HINTERGRUND // SEPTEMBER 2021

Lärmauswirkungen des Einsatzes von Drohnen auf die Umwelt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.4
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt
/umweltbundesamt
/umweltbundesamt

Autoren:

Stefan Becker, Dominic Gutsche
BeSB GmbH, Berlin

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

Christian Eckart
Redeker, Sellner, Dahs

Redaktion:
Fachgebiet I 2.4 Lärmminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen, Julia Treichel

Satz und Layout:
Susanne Scheding, grafik@susannescheding.de

Publikationen als pdf:
www.umweltbundesamt.de/publikationen

Fotoquellen:
(Titel): www.unsplash.de, (S. 4): Fa. Matternet,
(S. 5): www.unsplash.de, (S. 5): Fa. Wingcopter,
Bearbeitung Scheding, (S. 8): www.pexels.com

Stand: September 2021

ISSN 2363-829X

HINTERGRUND // SEPTEMBER 2021

Lärmauswirkungen des Einsatzes von Drohnen auf die Umwelt

1. Anlass und Einleitung

Unbemannte Fluggeräte, sog. „Drohnen“, werden immer leistungsfähiger. Die zudem stetig zunehmende Zahl dieser Fluggeräte wirft 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 zusammengetragen und Vorschläge für die Weiterentwicklung erarbeitet werden:

- Entwicklung des Drohnenmarktes
- Geräuschmessungen von Drohnen
- Lärmwirkung von Drohnen
- Geltende rechtliche Regelungen
- Auswirkungen auf Menschen und Natur

Der Begriff „Drohne“

Vorliegend sollen unter dem Begriff „Drohne“ unbemannte Luftfahrzeugsysteme im Sinne von § 1 des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG)[1] und Abschnitt 5a der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)[2] verstanden werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden ausschließlich zivile unbemannte Luftfahrzeuge betrachtet.

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

Drohne zum Transport von Laborproben über Berlin

1 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
2 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

2. Einteilung von Drohnen

Einteilung von Drohnen

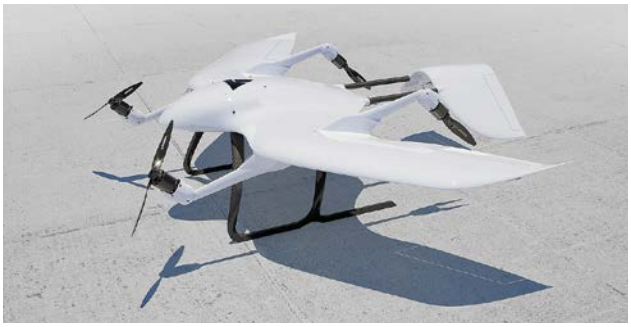
Die Entwicklung unbemannter, ziviler Luftfahrzeuge in den letzten Jahren ist vor allem auf die Bauform Multicopter zurückzuführen. Sie ist auch die derzeit am häufigsten verwendete Bauform ziviler Drohnen. Multicopter weisen VTOL[3]-Eigenschaften auf, d.h. sie sind in der Lage, senkrecht zu starten und zu landen. Darüber hinaus können sie fix an einem Punkt in der Luft verharren.

Multicopter sind mit mehreren (i.d.R. mindestens vier) horizontal ausgerichteten Propellern ausgestattet, die für die einzelnen Betriebszustände mit verschiedenen Drehrichtungen und mit i.d.R. unterschiedlicher Drehzahl angesteuert werden.

Drohne der Bauform Multicopter

Daneben existieren speziell für den Streckenflug flugzeugähnliche Drohnen mit Flügeln (Starrflügler). In der Vergangenheit benötigten Drohnen mit Flügeln immer spezielle Start- und Landeplätze. Auch konnten sie nicht fix in der Luft verharren. Ihr Vorteil besteht darin, dass sie für die Fortbewegung weniger Energie benötigen, da der Auftrieb im Streckenflug durch die Flügel erzeugt wird.

In jüngster Zeit wurden auf dem Markt für zivile Drohnen Geräte mit Flügeln vorgestellt, die auch senkrecht starten und landen können. Hierzu werden entweder die Flügel mit einer Kippvorrichtung versehen (Tilt Wings) oder schwenkbare oder verschieden ausgerichtete Propeller montiert (Tilt Rotor) verwendet.



Drohne mit schwenkbaren Propellern

Die amerikanische Luftaufsichtsbehörde FAA (Federal Aviation Adminstration) unterscheidet in ihren Jahresberichten[4] die Menge aller unbemannter Luftfahrzeuge grob in zwei Kategorien:

- sUAS: small Unmanned Aircraft System (maximale Abflugmasse ≤ 25 kg)
- lUAS: large Unmanned Aircraft System (maximale Abflugmasse > 25 kg)

Derzeit fallen die allermeisten zivilen Drohnen in die kleinere Kategorie. Für den Einsatz in der Europäischen Union (EU) sowie in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) existieren für die kleinere Kategorie spezielle Vorgaben, die von den Luftfahrzeugen erfüllt werden müssen. Hierzu zählen für den Bereich der EU unter anderem Vorgaben zur maximal zulässigen Geräuschentwicklung.[5]

In die große Kategorie fallen derzeit vor allem militärische Luftfahrzeuge sowie die sich derzeit in Entwicklung befindlichen unbemannten Luftfahrzeuge für den Personentransport. Einheitliche Vorgaben, die von den zivilen Luftfahrzeugen dieser Kategorie erfüllt werden müssen, existieren bislang nur in Ansätzen.

3 VTOL: vertical take-off and landing
4 z.B. FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2021–2041
5 Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme (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)

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Vorbemerkung

Die Entwicklung von Drohnen im zivilen Bereich wurde bislang vor allem von Geräten vorangetrieben, die der kleineren Kategorie (sUAS) angehören und hierbei insbesondere von Geräten mit einer maximalen Startmasse bis ca. 5 kg. Aus diesem Grunde sind in der Literatur Untersuchungsergebnisse vor allem für kleinere Drohnen vorhanden. Literaturangaben zu zivilen Drohnen mit einer Startmasse von mehr als 25 kg waren demgegenüber nicht zu finden. Aus diesem Grunde beschränken sich die nachstehenden Ausführungen auf die Klasse der kleineren Drohnen (sUAS) mit einem Schwerpunkt auf zivilen Drohnen mit einer maximalen Startmasse von bis zu 5 kg. Dabei dominiert die Bauform Multicopter.

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:

Tab. 01

Quantitatives Ergebnis der Literaturrecherche, Anzahl „Treffer“ bei der Datenbanksuche und Anzahl relevanter Artikel oder Berichte je Arbeitspaket

Arbeitspaket	Anzahl „Treffer“ (ohne Duplikate)	Anzahl relevanter Artikel oder Berichte (incl. Ergebnis händischer Suchergebnisse)
Drohnenmarkt	1084	35
Geräuschmessungen	4987	24
Psychoakustik	838	8

Zurückzuführen ist die geringe Quote an relevanten Artikeln oder Berichten zum Drohnenmarkt 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.

Die Bewertung der durch den Drohnenbetrieb erzeugten Geräusche wird wesentlich durch den rechtlichen Rahmen beeinflusst. Da sich zudem in der Literatur kaum valide und übertragbare Untersuchungen zu den Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft fanden, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes eigene Untersuchungen durchgeführt.

3.2 Entwicklung des Drohnenmarktes

Die Auswertungen zeigen, dass die Schätzung der zukünftigen Anzahl an eingesetzten Drohnen mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Wesentlicher Aspekt ist, dass in Europa eine valide Datenbasis zum Bestand fehlt, auf der sich eine Schätzung aufbauen ließe. Eine Registrierung von Nutzern von Drohnen in Europa (und damit auch in Deutschland) ist erst seit Inkrafttreten der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947[6] am 1.1.2021 vorgesehen. Eine vergleichbare Registrierung ist in den USA bereits seit 2015 vorgeschrieben. Die aus den Jahresberichten der US-amerikanischen Luftaufsichtsbehörde FAA entnehmbaren Schätzungen deuten allerdings darauf hin, dass nicht sofort mit Einführung einer Registrierung eine geeignete Basis zur Erstellung einer validen Schätzung besteht. Vielmehr braucht es einige Zeit des Vorlaufs, bis valide Schätzungen erstellt werden können. Schätzungen, die vor oder kurz nach Einführung der Registrierung der Drohnen erstellt wurden, haben den Drohnenmarkt für zivile Drohnen viel zu optimistisch eingeschätzt.

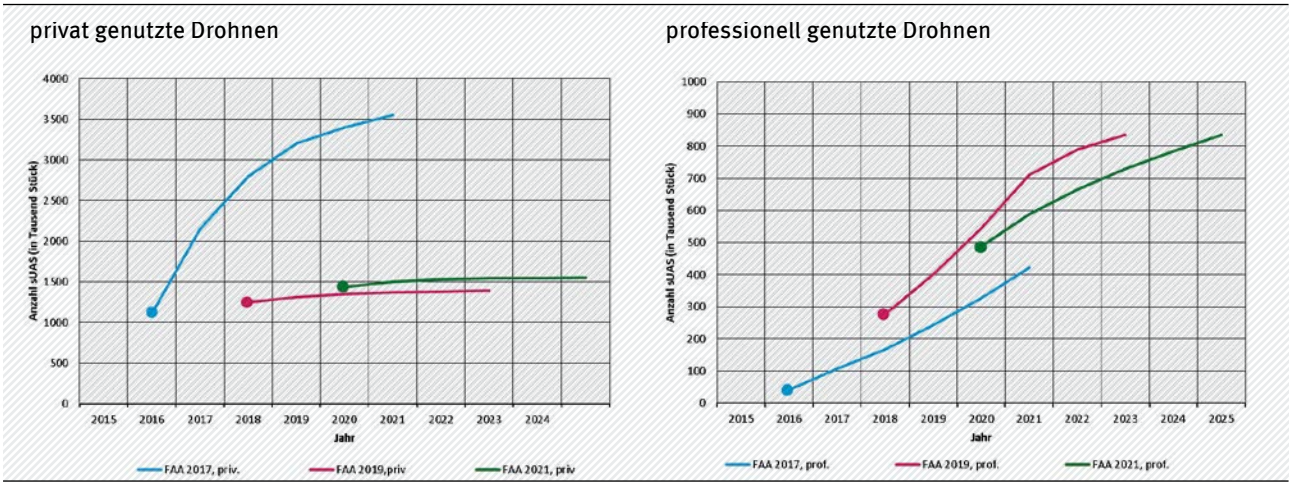
Auf einer vergleichbaren Datenbasis aufbauende Angaben für den deutschen Markt gibt es aus den o.g. Gründen nicht. Eine Schätzung des Hamburger Marktforschungsunternehmen DRONEII.COM Drone Industry Insight im Auftrag des deutschen Verbandes unbemannte Luftfahrt kam in der im Februar 2019 vorgelegten „Analyse des deutschen Drohnenmarktes“[7] zu dem Ergebnis, dass der deutsche Drohnenmarkt im privaten Bereich ca. 40 – 45 % des US-amerikanischen Marktes entspricht. Der Umfang des professionellen Marktes wird mit ca. 10 % des US-amerikanischen Marktes angegeben.

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.[8]

Abbildung 1

Entwicklung des Drohnenmarktes in den USA gem. Jahresberichte FAA

Mittelwerte der Schätzungen für kleine Drohnen (sUAS),



• Bestand im jeweiligen Jahr — Prognose für Folgejahre

Quelle: Jahresberichte FAA 2017, 2019 und 2021, jeweils für mittlere Entwicklung (Base)[8]

6 Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (ABl. L152/45 vom 11.6.2019, S.45)

7 Droneii.com Drone Industriy inside, Analyse des deutschen Drohnenmarktes, Hrg. Verband unbemannte Luftfahrt, Februar 2019; https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/wp-content/uploads/2019/02/190212_VUL-Marktstudie_Analyse-des-deutschen-Drohnenmarktes.pdf

8 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)

Eine ganz wesentliche rechtliche Hürde, die allerdings für alle Arten von zivilen Drohnen gilt, besteht darin, dass ein Betrieb von Drohnen außerhalb des Sichtbereichs der die Drohne kontrollierenden Person (sogenannter BVLOS-Betrieb[9]) 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:

- A. Inspektion von technischen Anlagen und landwirtschaftlichen Flächen
    1. Linienförmige Anlagen (Strom-, Gasleitungen)
    2. Flächenhafte Anlagen (ganze Werksgelände)
    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

Drohne über landwirtschaftlicher Fläche

9 BVLOS: Beyond visual line of sight

3.3 Geräuschemissionen von Drohnen

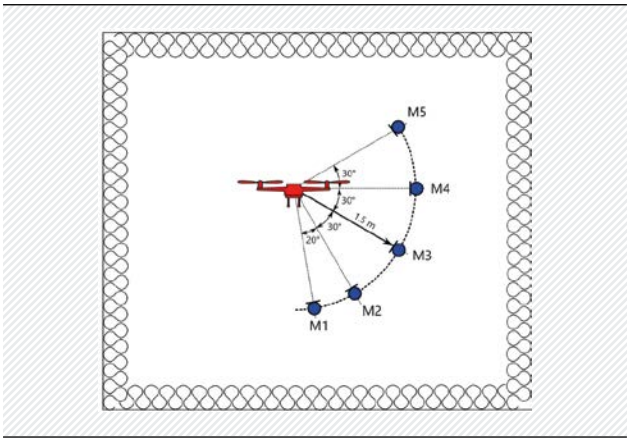
In allen, als relevant eingestuften Untersuchungen, wurden Drohnen der Bauform Multicopter betrachtet. Insofern beziehen sich alle Angaben zu Geräuschemissionen von Drohnen ausschließlich auf diese Bauform.

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

Nachstehend beispielhaft ein Labormessaufbau zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit der Geräuschabstrahlung (Richtcharakteristik). Die sehr unterschiedliche Vorgehensweise bei der Ermittlung der Geräuschemissionen erschwert naturgemäß den Vergleich der in den einzelnen Untersuchungen dargestellten Ergebnisse.

Abbildung 2

Beispielhafter Messaufbau im Labor (reflexionsarmer Raum) zur Ermittlung der Richtcharakteristik



Quelle: Heutschi et al, Audio signals of flying drones synthesized from laboratory recordings, QUIET DRONES International Symposium on UAV/UAS Noise Paris – 25th to 27th May 2020

Hinzu kommt, dass die Messungen nicht immer so genau beschrieben wurden, dass eine zuverlässige Umrechnung auf einheitliche Geräuschparameter möglich wäre. Es konnten daher nicht alle prinzipiell relevanten Artikel für die Auswertung herangezogen werden.

Für die Analyse wurden daher nur Studien herangezogen, die

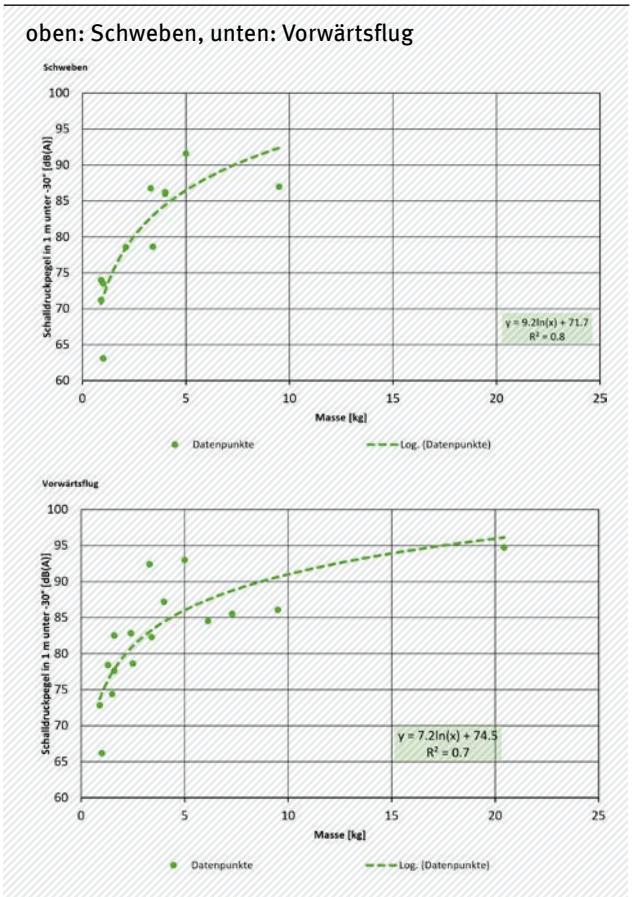
- das untersuchte Drohnenmodell mindestens durch Angabe der Masse genügend gut beschreiben,
- als Betriebszustand der Drohne „Schweben“ und/oder „Vorwärtsflug“ untersuchten und
- die Geometrie der Drohnen- und Mikrofonposition ausreichend genau beschreiben.

Aus den insgesamt zehn 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 (Abbildung 3).

Abbildung 3

Geräuschemissionen von Drohnen der Bauform „Multicopter“

A-bewerteter Schalldruckpegel in 1 m Abstand für einen Abstrahlwinkel von -30° in Abhängigkeit vom Gewicht



Quelle: Empa

In Bezug auf den Summenschalldruckpegel lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

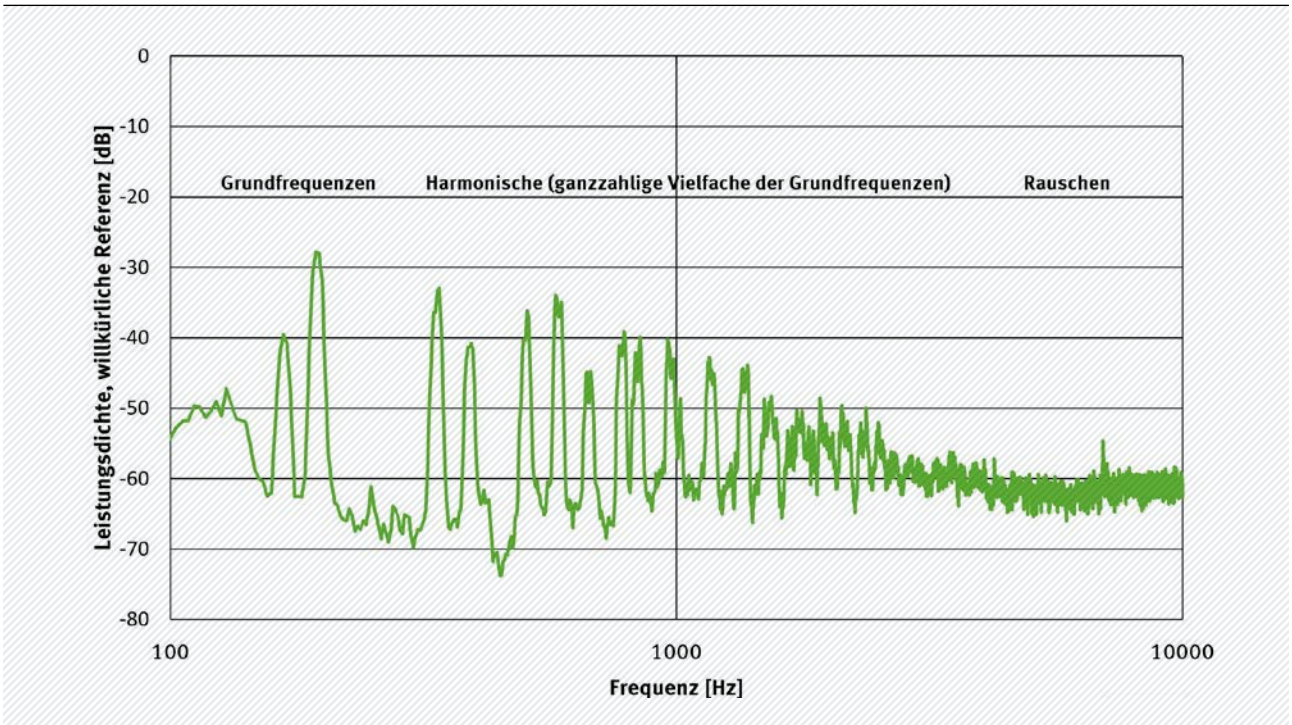
- Die Geräuschemissionen nehmen mit dem Gewicht der Drohne zu.
- Bei Multicoptern ist in der Vertikalen von einer bedeutenden Winkelabhängigkeit der abgestrahlten Geräuschemissionen auszugehen. In der Horizontalen ist aus Symmetriegründen von einer gleichmäßigen Abstrahlung auszugehen.
- Typischerweise sind die Geräuschemissionen bei Drohnen < 4 kg im Betriebszustand „Vorwärtsflug“ ca. 1-2 dB höher, als im Betriebszustand „Schweben“. Für größere Drohne liegen keine ausreichenden Daten vor, um eine diesbezügliche Abschätzung vornehmen zu können.
- Es wurde ein Zusammenhang zwischen Geräuschentwicklung und Rotordrehzahl beobachtet. Damit wäre es prinzipiell möglich, ein drehzahlabhängiges Emissionsmodell zu entwickeln.

Die Auswertung der Angaben zur Frequenzzusammensetzung der Geräusche (Abbildung 4)zeigt ein relativ einheitliches Bild:

- Die Geräusche weisen eine ausgeprägte Tonhaltigkeit im tief- und mittelfrequenten Bereich auf.
- Die Grundfrequenz ist an die Rotordrehzahl gekoppelt.
- Im hochfrequenten Bereich zeigt sich ein breitbandiges Rauschen, dessen Leistungsdichte mit der Frequenz leicht abnimmt

Abbildung 4

Beispielhaftes Schmalbandspektrum eines Multicopters während des Schwebens



Quelle: Empa

Zukünftige Vermessungen der Geräuschemissionen sollten die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- Die Abstrahlcharakteristik ist am zuverlässigsten für eine positionsfeste oder sich nur langsam bewegende Drohne bestimmbar.
- Die Rückrechnung eines Mikrofonsignals zurück zur Quelle (Invertierung) muss bei freier Ausbreitung die Phänomene:
  - geometrische Verdünnung
  - Luftdämpfung
  - Bodeneffekt

  berücksichtigen.
- Um die Vergleichbarkeit künftiger Studien untereinander zu begünstigen, wäre die Festlegung eines Minimal-Sets an akustischen Messgrößen sowie derer exakten Bestimmung anzustreben. Abhängig vom Flugmanöver bieten sich dazu für Überflüge Maximal- oder Ereignispegel, für den Schwebezustand energieäquivalente Mittelungspegel (L_{eq}) an.
- Es 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 Mikrofonsignale müsste mindestens mit Terzbandauflösung geschehen. Für die Bestimmung der Tonalität und weiterer Parameter sollten zudem die Audiosignale erfasst werden.

3.4 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 des Betriebs einer einzelnen Drohnenbetriebs mit Hilfe einer akustischen oder visuell-akustischer Darbietungen Simulation 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. Quadkopter) bei gradlinigem Überflug oder im Schweben untersucht. Hinsichtlich der Auswertung lag ein deutlicher Fokus auf der Wirkungsdimension (akute) Lärmlästigkeit (unter Laborbedingungen). Daneben wurden vereinzelt auch die weitere subjektiv empfundenen Aspekte Wirkungen wie Lautheitsempfinden, 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 Straßenverkehrslärm. Der quellenspezifische 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 Korrek-

turterme noch nicht zuverlässig quantifizieren. Aus den vorliegenden Studien lässt sich zwar eine psychoakustische Pegeldifferenz von rund 5 dB herauslesen, d.h. bei gleichem A-Schalldruckpegel scheinen Drohnen ca. 5 dB lästiger zu sein. 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 ebenfalls zu verstärken.

Da die bislang vorliegenden Ergebnisse ausschließlich aus Laborstudien entstammen, mit einer (für Laborstudien üblichen) begrenzten Anzahl (25–50) von Versuchspersonen, kann derzeit nicht genau gesagt werden, inwieweit die Ergebnisse auf die Langzeit-Lärmbelästigung im Feld und auf die Gesamtbevölkerung übertragbar sind (ökologische Validität). Auch stellt sich die Frage, inwieweit sich die Resultate zum Flugzustand „Schweben“ auf andere Flugzustände (insb. Über- und Vorbeiflüge) übertragen lassen.

Zur Akzeptanz von Drohnen in der Öffentlichkeit ist bereits eine Reihe von Studien verfügbar. Ein abschließender Überblick kann hier jedoch nicht gegeben werden.

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[10].

Bezüglich der 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.

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

Der Kontext, d.h. der Sach- und Situationszusammenhang wie z.B. der Einsatzbereich der Drohnen, dürfte wegen dessen Einfluss auf die Akzeptanz ein wichtiger Moderator für das Lästigkeitsempfinden sein.

Keine der vorliegenden Studien untersucht den Einfluss der Sichtbarkeit von Drohnen auf das Lästigkeitsempfinden. Erwartbar wäre eine erhöhte Lästigkeit bei Sichtbarkeit der das Lärmereignis auslösenden Drohne. Darüber hinaus könnten Bedenken entstehen bezüglich der Sicherheit und Privatsphäre.

10 Aydin, 2019; Clothier et al., 2015; Eißfeldt et al., 2020

3.5 Rechtlicher Rahmen

Der rechtliche Rahmen wird zum einen durch Vorgaben der EU und zum anderen durch nationale Regelungen bestimmt. Vorgaben bezüglich der Zulassung der Geräte und grundsätzliche Vorgaben zur Luftraumnutzung werden ausschließlich durch die EU geregelt. In Bezug auf den Themenkomplex „Lärm“ ist insbesondere die Delegierte Verordnung 2019/945 zu nennen, in deren Anhang in Teil 15 Anforderungen an höchstzulässige Schallleistungspegel für Drohnen mit einem Startmasse von 0,25 bis 4 kg definiert sind, die keine Starrflügler sind, d.h. feststehende Flügel aufweisen.

Drohnen mit einer Startmasse von 4 bis 25 kg müssen zwar den Schalleistungspegel angeben, doch wurde kein Grenzwert festgelegt.

Eine Regelung zur Sammlung der für die einzelnen Drohnen ermittelten Schallleistungspegel, wie in Artikel 16 der EU-Richtlinie 2000/14[11] für viele sonstige Geräte und Maschinen vorgesehen, die im Freien benutzt werden, ist nicht vorgesehen.

Nach überschlägiger Betrachtung dürfte der Nachweis der Einhaltung der aktuellen Anforderungen i.d.R. möglich sein, während der Nachweis der Anforderungen, die vier Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung gelten, eher schwierig sein dürfte.

In jedem Falle ist die Regelung jedoch noch nicht abschließend, da die Anforderungen für viele Drohnen nicht gelten (s.o.) und die Anforderungen nur für den Betriebszustand „schweben“ gelten. Für den insbesondere bei Starrflüglern wichtigen Streckenflug gibt es keine Anforderungen.

Gestaltungsspielräume der Mitgliedstaaten bestehen nach den Vorgaben der EU-Verordnungen insbesondere bei der Bestimmung der örtlichen Bereiche, in denen Drohnen genutzt werden dürfen. 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, in dem ein Betrieb mit Drohnen möglich, eingeschränkt oder ausgeschlossen ist, um den mit dem Drohnen-Betrieb verbundenen Risiken für die Sicherheit, den Schutz der Privatsphäre und personenbezogener Daten, die Sicherheitslage oder die Umwelt Rechnung zu tragen[12].

Den Mitgliedstaaten ist es somit gebietsbezogen gestattet, Regelungen für Drohnen-Flüge für ein bestimmtes von ihnen ausgewiesenes Gebiet zu erlassen und hierfür (auch umweltbezogene) Auflagen festzu-

Tab. 02

Delegierte VO 2019/945: Maximale Schallleistungspegel je UA-Klasse (einschließlich Übergangszeiträumen)

UA-Klasse	MTOM in Gramm	Maximaler Schallleistungspegel L_{WA} in dB		
		ab Inkrafttreten	ab 2 Jahre nach Inkrafttreten	ab 4 Jahre nach Inkrafttreten
C1	250 ≤ m < 900	85	83	81
C2	900 ≤ m < 4000	$85 + 18{,}5 \lg\frac{m}{900}$	$83 + 18{,}5 \lg\frac{m}{900}$	$81 + 18{,}5 \lg\frac{m}{900}$

dabei ist „lg“ die Basis 10 des Logarithmus.

11 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 (ABl. L 344 vom 27.12.2005), berichtigt durch ABl. L 311 vom 12.12.2000 und ABL. L 165 vom 17.6.2006

12 S. die Definition in Art. 2 Ziff. 4 der DurchführungsVO 2019/947.

legen, UAS-Flüge auszuschließen oder einzuschränken oder auf bestimmte Klassen zu beschränken.[13]

Mit der Novellierung der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) vom Juni 2021[14] erfolgte bereits eine Anpassung an die EU-Vorgaben. Insbesondere aber wurde die bestehende Verbots-Ausnahme-Systematik überarbeitet und an die Möglichkeit, geographische UAS-Gebiete für den Betrieb von Drohnen auszuweisen, angepasst. Von besonderer Bedeutung ist dabei der neu eingeführte § 21h Abs. 1 LuftVO.

Eingeschränkt ist der Betrieb demzufolge 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.

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) besonders geschützten Gebieten und über Wohngrundstücken besonders berücksichtigt.

Für den Betrieb über Wohngrundstücken 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)[15] 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 berücksichtigen. So lange alle Drohnenflüge durch den gleichen Betreiber erfolgen, wäre dies wohl machbar. Finden jedoch Drohnenflüge verschiedener Betreiber statt, so wäre eine auch lärmtechnische Koordination notwendig.

Dass die 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[16]. Die zuständige Luftfahrtbehörde des Landes kann daher auch vor Erteilung der Ausnahmegenehmigung eine fachspezifische Bewertung oder ein Gutachten (insbesondere zum Natur- und Lärmschutz) einfordern[17].

So wie die Entwicklung der Drohnen noch lange nicht abgeschlossen ist, bedarf auch der Rechtsrahmen der Fortentwicklung, Anpassung und Erprobung, um angemessene Vorgaben für den Betrieb von Drohnen zu schaffen.

13 Vgl. insoweit auch European Aviation Safety Agency, Opinion No 01/2018, S. 1, abrufbar unter https://www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-012018 (zuletzt abgerufen am 14.04.2021). Zum Begriff „geografisches UAS-Gebiet“ siehe Art. 2 Nr. 4 DurchführungsVO 2019/947.
14 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
15 TA Lärm:Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 28. 08.1998, zuletzt geändert am 1. 6.2017 (BAnz AT 8.6.2017 B5)
16 § 21i Abs. 1 Nr. 2 LuftVO.
17 § 21i Abs. 2 Nr. 3 LuftVO.

3.6 Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

In Bezug auf die Geräuschwirkungen von Drohnen gibt es in der Literatur bislang ausschließlich Laboruntersuchungen. Hinzu kommt, dass eine Bewertung der Geräusche, die an einem Punkt in der Nachbarschaft verursacht werden, wesentlich durch die rechtlichen Vorgaben beeinflusst wird. Um dennoch zu Aussagen zu den Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu kommen, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes eigene Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde im ersten Schritt nach einer geeignete Berechnungsmethodik gesucht, mit der die durch den Drohnenbetrieb in der Nachbarschaft erzeugten Geräuschimmissionen realitätsnah berechnet werden können. Im zweiten Schritt wurden exemplarisch Berechnungen für einige vorstellbare Anwendungsfälle durchgeführt.

3.6.1 Berechnungsmethodik

Eine speziell auf den Betrieb von Drohnen angepasste Berechnungsmethodik gibt es derzeit nicht. Im Rahmen des Projekts wurde daher 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, „Akustik — Ermittlung von Fluggeräuschimmissionen an Landeplätzen — Teil 1: Berechnungsverfahren“, Ausgabe 7-2013
Diese Norm enthält eine speziell auf den (derzeitigen) Flugbetrieb an Landeplätzen angepasste Berechnungsmethode.

DIN ISO 9613-2, „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren“, Ausgabe 10-1999
Diese Norm 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 oder der anderen Berechnungsmethode entgegenstehen. So lassen sich in DIN 45684-1 keine Reflexionen und keine vertikalen Richtcharakteristiken berücksichtigen, 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. Zudem ist das Berechnungsverfahren so schnell, dass auch größere Umgriffe in angemessener Zeit berechnet werden können. Die größte Limitation der DIN ISO 9613-2 ergibt sich aus der benötigten Rechenzeit, so 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 werden könnte. 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 bzw. eines Flugbetriebs vorzunehmen. Zur Optimierung der Rechenzeit erscheint die Definition eines Verfahrens mit unterschiedlichen Genauigkeitsklassen sinnvoll.

3.6.2 Ergebnisse

Wie in Zusammenhang mit den rechtlichen Rahmenbedingungen 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 einhaltbar ist, wurden für die folgenden denkbaren Anwendungsfälle Musterberechnungen durchgeführt.

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

Unterstellt man die Anforderungen 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. Davon ist bis auf Weiteres nicht auszugehen, so dass ein Streckenflug in einer Höhe von 100 m eher als unkritisch anzusehen ist. (Zur Nachtzeit ist ein Betrieb von Drohnen über Wohngrundstücken gem. LuftVO nicht zulässig. Insofern erübrigen sich Aussagen zur Nachtzeit).

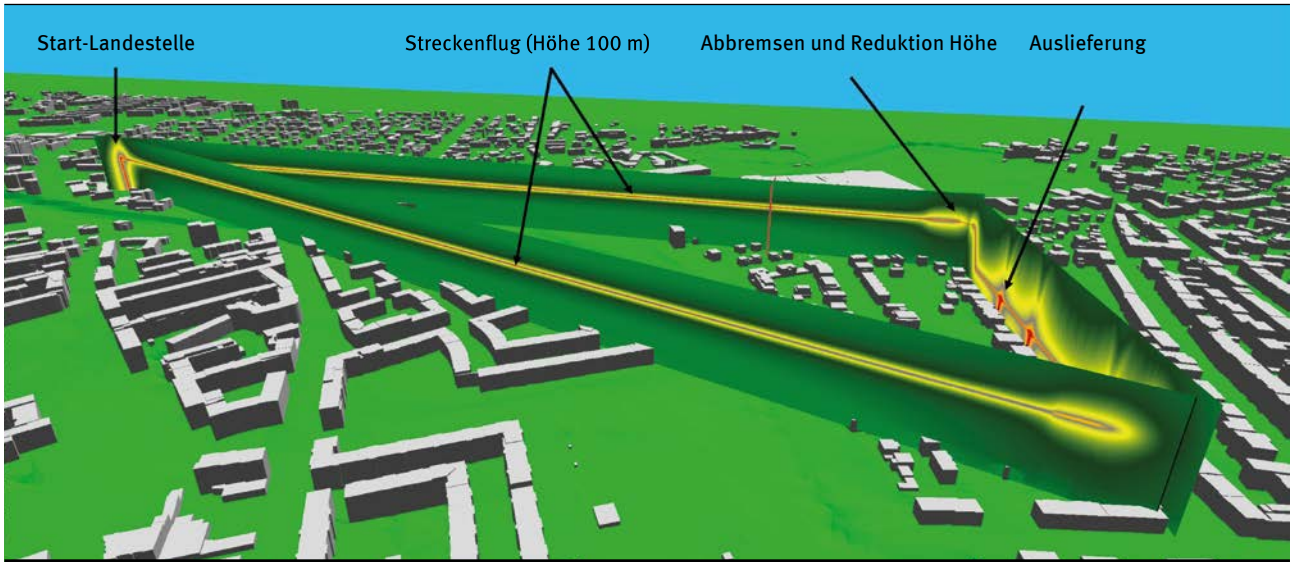
Auch die Geoerkundung einer Fläche dürfte, sofern ein gewisser Mindestabstand zur Wohnbebauung eingehalten wird und die Erkundung nur während eines kleineren Teils der Tageszeit stattfindet, in Bezug auf die Einhaltung der Immissionsrichtwerte tendenziell eher unkritisch sein.

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 Warenauslieferungen ab. Aufgrund der starken Tonhaltigkeit ist hierbei ein Tonzuschlag von 6 dB zu berücksichtigen. Erhöhte Geräuschimmissionen ergeben sich dabei vor allem im Nahbereich des Auslieferungsortes infolge des geringen Abstands und der längeren Verweildauer (siehe auch Abbildung 5 und 6).

Bei Lichtshows werden viele (> 500) sehr kleine (< 0,5 kg) Drohnen eingesetzt, die jeweils eine oder mehrere farbige LEDs tragen. Für die Show werden die Drohnen innerhalb eines sog. Animation grids gitterförmig angeordnet.

Abbildung 5

Akustische Simulation eines Drohnenfluges zur Auslieferung von Gegenständen und qualitative Darstellung der Geräuschimmissionen in Ampelfarben



Quelle: Berechnungsprogramm Cadna/A, BeSB

Für die Musterberechnungen wurde eine Veranstaltung mit 1024 Drohnen unterstellt, die jeweils eine Startmasse von 0,35 kg aufweisen und im Betrieb einen Schallleistungspegel von 91 dB(A) erzeugen.

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 durch 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.

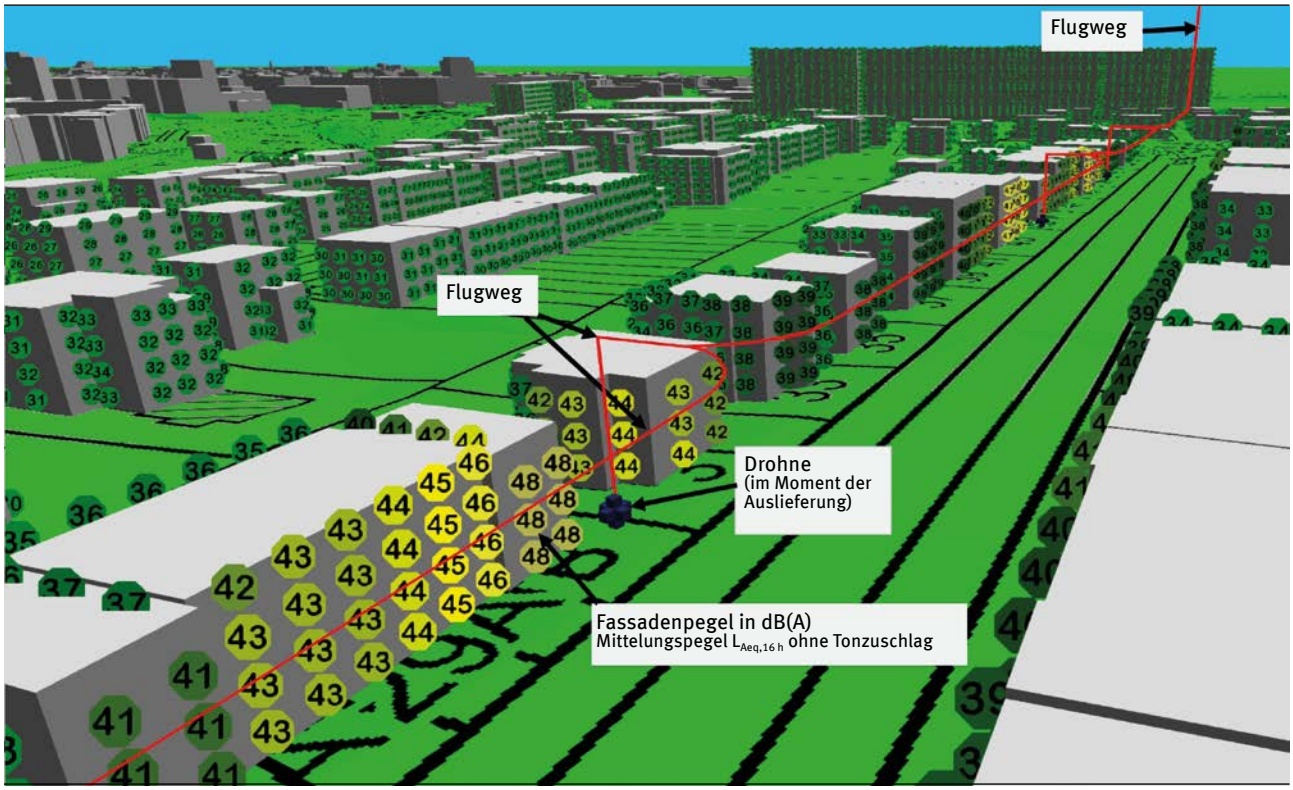
Über Naturschutzgebieten im Sinne des § 23 Absatz 1 des Bundesnaturschutzgesetzes[18] und vergleichbaren Gebieten ist gem. LuftVO eine Mindestüberflughöhe von 100 m einzuhalten. Es ist nicht zu erwarten, dass die Geräusche eines vereinzelten Betriebs in dieser Höhe zu einer wesentlichen Störung der dort lebenden Population (insbs. 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.

Grundsätzlich muss einschränkend 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 sehr eingeschränkt möglich sind. Insofern verstehen sich die vorstehenden Aussagen lediglich als erste grobe Einschätzung der Situation.

Abbildung 6

Fassadenlärmpegel infolge Auslieferung durch 1 Drohne / Tag

(16 Stunden Mittelungspegel $L_{Aeq,16h}$ in dB(A) ohne Tonzuschlag) infolge der Auslieferung von 1 Drohne pro Tag



Quelle: Berechnungsprogramm Cadna/A, BeSB

18 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

4. Fazit

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 Umfange 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 gebietsbezogen erste Vorgaben über sensible Bereiche gemacht, in denen Drohnen nur unter einschränkenden Bedingungen operieren dürfen. Ein Regelbetrieb von Drohnen mit niedrigeren Überflügen von Wohngrundstücken ist im Lichte dieser Vorgaben nur schwer 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.

Hinsichtlich der Geräuschentwicklung 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 mit einbezieht, um genauere Geräuschimmissionsprognosen, wie sie für die übrigen Verkehre 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 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. 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 (5 bis 6 dB) kommen auch die zu diesem Thema ausgewerteten Literaturstellen.[19]

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 weniger tonhaltigen Geräten und die Möglichkeit, diesen Aspekt bei der Auswahl eines Gerätes zu berücksichtigen.

19 Christian and Cabell (2017); 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.
Torija et al. (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.

▸ **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

www.facebook.com/umweltbundesamt.de
www.twitter.com/umweltbundesamt
www.youtube.com/user/umweltbundesamt
www.instagram.com/umweltbundesamt/