021 wurde dieses Regelungsschema in Deutschland umgesetzt und es wurden gebietsbezogen erste Vorgaben über sensible Bereiche gemacht, in denen Drohnen nur unter einschränkenden Bedingungen operieren dürfen. Ein Regelbetrieb von Drohnen im Nahbereich von wohnmäßigen Nutzungen ist im Lichte dieser Vorgaben nur für wenige Anwendungen möglich.

Die Einschränkungen sind dabei vor allem durch Aspekte der Sicherheit und des Persönlichkeitsschutzes bestimmt. Umwelt- und Lärmschutz spielen (noch) eine untergeordnete Rolle. Dort wo der Lärmschutz angesprochen wird, bleiben die diesbezüglichen Vorgaben meist vage, sodass viele Fragen offenbleiben. Hier sind Präzisierungen dringend erforderlich, um einen Regelbetrieb von Drohnen auch in der Nähe von bewohnten Gebieten zu ermöglichen.

Hinsichtlich der Geräusentwicklung ist festzustellen, dass es bislang nur sehr wenige valide Angaben gibt und die wenigen Angaben sich zudem nur auf Drohnen der Bauform Multicopter beziehen. Hier bräuchte es eine breitere Datenbasis und eine einheitlichere Messpraxis, die auch andere Bauformen wie Tilt-Rotor oder Tilt Wing mit einbezieht, um genauere Geräuschimmissionsprognosen, wie sie für die übrigen Verkehrsarten Standard sind, durchführen zu können. Die in der delegierten EU Verordnung 2019/945 vorgegebenen Geräuschgrenzwerte stellen diesbezüglich einen ersten Ansatz dar, doch betreffen diese nur kleinere Drohnen bis zu einer maximalen Startmasse von 4 kg. Für Starrflügler und damit auch für die neuen senkrecht startenden Starrflügler mit Schwenkpropellern oder Schwenkflügeln gelten diese Grenzwerte zudem nicht. Darüber hinaus beziehen sich die Grenzwerte nur auf den Betriebsfall „Schweben“. Für eine valide Geräuschimmissionsprognose müssten auch die anderen Flugzustände erfasst werden.

Die technische Durchführung von Geräuschimmissionsprognosen stellt hingegen kein wesentliches Problem dar. Die bestehenden Berechnungsmodelle sollten zwar stärker auf die speziellen Eigenschaften von Drohnen angepasst werden, doch ergeben sich hieraus keine prinzipiellen Probleme.

Allen bislang untersuchten Drohnengeräuschen gemeinsam ist eine ausgeprägte Tonhaltigkeit. Damit unterscheiden sich die Drohnengeräusche wesentlich von allen anderen Umweltgeräuschen. Der Betrieb von Drohnen ist somit leicht aus den sonstigen Geräuschen heraushörbar und deutlich lästiger als andere Verkehrsgeräusche.

Zu psychologischen Aspekten der Drohnengeräusche gibt es bislang nur sehr wenige Untersuchungen, die zudem ausschließlich im Labor durchgeführt wurden. Es ist aber bekannt, dass tonhaltige Geräusche ein stärkeres Lästigkeitsempfinden hervorrufen. So müsste bei einer Bewertung der Geräusche nach TA Lärm zumindest bei kleineren Entfernungen ein Tonzuschlag von 6

dB berücksichtigt werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis (rund 5 bis 6 dB) kommen auch die zu diesem Thema ausgewerteten Literaturstellen.

Zur Verminderung der Störwirkung von Drohnengeräuschen ist es daher wesentlich, die Tonhaltigkeit der Geräusche zu vermindern. Des Weiteren sollte die Tonhaltigkeit einer Drohne bei der Festsetzung von schalltechnischen Anforderungen berücksichtigt werden. Damit gäbe es einen Anreiz zur Entwicklung von Geräten, die eine geringere Tonhaltigkeit und damit auch eine geringere Lästigkeitswirkung aufweisen. Darüber hinaus würde es dem Nutzer die Möglichkeit eröffnen, diesen Aspekt bei der Auswahl eines Gerätes zu berücksichtigen.

## 8 Quellenverzeichnis

### Prisma Review:

Moher 2015, Moher, D.; Shamseer, L.; Clarke, M.; Ghersi, D.; Liberati, A.; Petticrew, M.; Shekelle, P.; Stewart, L.A.; Grp, P.-P., 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4, doi: 10.1186/2046-4053-4-1

Ziegler et al 2011, Ziegler, A.; Antes, G.; König, I.R., 2011. Bevorzugte Report Items für systematische Übersichten und Meta-Analysen: Das PRISMA-Statement. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 136, e9–e15. doi: 10.1055/s-0031-1272978.

### Normen und Richtlinien

DIN 45684-1 „Akustik — Ermittlung von Fluggeräuschemissionen an Landeplätzen — Teil 1: Berechnungsverfahren“, Ausgabe 7-2013

DIN ISO 9613-2 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren“, Ausgabe 10-1999

### Rechtlichen Grundlagen (Verordnungen, Gesetze u. ä.)

BNSchG, Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist

EU 2012/748, Verordnung (EU) Nr. 748/2012 DER KOMMISSION zur Festlegung der Durchführungsbestimmungen für die Erteilung von Lufttüchtigkeits- und Umweltzeugnissen für Luftfahrzeuge und zugehörige Produkte, Bau- und Ausrüstungsteile sowie für die Zulassung von Entwicklungs- und Herstellungsbetrieben, Abl. DE L224/1 vom 3.8.2012,

EU 2017/598, Verordnung (EU) 598/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.04.2014 über Regeln und Verfahren für lärmbedingte Betriebsbeschränkungen auf Flughäfen der Union, Abl. L 173/65 vom 12.06.2014,

EU 2018/1139, Verordnung (EU) 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04.07.2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 2111/2005, (EG) Nr. 1008/2008, (EU) Nr. 996/2010, (EU) Nr. 376/2014 und der Richtlinien 2014/30/EU und 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 552/2004 und (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EWG) Nr. 3922/91 des Rates, Abl. L 212/1 vom 22.08.2018.

EU 2019/945, Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12.03.2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme, Abl. L 152/1 vom 11.06.2019.

EU 2019/947, Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24.05.2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge, Abl. L 152/45 vom 11.06.2019.

EU RL 2000, Richtlinie 2000/14/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 8.5.2000 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehene Geräte und Maschinen, Abl. L 162 vom 3.7.2000, geändert durch Richtlinie 2005/88/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2005, Abl. L 344 vom 27.12.2005

EU RL 2002, Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, Abl. L 189/12 vom 18.07.2002

FFH-Richtlinie, Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21.05.1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen, Abl. L 206 vom 22.07.1992, S. 7.

FlugLärmG, Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550)

Landeplatz-LärmschutzVO, Landeplatz Lärmschutz-Verordnung vom 5. Januar 1999 (BGBl. I S. 35), die durch Artikel 5 der Verordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894) geändert worden ist.

Luft VG, Luftverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 698), das zuletzt durch Artikel 131 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist

LuftVZO, Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 19. Juni 1964 (BGBl. I S. 370), die zuletzt durch Artikel 132 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist

LuftVO, Luftverkehrs-Ordnung vom 29. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1894), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Juni 2021 (BGBl. I S. 1766) geändert worden ist

STVZO, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist

TA Lärm 2017, Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 28. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503) zuletzt geändert durch Bekanntmachung des BMU vom 1. Juni 2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5) in Kraft getreten am 9. Juni 2017

Vogelschutzrichtlinie, Richtlinie 2009/147/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.11.2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (kodifizierte Fassung), ABl. L 20 vom 26.01.2010, S. 7.

#### **Sonstige Rechtliche Quellen**

Bittlinger 1986, Horst Bittlinger, Gemeinsame Sitzung der Ausschüsse für Luft- und Weltraumrecht Hannover 11-06-1986, Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (ZLW) 1986, 222-225

Bundestag 2021/9354, Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur, zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 19/28179BT, Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge, Drucksache 2019/29354

BVerwG, Urteil vom 10.05.1985 – 4 C 69/82 –, (Gefährdung der Sicherheit des Luftverkehrs oder der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung als Versagungsgrund einer Aufstiegserlaubnis für Flugmodelle; Ermessensspielraum oder Abwägungsspielraum der Luftfahrtbehörde für die Entscheidung über Erteilung oder Versagung der Aufstiegserlaubnis für Flugmodelle; Erhebliche Lärmbelästigung der Anlieger und Spaziergänger als Versagungsgrund einer Aufstiegserlaubnis für Flugmodelle)

BVerwG 2013, 4 C 3.12, Keine Freistellung der Bundeswehr von den luftverkehrsrechtlich vorgegebenen Mindestflughöhen und den habitatschutzrechtlichen Verfahrensschritten gemäß § 34 Abs. 1 und Abs. 3 bis 5 BNatSchG, Urteil vom 10.4.2013

Dieckert und Eich 2018; "Drohnen – Technik und Recht bei gewerblicher und behördlicher Nutzung"; Bundesanzeiger Verlag 2018

EASA civil drones 2021, EASA Civil drones (Unmanned aircraft) / DReones – regulatory framework background / Certified Category – Civil Drones, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones> (abgerufen am 15.04.2021)

EASA Certified Category – Civil Drones 2021, <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>, (abgerufen am 15.04.2021)

EASA Opinion 01/2018, Unmanned aircraft system (UAS) operations in the "open" and "specific" categories, <https://www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-012018> (abgerufen am 14.04.2021)

EASA Opinion 05/2019, Standard scenarios for UAS operations in the “specific” category, <https://www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-052019> (abgerufen am 14.04.2021)

Grabherr et al 2021, Edwin Grabherr, Olaf Reidt, Peter Wysk (Hrsg.), Luftverkehrsgesetz - Kommentar - Loseblatt - Stand 8-2021, München C.H. Beck

Holle / Bredebach 2020, Philipp Maximilian Holle, Sebastian Bredebach, Rechtlicher Rahmen für den privaten Betrieb von Drohnen nach der deutschen „Drohnen-Verordnung“ vom 30.07.2017, Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht (NVZ) 2020, 132-136

Jarass 2020, Hans D. Jarass, Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) – Kommentar, 13. Auflage, C.H. Beck

Josipovic, 2019, Europäische Regulierung des Betriebs unbemannter Luftfahrzeuge, Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht, (NZV) 2019, 438

Krumm 2019, Krumm, M. Der neue europäische Rechtsrahmen für unbemannte Luftfahrzeuge – Anpassungsbedarf im deutschen Luftverkehrsrecht? Europäische Zeitschrift für Wirtschaftsrecht, 2019, 114

Landmann/Rohmer 2017, Landmann/Rohmer Umweltrecht/ Dietlein, 83. EL, August 2017

Landmann/Rohmer 2020, Landmann/Rohmer Umweltrecht/Gellermann, 93. EL, August 2020, BNatSchG § 45

OVG Lüneburg 2020, 4 KN 390/17, Rechtmäßige Festsetzung eines Naturschutzgebietes (hier: Verordnung des Landkreises Verden über das Natur- und Landschaftsschutzgebiet „Untere Allerniederung im Landkreis Verden“), Urteil vom 4.3.2020

Reidt et al 2015, Olaf Reidt, Frank Fellenberg, Gernot Schiller. Kommentierung des § 6 LuftVG. In: Grabherr, Edwin ; Reidt, Olaf ; Wysk, Peter: Luftverkehrsgesetz. – Kommentar Loseblatt. – München, Beck 2015

Risch 2020, Jessica Risch, Flugtaxis – Fliegen in der Stadt?, Umwelt und Planungsrecht (UPR) Sonderheft 2020, 403

Schulte/Michalk 2019, Beck Online Kommentar (OK) Umweltrecht, 51. Edition 2019

Solmecke / Nowak 2014, Christian Solmecke, Fabian Nowak, Zivile Drohnen - Probleme ihrer Nutzung, Zeitschrift für IT-Recht und Digitalisierung (MMR) 2014, 431-435

Voland, Qui 2019, Voland, T., Qiu, S., Abgehobene Mobilität, Neu Zeitung für Verkehrsrecht 2019, Heft 6, 344

### **Entwicklung des Drohnenmarktes:**

#### Relevante Internetquellen (händische Suche)

Choi-Fitzpatrick et al 2016; Choi-Fitzpatrick, A., Chavarria D., Cychosz E., Dingens J.P., Duffey M., Koebel, K., Siriphanh S., Yurika Tulen M., Watanabe H., Juskauskas, J., Holland, J., Almquist, L., 2016. "Up in the Air: A Global Estimate of Non-Violent Drone Use: 2009-2015." In, 45. Internet: University of San Diego Digital@USanDiego.

Christen et al 2018. Christen M., Guillaume M., Jablonowski, P., Moll, K., 2018. "Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven." In Internet, 17.8.2020, 250. TA Swiss Stiftung für Technologiefolgen-Abschätzung. [https://vdf.ch/index.php?route=product/product/download&ea\\_id=9118&product\\_id=2085](https://vdf.ch/index.php?route=product/product/download&ea_id=9118&product_id=2085).

Corus U-Space. 2019a. "Corus - U-space Concept of operations (vol. 1 und 2)." In Internet 15.8.2020, edited by CORUS Consortium -Licensed to the SESAR Joint Undertaking under conditions. Internet: Corus: DFS, DLR, dgac, DSNA, Eurocontrol, HEMAV, enav, NATS, unifiy, universitat politcnica de Catalonia.

Dannenberger et al 2020. Dannenberger, N. (WiD), Schmid-Loertzer, V. (WiD), Fischer, L.(WiD), Schwarzbach, V. (WiD), Kellermann, R. (TU Berlin), Biehle, T. (TU Berlin). 2020. "Sky Limits - Verkehrslösung oder Technikhype? Ergebnisbericht zur Einstellung der Bürgerinnen und Bürger gegenüber dem Einsatz von Lieferdrohnen und

Flugtaxi im städtischen Luftraum in Deutschland." In Internet 15.8.2020, edited by The sky is the limit - Die zukünftige Nutzung des urbanen Luftraums [www.skylimits.info](http://www.skylimits.info), 74. Internet: Sky Limits.

Darryl, J.; Bijan, V., 2013. "THE ECONOMIC IMPACT OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS INTEGRATION IN THE UNITED STATES." In, 40. Internet: AUVSI (Association for unmanned vehicle systems international).

Droneii 2018a; "The European Drone Industry, Drone Industry Barometer 2018." Droneii.com

Droneii 2018b; "Drones in the Energy Industry, The Energy Drone Operator Benchmark 2018." Droneii.com

DTI 2019. Simonsen, R. V., Hartung, M.; Brejndal-Hansen, K., Sørensen, S., Sylvester-Hvid, K.O., Klein, D. (AUVSI). 2019. "Global Trends of Unmanned Aerial Systems (UAS)." In Internet 1.9.2020, 44. Internet: DTI (Danish Technological Institute); AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International).

FAA. 2016. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2016-2036." In Internet, 25.8.2020, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2016-36\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2016-36_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

FAA. 2017. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2017-2037." In Internet, 25.8.2020, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2017-37\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2017-37_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

FAA. 2018. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2018-2038." In Internet, 13.7.2020, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2018-38\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2018-38_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

FAA. 2019. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2019-2039." In Internet, 13.7.2020, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2019-39\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2019-39_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

FAA. 2020. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2020-2040." In Internet, 13.7.2020, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2020-40\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2020-40_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

FAA. 2021. "FAA Aerospace Forecast Fiscal years 2021-2041." In Internet, 20.8.2021, edited by FAA Federal Aviation Administration, [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/FY2021-41\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2021-41_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)

Kellermann et al 2019. Kellermann, R., Biehle, T., Fischer, L., 2019. "Drohnen als Transportmedium: Literaturanalyse zu Chancen und Risiken einer städtischen Luftraumerschließung." In Internet 26.8.2020, edited by Projekt: The Sky is the Limit – Die zukünftige Nutzung des urbanen Luftraums [www.skylimits.info](http://www.skylimits.info), 17. Internet: Sky Limits.

Mazur, M., Wiśniewsk, A. 2016. PwC Polska Sp. Z.o.o, McMillan, Jeffery ;PwC CEE. 2016. "Clarity from above, PwC global report on the commercial applications of drone technology." In Internet, 13.7.2020. PwC Polska Sp. Z.o.o,.

Mey, J.H., 2020. "How Will New EU Drone Regulations Impact Commercial Operations Across Europe?" In, edited by Jeremiah Karpowicz, 2. Internet: commercial UAV news.

Parrot. 2017. "Parrot, Reference document 2017." In Internet, 13.7.2020, edited by Chairman and CEO Parrot SA Henri Seydoux. Parrot S.A. 174-178, quai de Jemmapes 75010 Paris.

Sesar. 2016. "European Drones Outlook Study - Unlocking the value for Europe." In Internet 15.4.2020, edited by SESAR Joint Undertaking, 93. Internet: SESAR Joint Undertaking.

Sesar Solutions. 2019. "SESAR SOLUTIONS CATALOGUE 2019." In Internet 25.8.2020, edited by Sesar joint undertaking. Internet: Sesar joint undertaking.

VUL. 2019. "Analyse des deutschen Drohnenmarktes." In Internet, 13.7.2020, edited by BDL (Redaktionsleitung); von Ammon Rzegotta Ivo, Cornelia (BDLI); Verband unbemannte Luftfahrt, DRONEII.COM (Drone industry inside).

VUL. 2021. "Analyse des deutschen Drohnenmarktes." In Internet, 13.7.2020, edited by Michael Gravens, BDL (Redaktionsleitung); von Tamara Hartwich (BDL), Robert Friebe (BDLI); Verband unbemannte Luftfahrt, DRONEII.COM (Drone industry inside).

#### Literatur (Ergebnis Literaturrecherche)

Altawy, R., and A. M. Youssef. 2017. 'Security, privacy, and safety aspects of civilian drones: A survey', ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 1.

Aswini, N., E. Krishna Kumar, and S. V. Uma. 2018. 'UAV and obstacle sensing techniques – a perspective', International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 6: 32-46.

Atwater, D. M. 2015. 'The commercial global drone market: Emerging opportunities for social and environmental uses of UAVs', Graziadio Business Report, 18.

Aydin, Burchan. 2019. 'Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice', TECHNOLOGY IN SOCIETY, 59.

Babayomi, O. O., and A. U. Makarfi. 2019. "Energy Efficiency in Unmanned Aircraft Systems: A Review." In IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference: Power Economics and Energy Innovation in Africa, PowerAfrica 2019, 569-74.

Bartsch, R., J. Coyne, and K. Gray. 2016. Drones in society: Exploring the strange new world of unmanned aircraft.

Black, George Thomas, Kelly Cohen, and Catherine Ronflé-Nadaud. 2020. '1 - Integration in the National Airspace (Europe and USA) – UAV Classification and Associated Missions, Regulation and Safety, Certification and Air Traffic Management.' in Franck Cazaurang, Kelly Cohen and Manish Kumar (eds.), Multi-Rotor Platform-based UAV Systems (ISTE).

Boyle, M. J. 2015. 'The Race for Drones', Orbis, 59: 76-94.

Canetta, L., G. Mattei, and A. Guanziroli. 2018. "Exploring commercial UAV market evolution from customer requirements elicitation to collaborative supply network management." In 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017 - Proceedings, 1016-22.

Cohen, T., and P. Jones. 2020. 'Technological advances relevant to transport – understanding what drives them', Transportation Research Part A: Policy and Practice, 135: 80-95.

Culver, K. B. 2014. 'From Battlefield to Newsroom: Ethical Implications of Drone Technology in Journalism', Journal of Mass Media Ethics: Exploring Questions of Media Morality, 29: 52-64.

Dung, N. D., and J. Rohacs. 2018. "The drone-following models in smart cities." In 2018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTU CON 2018 - Proceedings.

Elias, B. 2014. 'Pilotless drones: Background and considerations for congress regarding unmanned aircraft operations in the national airspace system.' in, Domestic Drones: Elements and Considerations for the U.S.

Fombuena, A. 2017. 'Unmanned Aerial Vehicles and Spatial Thinking: Boarding Education with Geotechnology and Drones', IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING MAGAZINE, 5: 8-18.

Fotouhi, A., H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. G. Giordano, A. Garcia-Rodriguez, and J. Yuan. 2019. 'Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges', IEEE Communications Surveys and Tutorials, 21: 3417-42.

- Hall, A. R., and C. J. Coyne. 2014. 'The political economy of drones', *Defence and Peace Economics*, 25: 445-60.
- Hartley, Janet L., and William J. Sawaya. 2019. 'Tortoise, not the hare: Digital transformation of supply chain business processes', *Digital Transformation & Disruption*, 62: 707-15.
- Hassler, Samuel C., and Fulya Baysal-Gurel. 2019. 'Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture', *AGRONOMY-BASEL*, 9.
- Howard, J., V. Murashov, and C. M. Branche. 2018. 'Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety', *American Journal of Industrial Medicine*, 61: 3-10.
- Japertas, S. 2017. "Military unmanned air vehicles and their vulnerability." In *Transport Means - Proceedings of the International Conference*, 1054-61.
- Lan, Y. B., S. D. Chen, and B. K. Fritz. 2017. 'Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies', *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10: 1-17.
- Maclas, M., C. Barrado, E. Pastor, and P. Royo. 2019. "The Future of Drones and their Public Acceptance." In *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*.
- Martinez, O. A., and M. Cardona. 2018. "State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle." In *Proceedings of the 2018 3rd IEEE International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering, RICE 2018*.
- Masutti, A., and F. Tomasello. 2018. *International regulation of non-military drones*.
- Nonami, K. 2016. 'Drone technology, cutting-edge drone business, and future prospects', *Journal of Robotics and Mechatronics*, 28: 262-72.
- Roch, Jean-Louis. 2020. '2 - UAV Classification and Associated Mission Planning.' in Franck Cazaurang, Kelly Cohen and Manish Kumar (eds.), *Multi-Rotor Platform-based UAV Systems (ISTE)*.
- Tsouros, Dimosthenis C., Stamatia Bibi, and Panagiotis G. Sarigiannidis. 2019. 'A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture dagger', *INFORMATION*, 10.
- Wang, Bin, Dan Zhao, Weixuan Li, Zhiyu Wang, Yue Huang, Yancheng You, and Sid Becker. 2020. 'Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles', *Progress in Aerospace Sciences*, 116: 100620.
- Weissbach, D., and K. Tebbe. 2016. 'Drones in sight: rapid growth through M&A's in a soaring new industry', *Strategic Direction*, 32: 37-39.

### **Geräuschemissionen und psychoakustische Untersuchungen**

- Alexander, W.N.; Whelchel, J., 2019. Flyover noise of multi-rotor sUAS. in: Calvo-Manzano A., Delgado A., Perez-Lopez A., Santiago J.S., eds: *SOCIEDAD ESPANOLA DE ACUSTICA - Spanish Acoustical Society, SEA*.
- Alexander, W.N.; Whelchel, J.; Intaratep, N.; Trani, A., 2019. Predicting community noise of sUAS. Paper No. 2686. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2019: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.
- Aydin, B., 2019. Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice. *Technology in Society*, 59, doi: 10.1016/j.techsoc.2019.101180.
- Bajde, D.; Woermann, N.; Hojer Bruun, M.; Gahrn-Andersen, R.; Sommer, J.K.; Nøjgaard, M.; Christensen, S.H.; Kirschner, H.; Skaarup Jensen, R.H.; Bucher, J.H., 2017. Public reactions to drone use in residential and public areas. Odense, Aalborg, Denmark. Available on: [https://pure.au.dk/portal/files/142682693/Report\\_Public\\_reactions\\_to\\_drone\\_use\\_in\\_residential\\_and\\_public\\_areas\\_1.pdf](https://pure.au.dk/portal/files/142682693/Report_Public_reactions_to_drone_use_in_residential_and_public_areas_1.pdf) (last viewed on 27/11/2020).

- Bangjun, Z.; Lili, S.; Guoqing, D., 2003. The influence of the visibility of the source on the subjective annoyance due to its noise. *Appl. Acoust.*, 64, 1205-1215. doi: 10.1016/s0003-682x(03)00074-4.
- Begault, D.R., 2020. Psychoacoustic Measures for UAM Noise in the Context of Ambient Sound. Webinar, 2020-06-11.
- Besnea, I., 2020. Acoustic Imaging and Spectral Analysis for Assessing UAV Noise. Available on:
- Bolin, K.; Nilsson, M.E.; Khan, S., 2010. The potential of natural sounds to mask wind turbine noise. *Acta Acust. united Ac.*, 96, 131-137. doi: 10.3813/aaa.918264.
- Brink, M.; Schäffer, B.; Vienneau, D.; Foraster, M.; Pieren, R.; Eze, I.C.; Cajochen, C.; Probst-Hensch, N.; Rössli, M.; Wunderli, J.M., 2019. A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: differences between continuous and intermittent noise. *Environ. Int.*, 125, 277-290. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.043.
- Burgess, M., 2020. Drone delivery and noise regulation in the Australian context. Quiet Drones. International e-Symposium on UAV/UAS Noise
- Cabell, R.; Grosveld, F.; McSwain, R., 2016. Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 252, 345-354.
- Callanan, J.; Ghassemi, P.; DiMartino, J.; Dhameliya, M.; Stocking, C.; Nouh, M.; Chowdhury, S., 2020. Ergonomic Impact of Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle Noise in Warehouse Environments. *J. Intell. Robot. Syst.*, doi: 10.1007/s10846-020-01238-5.
- Cheng, G.; Herrin, D., 2018. Noise Level Prediction of a Small UAV Using Panel Contribution Analysis. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 258, 6084-6090.
- Christen, M.; Guillaume, M.; Jablonowski, M.; Lenhart, P.; Moll, K., 2018. Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven. Zürich, Schweiz: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Christian, A.; Cabell, R., 2017. Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.
- Clothier, R.A.; Greer, D.A.; Greer, D.G.; Mehta, A.M., 2015. Risk Perception and the Public Acceptance of Drones. *Risk Anal.*, 35, 1167-1183. doi: 10.1111/risa.12330.
- Cohen, B.H., 2013. Explaining psychological statistics. 4th. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc.
- Di, G.Q.; Chen, X.W.; Song, K.; Zhou, B.; Pei, C.M., 2016. Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises. *Appl. Acoust.*, 105, 164-170. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.12.006.
- Eißfeldt, H., 2020. Acceptance of drone delivery is limited (not only) by noise concerns. Quiet Drones. International e-Symposium on UAV/UAS Noise. Paris, France
- Eißfeldt, H.; Vogelpohl, V., 2019. Drone Acceptance and Noise Concerns-Some Findings. 53rd International Symposium on Aviation Psychology
- Eißfeldt, H.; Vogelpohl, V.; Stolz, M.; Papenfuß, A.; Biella, M.; Belz, J.; Kügler, D., 2020. The acceptance of civil drones in Germany. *CEAS Aeronautical Journal*, (first online), 12 pp. doi: 10.1007/s13272-020-00447-w.
- Fastl, H.; Zwicker, E., 2007. Psychoacoustics: facts and models. 3rd. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Fattah, R.; Zhang, X.; Huang, X., 2019. Noise assessment of mulit-rotor flying vehicles. Canadian Acoustical Association.

- Feight, J.A.; Whyte, S.; Jacob, J.D.; Gaeta, R.J., 2017. Acoustic characterization of a multi-rotor UAs as a first step towards noise reduction. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting
- Field-Fote, E., 2019. Mediators and moderators, confounders and covariates: exploring the variables that illuminate or obscure the "active ingredients" in neurorehabilitation. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 43, 83-84. doi: 10.1097/npt.0000000000000275.
- Guski, R.; Bosshardt, H.-G., 1992. Gibt es eine "unbeeinflusste" Lästigkeit? *Z. Lärmbekämpf.*, 39, 67-74.
- Gwak, D.Y.; Han, D.; Lee, S., 2020. Sound quality factors influencing annoyance from hovering UAV. Article No. 115651. *J. Sound Vib.*, 489, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115651.
- Hegewald, J.; Schubert, M.; Freiberg, A.; Romero Starke, K.; Augustin, F.; G., R.-H.S.; Zeeb, H.; Seidler, A., 2020. Traffic noise and mental health: a systematic review and meta-analysis. Paper No. 6175. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 26 pp. doi: 10.3390/ijerph17176175.
- Herreman, K., 2016. Proposed Measurement Method for UAV Sound Levels. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 252, 615-622.
- Heutschi, K.; Ott, B.; Nussbaumer, T.; Wellig, P., 2020. Synthesis of real world drone signals based on lab recordings. *Acta Acust*, 4, doi: 10.1051/aacus/2020023.
- Huber, S.; Wellig, P.; Heutschi, K., 2019. Determination of the detection-threshold of human observers in acoustic drone detection. in: Stein K.U., Schleijsen R. Target and Background Signatures V. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Humphreys, W.M., Jr.; Lockard, D.P.; Khorrami, M.R.; Culliton, W.G.; McSwain, R.G.; Ravetta, P.A.; Johns, Z., 2016. Development and calibration of a field-deployable microphone phased array for propulsion and airframe noise flyover measurements. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.
- Intaratep, N.; Nathan Alexander, W.; Deveport, W.J.; Grace, S.M.; Dropkin, A., 2016. Experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.
- ISO, 2017. ISO 1996-2. Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization (ISO).
- ITF, 2021. Ready for Take Off? Integrating Drones into the Transport System, ITF Research Reports. Paris, F. Available on: <https://www.itf-oecd.org/integrating-drones-transport-system> (last viewed on 03/18/2021).
- Klauser, F.; Pedrozo, S., 2017. Big data from the sky: popular perceptions of private drones in Switzerland. *Geographica Helvetica*, 72, 231.
- Kloet, N.; Watkins, S.; Clothier, R., 2017a. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems. *Int J Micro Air Veh*, 9, 3-14. doi: 10.1177/1756829316681868.
- Kloet, N.; Watkins, S.; Wang, X.; Prudden, S.; Clothier, R.; Palmer, J.L., 2017b. Drone on: A preliminary investigation of the acoustic impact of unmanned aircraft systems (UAS). in: Gibbs B., ed. 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017: International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV.
- Klug, J.; Hollosi, D.; Volgenandt, A.; Rollwage, C.; Bitzer, J., 2016. Analyse akustischer Emissionen und Profile ziviler Drohnen. DAGA 2016 Poster
- Merkert, R.; Bushell, J., 2020. Managing the drone revolution: a systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. *J. Air Transp. Manag.*, 89, 10. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101929.

- Miedema, H.M.E.; Oudshoorn, C.G.M., 2001. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ. Health Persp.*, 109, 409-416. doi: 10.1289/ehp.01109409.
- Mobley, F., 2018. Aeroacoustic emissions from quadcopter Unmanned Aircraft Systems as quadrupoles. Institute of Noise Control Engineering.
- Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D.G.; The PRISMA Group, 2009. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Plos Medicine*, 6, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- Moher, D.; Shamseer, L.; Clarke, M.; Ghersi, D.; Liberati, A.; Petticrew, M.; Shekelle, P.; Stewart, L.A.; Grp, P.-P., 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4, doi: 10.1186/2046-4053-4-1.
- More, S.R., 2011. Aircraft Noise Characteristics and Metrics. West Lafayette, Indiana: Purdue University. Available on: <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj24/noisethesis.pdf> (last viewed on 28/11/2020).
- NASA, 2020. Urban Air Mobility Noise: Current Practice, Gaps, and Recommendations. NASA/TP–2020-5007433. Hampton, Virginia 23681-2199. Available on: [https://www.researchgate.net/publication/344493775\\_Urban\\_Air\\_Mobility\\_Noise\\_Current\\_Practice\\_Gaps\\_and\\_Recommendations](https://www.researchgate.net/publication/344493775_Urban_Air_Mobility_Noise_Current_Practice_Gaps_and_Recommendations).
- Nordtest, 2002. Acoustics: human sound perception – guidelines for listening tests. Nordtest method, NT ACOU 111, approved 2002-05. Espoo, Finland. Available on: <http://www.nordtest.info/index.php/methods/item/acoustics-human-sound-perception-guidelines-for-listening-tests-nt-acou-111.html> (last viewed on 12/12/2018).
- Ouzzani, M.; Hammady, H.; Fedorowicz, Z.; Elmagarmid, A., 2016. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5, doi: 10.1186/s13643-016-0384-4.
- Papa, U.; Core, G.D.; Giordano, G., 2016. Determination of Sound Power Levels of a Small UAS during Flight Operations. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 253, 692-702.
- Pedersen, E.; Larsman, P., 2008. The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *J. Environ. Psychol.*, 28, 379-389. doi: 10.1016/j.jenvp.2008.02.009.
- Putzu, R.; Boulandet, R.; Rutschmann, B.; Bujard, T.; Noca, F.; Catry, G.; Bosson, N., 2020. Aeroacoustic measurements on a free-flying drone in a WindShaper wind tunnel. Quiet Drones Conference. Paris
- Read, D.R.; Senzig, D.A.; Cutler, C.; Elmore, E.; He, H., 2020. Noise Measurement Report: Unconventional Aircraft - Choctaw Nation of Oklahoma; July 2019. Available on:
- Rizzi, S.A., 2016. Toward reduced aircraft community noise impact via a perception-influenced design approach. Paper No. 33. in: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), ed. Proceedings of the Inter-Noise 2016, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Towards a Quieter Future. Hamburg, Germany: on the ISBN USB Stick/Online 978-3-939296-11-9.
- Rizzi, S.A.; Palumbo, D.L.; Rathsam, J.; Christian, A.; Rafaelof, M., 2017. Annoyance to noise produced by a distributed electric propulsion high-lift system. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017
- Schäffer, B.; Pieren, R.; Wissen Hayek, U.; Biver, N.; Grêt-Regamey, A., 2019. Influence of visibility of wind farms on noise annoyance – a laboratory experiment with audio-visual simulations. *Landsc. Urban Plan.*, 186, 67–78. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.01.014.
- Schäffer, B.; Schlittmeier, S.J.; Pieren, R.; Heutschi, K.; Brink, M.; Graf, R.; Hellbrück, J., 2016. Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: a laboratory study. *J. Acoust. Soc. Am.*, 139, 2949–2963. doi: 10.1121/1.4949566.

Seidler, A.; Weihofen, V.M.; Wagner, M.; Swart, E.; Hegewald, J.; Euler, U.; Schmitt, J.; Zeeb, H., 2013. Systematic review: environmental aircraft noise and non-auditory health complaints and diseases. PROSPERO 2013 CRD42013006004.

Senzig, D.A.; Marsan, M., 2018. UAS noise certification. Paper No. 1855. Proceedings of the Inter-Noise 2018, 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Chicago, IL: available from Institute of Noise Control Engineering, Indianapolis, IN 46268.

Senzig, D.A.; Marsan, M.; Cutler, C.J.; Read, D.R., 2018. Sound exposure level duration adjustments in UAS rotorcraft noise certification tests. Available on:

Sky Limits, 2021. Lieferdrohnen und Flugtaxi in der Stadt? Zwölf wissenschaftsbasierte Handlungsempfehlungen für den Verkehr der Zukunft im unteren Luftraum. Available on: <https://skylimits.info/>

Tinney, C.E.; Sirohi, J., 2018. Multirotor Drone Noise at Static Thrust. *Aiaa J*, 56, 2816-2826. doi: 10.2514/1.J056827.

Torija, A.J.; Li, Z., 2020. Metrics for assessing the perception of drone noise. Paper No. 18. Proceedings of the Forum Acusticum 2020. Lyon, France: Société Française d'Acoustique and European Acoustics Association.

Torija, A.J.; Li, Z.; Self, R.H., 2020. Effects of a hovering unmanned aerial vehicle on urban soundscapes perception. Article No. 102195. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 78, doi: 10.1016/j.trd.2019.11.024.

Torija, A.J.; Roberts, S.; Woodward, R.; Flindell, I.H.; McKenzie, A.R.; Self, R.H., 2019a. On the assessment of subjective response to tonal content of contemporary aircraft noise. *Applied Acoustics*, 146, 190-203. doi: 10.1016/j.apacoust.2018.11.015.

Torija, A.J.; Self, R.H.; Lawrence, J.L.T., 2019b. Psychoacoustic characterisation of a small fixed-pitch quadcopter. in: Calvo-Manzano A., Delgado A., Perez-Lopez A., Santiago J.S., eds. 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2019 MADRID: SOCIEDAD ESPANOLA DE ACUSTICA - Spanish Acoustical Society, SEA.

Treichel, J.; Körper, S., 2019. Investigation of the noise emission of drones. *Lärmbekämpfung*, 14, 108-114.

Vascik, P.D.; Hansman, R.J., 2017. Evaluation of key operational constraints affecting on demand mobility for aviation in the Los Angeles basin: Ground infrastructure, air traffic control and noise. Paper No. 3084. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2017: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.

Weihofen, V.M.; Hegewald, J.; Euler, U.; Schlattmann, P.; Zeeb, H.; Seidler, A., 2019. Aircraft Noise and the Risk of Stroke A Systematic Review and Meta-analysis. *Dtsch. Arztebl. Int.*, 116, 237-+. doi: 10.3238/arztebl.2019.0237.

WHO, 2011. Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. Copenhagen, Denmark. Available on: <http://www.euro.who.int/en/publications> (last viewed 03/02/2020).

Wilkins, A., 2017. Drone buzz is the most annoying sound. *New Sci.*, 235, 7-7. doi: Doi 10.1016/S0262-4079(17)31397-0.

Zawodny, N.; Pettingill, N., 2018. Acoustic Wind Tunnel Measurements of a Quadcopter in Hover and Forward Flight Conditions. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 258, 487-500.

Zawodny, N.S.; Christian, A.; Cabell, R., 2018. A summary of NASA research exploring the acoustics of small unmanned aerial systems. AHS International Technical Meeting on Aeromechanics Design for Transformative Vertical Flight 2018: American Helicopter Society International.

Zhang, Y.; Lee, I.; Lin, D., 2017. Measurement of Noise from a Moving Drone Using a Phased Array Microphone System.

Zhou, T.; Jiang, H.; Sun, Y.; Fattah, R.J.; Zhang, X.; Huang, B.; Cheng, L., 2019. Acoustic characteristics of a quadcopter under realistic flight conditions. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.