

Drohnenlärm während des Fluges

Zur Messung der Schallabstrahlung von Multicoptern im Betrieb

Gert Herold, Julian Benz

<https://doi.org/10.71568/aj2026.01.03>

Multicopter-Drohnen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig rückt ihre akustische Wirkung auf Mensch und Umwelt stärker in den Fokus. Obwohl durch Drohnen abgestrahlter Schall als relevant anerkannt ist, bestehen weiterhin erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlich durch sie verursachten Lärmbelastung, insbesondere unter realistischen Betriebsbedingungen. Drohnen verursachen Geräusche, deren Wahrnehmung nicht allein vom Pegel, sondern maßgeblich von Flugzustand, Richtwirkung und zeitlicher Dynamik abhängt, deren Zusammenwirken jedoch bislang nur unzureichend verstanden ist. Vor diesem Hintergrund haben das Fachgebiet Technische Akustik der Technischen Universität Berlin und der Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Sommer 2025 eine gemeinsame Messkampagne durchgeführt, bei der Multicopter in verschiedenen Konfigurationen und bei unterschiedlichen Flugzuständen akustisch vermessen wurden. Im Folgenden wird ein Einblick in den Messaufbau und erste Ergebnisse gegeben.

Drohnen machen Lärm

Unbemannte Luftfahrzeuge, häufig als Drohnen bezeichnet, gewinnen seit einigen Jahren stark an Bedeutung. Sie finden zunehmend Anwendung in sehr unterschiedlichen Bereichen, etwa in der Inspektion von Infrastruktur, in der Vermessung, in der Landwirtschaft, in der Medienproduktion sowie perspektivisch auch in logistischen und urbanen Einsatzszenarien. Prognosen sagen für den globalen Drohnenmarkt bis zum Jahr 2030 ein anhaltendes Wachstum von 7,8 % voraus [1]. Mit der steigenden Verbreitung von Drohnen rücken neben funktionalen und wirtschaftlichen Aspekten jedoch auch akustische Fragestellungen immer mehr in den Fokus. Multirotor-Drohnen sind trotz technischer Fortschritte in der Antriebsauslegung und Regelung keineswegs geräuscharm. Gerade bei Einsätzen in geringer Flughöhe und in unmittelbarer Nähe zum Menschen können die entstehenden Geräusche als störend wahrgenommen werden. Diese Wahrnehmung hängt dabei nicht allein vom Gesamtschallpegel ab, sondern wird wesentlich durch spektrale Anteile, zeitliche Modulationen und die Richtwirkung

In-Flight Drone Noise – On Measuring the Sound Radiation of Multicopters in Operation

Multicopter drones continue to gain significance. At the same time, their acoustic impact on humans and the environment is receiving greater attention. Although sound emitted by drones is recognized as relevant, there are still considerable uncertainties regarding the actual noise pollution they cause, especially under realistic operating conditions. Drones generate noise whose perception depends not only on the level, but also significantly on the flight condition, directivity, and temporal dynamics, the interaction of which is still poorly understood. Against this background, the Department of Engineering Acoustics at the Technische Universität Berlin and the Institute of Fluid Mechanics at the Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nuremberg conducted a joint measurement campaign in the summer of 2025, in which multicopters were acoustically measured in various configurations and under different flight conditions. The following provides an insight into the measurement setup and first results.

der Schallabstrahlung beeinflusst. Für eine fundierte Bewertung der Geräuschenstehung ist es daher notwendig, die akustischen Eigenschaften von Drohnen systematisch zu untersuchen und in einen realistischen Nutzungskontext einzuordnen.

Ein Großteil der bisherigen Untersuchungen zur Drohnenakustik stützt sich auf Messungen im stationären Schwebezustand. Dieser Flugzustand ist messtechnisch gut beherrschbar und ist daher gemäß den europäischen Zulassungs- und Bewertungsverfahren für die Bestimmung von Emissionsgrößen wie der Schallleistung von Drohnen vorgesehen [2].

Gleichzeitig bildet der Schwebezustand reale Einsatzszenarien nur eingeschränkt ab. In der Praxis bewegen sich Drohnen überwiegend im Horizontalflug oder in Steig- und Sinkmanövern, bei denen sich die aerodynamischen Bedingungen der Rotoren und damit die Schallerzeugung deutlich verändern. Für solche bewegten Flugzustände existieren inzwischen ebenfalls Messvorschriften und Leitfäden, etwa die ISO 5305 [3] sowie entsprechende Empfehlungen der Europäischen Union [4]. Diese zielen jedoch primär auf den Vergleich von Immissionsgrößen ab

und erlauben bislang keine direkt vergleichbare Bewertung der Emissionen.

Hier setzen die vorgestellten Messungen und Auswertungen an. Ziel ist es, Drohnenlärm nicht nur zu messen, sondern zu verstehen, wie und wohin er im realen Flugbetrieb abgestrahlt wird.

Outdoor-Messung von Drohnenlärm

Um die akustische Datenbasis zu Drohnen zu erweitern und eine Grundlage für neue Auswerteverfahren zu schaffen, wurde im Juli 2025 eine umfangreiche Messkampagne durchgeführt. Die Messungen erfolgten in Kooperation zwischen dem Fachgebiet Technische Akustik der Technischen Universität Berlin (TUB, TA) und dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU, LSTM). Ziel war es, die Schallabstrahlung verschiedener Drohnen in unterschiedlichen Flugmanövern unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu erfassen. Als Messort wurde ein großer Modellflugplatz in der Umgebung von Lauf bei Nürnberg gewählt. Der Standort zeichnet sich durch eine insgesamt ruhige akustische Umgebung aus und bietet damit günstige Voraussetzungen für Außenmessungen.

TUB-TA-Mikrofonarray

Zentrales Element der Messkampagne war ein umfangreicher Mehrkanal-Messaufbau (siehe Abb. 1), der am Fachgebiet Technische Akustik der TU Berlin konzipiert und realisiert wurde. Während Einzelmikrofonmessungen lediglich punktuelle Informationen liefern, ermöglichen Arraymessungen eine synchrone Abtastung des Schallfelds an verschiedenen Orten. Dieser Aspekt ist besonders bei Schallquellen mit ausgeprägter Richtcharakteristik, wie beispielsweise Drohnen, von großer Bedeutung.

In der Messkampagne wurde ein Array mit insgesamt 64 ¼-Zoll ICP-Messmikrofonen eingesetzt. Hiervon wurden 42 in einem Bodenarray mit einem Außendurchmesser von 35 m angeordnet. Jedes Mikrofon wurde hierfür auf eine Bodenplatte mit einem Durchmesser von 40 cm montiert. Ergänzend dazu kamen zwei vertikale Mastarrays mit jeweils elf Mikrofonen zum Einsatz, die an Masten mit einer Höhe von 26 m installiert waren. Die Schalldrucksignale aller Kanäle wurden mit einem zentralen Datenerfassungssystem mit 102,4 kHz synchron abgetastet und aufgezeichnet.

Das Mess- und Auswertesystem erlaubt nicht nur die Aufzeichnung von Signalen aus unterschiedlichen Richtungen für eine Vielzahl von Flugmanövern, sondern auch die Ortung der Drohne im Flug auf Basis der aufgenommenen Signale.



Abb. 1: Der Messaufbau

FAU-LSTM-Quadrocopter

Die hier betrachtete Flugdrohne (siehe Abb. 2 auf der folgenden Seite) ist ein Quadrocopter, der als modulare Forschungsplattform für aeroakustische Messungen mit dem Fokus auf Robustheit, Präzision und Steifigkeit entwickelt wurde. Der Aufbau erfolgte am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der FAU. Die verwendete Plattform ist modular ausgelegt und basiert auf praktischen Flugerfahrungen aus vorangegangenen Projekten [5, 6]. Alle relevanten Flugparameter sind frei einstellbar, sodass definierte autonome Flugmanöver mit hoher Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden können.

Für die Messkampagne wurde ein eigenes Programm zur Flugpfadplanung entwickelt, das eine präzise Planung und Ausführung der Flugbahnen ermöglicht. Dabei werden nicht nur die eigentlichen Messabschnitte, sondern auch Wendemanöver und Übergangsphasen berücksichtigt, um vergleichbare Randbedingungen für wiederholte Überflüge sicherzustellen.

Neben der Erfassung der Flugbahn mithilfe eines RTK-GPS-Systems wurden sämtliche relevanten Antriebsdaten mithilfe eines integrierten Onboard-Computers kontinuierlich im Betrieb erfasst. Dazu zählen insbesondere Strom, Spannung und Temperatur der Antriebseinheiten. Diese Daten liefern wichtige Zusatzinformationen zum jeweiligen Betriebszustand der Drohne und ermöglichen den Abgleich der akustischen Messungen mit den erfassten Leistungsparametern der jeweiligen Flugmanöver.

Der Quadrocopter wurde mit eigens hergestellten Carbonpropellern betrieben. Diese wurden in Negativformen laminiert, deren aerodynamische Auslegung vollständig intern durchgeführt wurde, sodass deren Geometrie vollständig bekannt ist. In Kombination mit den erzeugten Messdaten ist dies einzigartig und ermöglicht Strömungs- und Akustiksimulationen auf Basis der Daten, die anschließend validiert werden können.

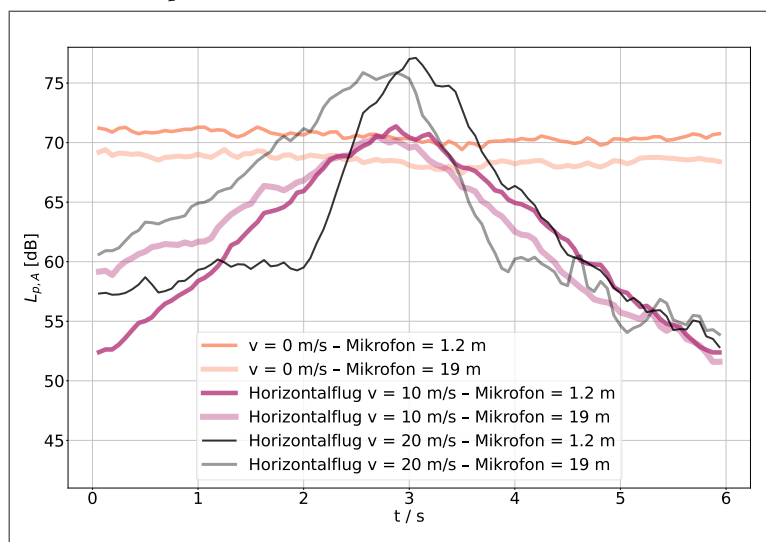


Abb. 2: Die untersuchte Forschungsdrohne (techn. Kennzahlen siehe Tab. 1)

Tab. 1: Technische Kennzahlen der untersuchten Flugdrohne

Kenngröße	Wert
Anzahl der Rotoren	4
Maximales Abfluggewicht	5 kg
Maximale Nutzlast	bis ca. 2 kg
Propellerdurchmesser	15 Zoll
Maximale Flugzeit	45 min
Maximale Fluggeschwindigkeit	35 m/s
Typische Messgeschwindigkeit	10–20 m/s
Maximale Steiggeschwindigkeit	10 m/s
Maximale Sinkgeschwindigkeit	5 m/s

Abb. 3: Schalldruckpegel über der Zeit von verschiedenen Fluggeschwindigkeiten und Messpositionen



Was vom Drohnenlärm ankommt

Der Schwerpunkt der hier vorgestellten Analyse liegt exemplarisch auf dem Horizontalflug, da dieser Flugzustand für viele praktische Anwendungen besonders relevant ist und gleichzeitig eine gute Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messdurchläufen ermöglicht. Die Untersuchungen wurden für eine konstante Flughöhe von 10 m mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Für alle ausgewerteten Messungen wurde ein stationärer Flugzustand sichergestellt, das heißt, die Drohne bewegte sich mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Nickwinkel entlang der vorgegebenen Flugbahn. Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen sowie Lageänderungen der Drohne wurden für die Auswertung ausgeschlossen. Im Folgenden werden zwei horizontale Fluggeschwindigkeiten von 10 m/s und 20 m/s ausgewertet. Weitere Flugmanöver, wie Steig- und Sinkflug oder kombinierte Flugzustände, wurden im Rahmen der Messkampagne ebenfalls durchgeführt, werden jedoch im Rahmen dieses Artikels nicht weiter betrachtet.

Zeitabhängiger Schalldruckpegel im Vorbeiflug

Es werden zunächst zwei exemplarische Mikrofonpositionen betrachtet. Das erste Mikrofon befindet sich in einer Höhe von 1,20 m über dem Boden und repräsentiert damit näherungsweise die Hörposition einer sitzenden Person. Das zweite Mikrofon ist in einer Höhe von 19 m installiert und dient zur Bewertung der Schallabstrahlung in höheren Beobachtungspositionen, wie sie beispielsweise in mehrgeschossiger Bebauung auftreten können.

Die beiden Mikrofonpositionen wurden so gewählt, dass sie während des Horizontalflugs jeweils in etwa den gleichen minimalen Abstand zur Drohne aufweisen. Unterschiede im Pegel ergeben sich daher durch die Abstrahlcharakteristik der Quelle sowie durch den Einfluss von Bodenreflexionen. Im betrachteten Messaufbau entsprechen die beiden Mikrofone im Moment des Vorbeiflugs seitlichen Abstrahlrichtungen von näherungsweise 45° nach unten bzw. oben relativ zur Flugbahn.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch den zeitabhängigen A-bewerteten Schalldruckpegel $L_{p,A}(t)$ für horizontale Vorbeiflüge mit zwei unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten und dem Schwebeflug mit 0 m/s. Der zeitliche Verlauf des Schalldruckpegels wird im Wesentlichen durch die Bewegung der Drohne relativ zum Mikrofon bestimmt: Mit zunehmender Annäherung steigt der Pegel an, erreicht beim minimalen Abstand ein Maximum und nimmt anschließend wieder ab. Ausschlaggebend hierfür ist die kontinuierliche Änderung des Abstands zwischen Schallquelle und Empfänger, sodass das Abstandsgesetz

den Pegelverlauf dominiert.

Neben der Fluggeschwindigkeit zeigt sich bereits bei dieser einfachen Betrachtung ein deutlicher Einfluss der Mikrofonposition. Unterschiedliche Mikrofonhöhen führen trotz identischem Flugmanöver zu signifikanten Unterschieden im gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegel $L_{p,A}$. Die Asymmetrie der zeitlichen Pegelverläufe deutet zudem auf eine richtungsabhängige Schallabstrahlung hin. Damit wird deutlich, dass die Bewertung des Drohnengeräusches selbst bei gleichem Flugzustand stark von der Beobachterposition abhängt. Eine Charakterisierung allein auf Basis einer einzelnen Mikrofonposition ist daher nur eingeschränkt aussagekräftig.

Zeit-Frequenz-Analyse

Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein Spektrogramm des Schalldruckpegels $L_p(f,t)$ für einen horizontalen Vorbeiflug mit einer Fluggeschwindigkeit von 20 m/s, gemessen mit dem Mikrofon auf 1,2 m Höhe. Die Darstellung macht deutlich, dass das Schallfeld durch dominante tonale Anteile geprägt ist. Insbesondere sind klare Linien bei der Blattfolgefrequenz sowie deren ganzzahligen Vielfachen zu erkennen. Diese Komponenten stellen neben der breitbandigen Schallabstrahlung einen wesentlichen Beitrag zur wahrgenommenen Geräuschcharakteristik dar. Zusätzlich wird im Spektrogramm der Doppler-Effekt sichtbar. Während der Annäherungsphase der Drohne an das Mikrofon verschieben sich die tonalen Anteile zu höheren Frequenzen, während nach dem Passieren der Mikrofonposition eine Absenkung der Frequenzen beobachtet wird.

Darüber hinaus sind im Spektrogramm weitere Effekte erkennbar, wie beispielsweise Interferenzeffekte aus Bodenreflexionen sowie höherfrequente Modulationen, die den Antriebseinheiten zugeordnet werden können. Im Vergleich mit dem Spektrogramm des höher positionierten Mikrofons (siehe Abb. 5) wird deutlich, dass dort die Bodenreflexionen eine untergeordnete Rolle spielen. Diese zeitlich und frequenzabhängigen Strukturen lassen sich aus einer reinen Betrachtung des Gesamtschalldruckpegels nicht erfassen, sind jedoch für die akustische Charakterisierung von zentraler Bedeutung.

Einfluss der Fluggeschwindigkeit auf akustische und psychoakustische Kenngrößen

Vor dem Hintergrund der beobachteten zeitlichen Dynamik und den charakteristischen spektralen Strukturen stellt sich die Frage, wie diese in der menschlichen Wahrnehmung abgebildet werden und in welchem Maß die Fluggeschwindigkeit einen Einfluss auf die akustische Wahrnehmung hat.

Tabelle 2 (siehe folgende Seite) fasst relevante akusti-

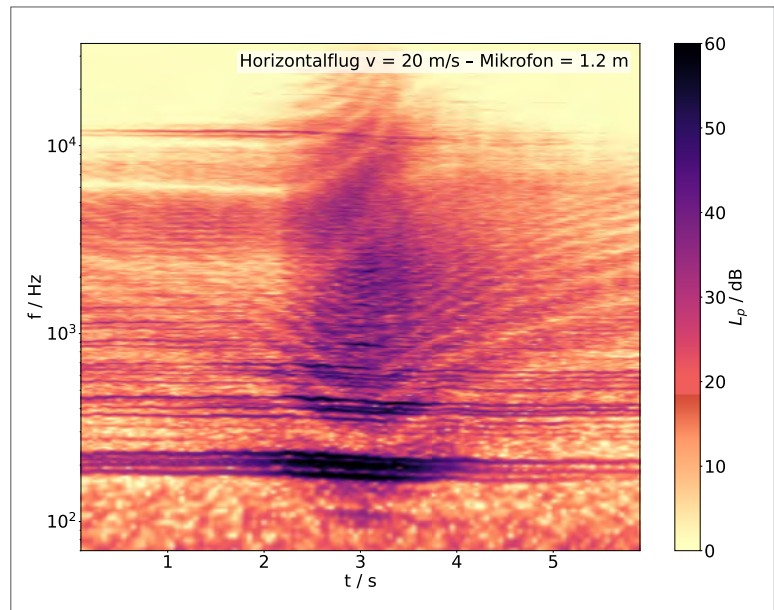


Abb. 4: Spektrogramm eines Vorbeiflugs, Mikrofon auf $h = 1,20$ m und $\Delta f = 5$ Hz

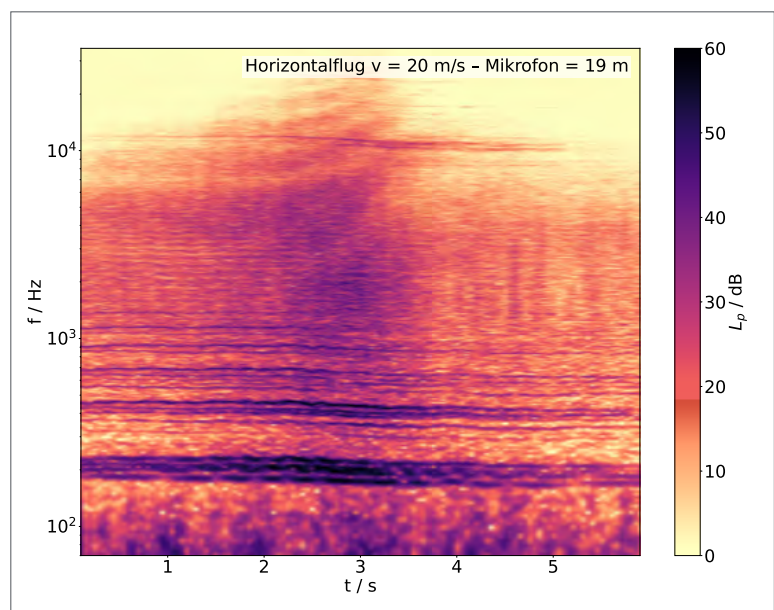


Abb. 5: Spektrogramm eines Vorbeiflugs, Mikrofon auf $h = 19$ m und $\Delta f = 5$ Hz

sche und psychoakustische Kenngrößen für den Horizontalflug bei einer Mikrofonhöhe von 1,20 m zusammen. Die Auswertung erfolgt zeitnormiert über einen Zeitraum von sechs Sekunden, der den vollständigen Vorbeiflug der Drohne abbildet. Dadurch wird eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den betrachteten Fluggeschwindigkeiten gewährleistet. Betrachtet man zunächst die klassischen akustischen Kenngrößen, so zeigt sich bei einer Verdopplung der Fluggeschwindigkeit von 10 m/s auf 20 m/s eine Erhöhung des A-bewerteten äquivalenten Schalldruckpegels L_{Aeq} um etwa 2,8 dB. Ein ähnlicher Anstieg ist beim A-bewerteten Schallereignispegel SEL(A)

Tab. 2: Akustische und psychoakustische Kenngrößen für den Horizontalflug bei einer Mikrofonhöhe von $h = 1,20\text{ m}$

Kenngröße	0 m/s	10 m/s	20 m/s
Schalldruckpegel L_{Aeq} in dB	70,5	65,3	68,4
Schallereignispegel SEL(A) in dB re $(20\text{ }\mu\text{Pa})^2\text{ s}$	78,2	73,1	76,2
Maximalpegel L_{AFmax} in dB	71,4	71,1	77,1
Tonhaltigkeit T Mittelwert in tuHMS	0,43	0,24	0,24
Lautheit N Mittelwert in sone	25,7	17,4	18,5
Lautheit N Maximum in sone	29,1	31,1	44,9
Rauheit R Mittelwert in asper	0,21	0,11	0,17
Rauheit R Maximum in asper	0,39	0,26	0,31
Schärfe S Mittelwert in acum	1,74	1,85	1,87
Schärfe S Maximum in acum	2,01	2,57	2,68

zu beobachten, der um rund 3,1 dB zunimmt. Der maximale A-bewertete Pegel L_{AFmax} steigt zwischen 10 m/s und 20 m/s mit etwa 6,1 dB noch deutlicher an. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine höhere Fluggeschwindigkeit mit einer Erhöhung sowohl gemittelter als auch maximaler Pegel einhergeht, die Größenordnung dieser Änderungen jedoch unterschiedlich ist.

Im Vergleich dazu weist der Schwebzustand bei 0 m/s einen höheren mittleren Schalldruckpegel L_{Aeq} auf als der Horizontalflug mit 10 m/s, während die maximalen Pegel geringer ausfallen als beim schnellen Vorbeiflug mit 20 m/s. Der Schwebefall ist somit durch eine eher gleichmäßige, über die Zeit anhaltende Geräuschemission gekennzeichnet, während sich im Vorbeiflug insbesondere kurzzeitige Pegelspitzen ausbilden.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei der Betrachtung der psychoakustischen Kenngrößen. Der Mittelwert der Lautheit N nimmt vom Schwebzustand zum Horizontalflug mit 10 m/s deutlich ab und steigt bei 20 m/s nur geringfügig an. Dies deutet darauf hin, dass die mittlere wahrgenommene Lautheit über den betrachteten Zeitraum nur schwach von der Fluggeschwindigkeit abhängt. Deutlich ausgeprägter sind hingegen die Unterschiede bei den Maximalwerten der Lautheit. Während im Hoverfall vergleichsweise moderate Maximalwerte auftreten, steigt das Lautheitsmaximum im schnellen Vorbeiflug von rund 31 sone bei 10 m/s auf etwa 45 sone

bei 20 m/s. Dies zeigt, dass höhere Fluggeschwindigkeiten insbesondere zu kurzzeitigen, stark ausgeprägten Lautheitsspitzen führen.

Diese Beobachtung lässt sich durch die zeitliche Kompression des Vorbeiflugs erklären. Bei höheren Geschwindigkeiten tritt der Bereich minimalen Abstands zum Beobachter in kürzerer Zeit auf, wodurch hohe Pegel und Lautheiten kurzzeitig, aber sehr intensiv wahrgenommen werden. Gleichzeitig entfernt sich die Drohne nach dem Vorbeiflug schneller vom Beobachter, sodass die Phase erhöhter Wahrnehmung insgesamt kürzer ausfällt. Der Einfluss der Entfernung sowie der richtungsabhängigen Schallabstrahlung spielt hierbei eine zentrale Rolle.

Auch die Rauheit R zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom Flugzustand. Der Mittelwert ist im Schwebzustand am höchsten und nimmt im Horizontalflug deutlich ab. Mit steigender Fluggeschwindigkeit erhöht sich die Rauheit erneut, was auf eine zunehmende zeitliche Modulation des Signals im Vorbeiflug hindeutet.

Die Tonhaltigkeit T weist ebenfalls eine klare Abhängigkeit vom Flugzustand auf. Im Schwebzustand treten die höchsten Mittelwerte auf, was mit den ausgeprägten tonalen Anteilen der Rotorgeräusche bei stationärem Betrieb konsistent ist. Im Horizontalflug sinkt die Tonhaltigkeit deutlich ab und bleibt für 10 m/s und 20 m/s auf einem vergleichbaren Niveau. Dies deutet darauf hin, dass der Vorbeiflug zwar durch höhere Pegelspitzen geprägt ist, die Tonalität des Geräuschs jedoch gegenüber dem Schwebzustand reduziert wird und die breitbandige Schallabstrahlung dominanter ist.

Im Gegensatz dazu weist die Schärfe S nur geringe Unterschiede zwischen den betrachteten Fluggeschwindigkeiten und Flugzuständen auf. Sowohl die Mittelwerte als auch die Maximalwerte verändern sich lediglich marginal. Daraus lässt sich schließen, dass die spektrale Gewichtung hin zu höheren Frequenzen im untersuchten Geschwindigkeitsbereich nur in geringem Maße beeinflusst wird.

Die Ergebnisse zeigen exemplarisch, dass der Zusammenhang zwischen Fluggeschwindigkeit, Flugzustand und wahrgenommener Störwirkung nicht trivial ist. Eine höhere Geschwindigkeit führt nicht zwangsläufig zu einer proportional stärkeren Belastung, sondern verändert insbesondere die zeitliche Struktur der Wahrnehmung. Während im Schwebzustand eine kontinuierliche Geräuschwirkung dominiert, sind Vorbeiflüge durch kurzzeitige, teils sehr ausgeprägte Maxima gekennzeichnet. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die dargestellten Ergebnisse stark von der Beobachterposition abhängen und sich bei anderen relativen Mikrofonpositionen deutlich verändern können.

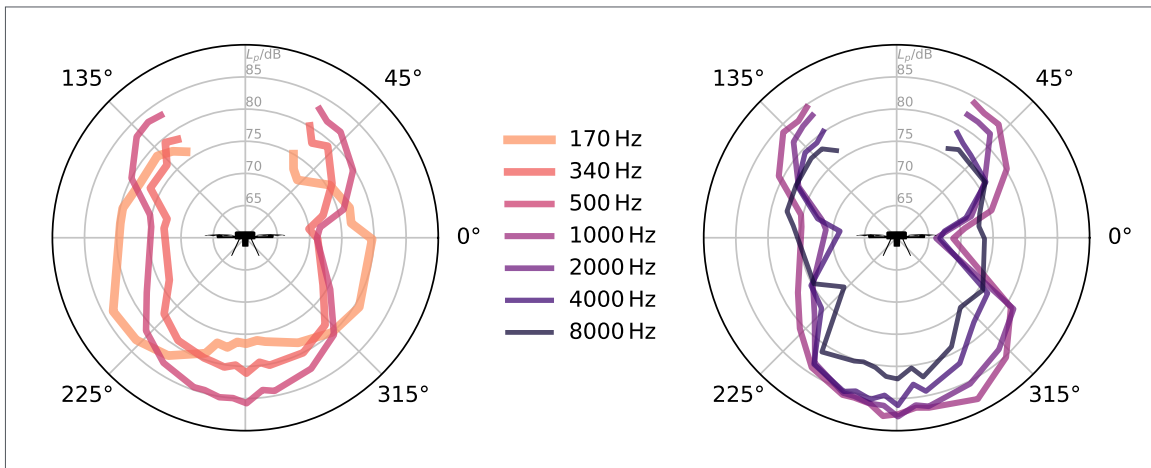


Abb. 6: Richtcharakteristik der Drohne im Schwebflug in der Ebene senkrecht zur Flugrichtung für unterschiedliche Oktavbänder. Die Bänder um 170 Hz und 340 Hz enthalten die einfachen bzw. doppelten Blattfolgefrequenzen der Rotoren.

Wie Drohnenlärm abgestrahlt wird

Eine vom Beobachtungspunkt unabhängige Beschreibung des Drohnengeräuschs hat neben der einfachen Vergleichbarkeit unterschiedlicher Drohnenflüge den Vorteil, dass sich darauf basierend mithilfe von Ausbreitungsrechnungen die zu erwartende Lärmbelastung an beliebigen Positionen ermitteln lassen. Abbildung 6 zeigt eine emissionsbasierte Darstellung der Drohnen-Schallabstrahlung im Schwebflug. Hierfür wurden die Schalldrücke der Mikrofone in der Ebene zwischen den zwei Masten entsprechend der jeweiligen Abstände zur mittig schwebenden Drohne normiert und für jeweils ein Oktavband über den jeweiligen Abstrahlwinkel aufgetragen. Das 170-Hz-Oktavband enthält dabei die ersten Blattfolgefrequenzen der Rotoren.

Bei den meisten betrachteten Frequenzen ist eine ähnliche Richtcharakteristik zu beobachten: Die Abstrahlung nach unten ist jeweils stärker als zur Seite. Direkt nach oben konnten keine Abstrahleigenschaften bestimmt werden, da senkrecht über der Drohne keine Sensoren angebracht waren. Die gemessenen Abstrahlwinkel von Mikrofonen schräg oberhalb der Drohne zeigen ebenfalls eine erhöhte Abstrahlung. Im Gegensatz zu den anderen Frequenzen strahlt die Drohne bei 170 Hz senkrecht nach unten weniger Schall ab als schräg oder zur Seite. In den Ergebnissen können noch Einflüsse von Bodenreflexionen enthalten sein, die sich bei über dem Boden befindlichen Mikrofonen je nach ausgewerteter Frequenz unterschiedlich auswirken. Ähnliche Beobachtungen der Abstrahleigenschaften konnten jedoch bereits bei vergangenen Messungen mit anderen Multicopter-Drohnen in einer reflexionsarmen Umgebung gemacht werden [7].

Die Charakterisierung im Schwebflug ist vergleichsweise einfach zu realisieren, eine entsprechende

Betrachtung im Horizontalflug hingegen stellt eine größere Herausforderung dar. Eine gängige Darstellung der Abstrahleigenschaften erfolgt in diesem Fall mithilfe einer hemisphärischen Visualisierung der Geräuschemission (engl. *noise hemisphere*) [8]. Dazu werden wie im obigen Beispiel die gemessenen Schalldrucksignale unter Berücksichtigung des Abstands zwischen Mikrofon und Schallquelle auf eine Referenzdistanz entsprechend des Abstands zwischen Mikrofon und Schallquelle (z. B. 1 m) umgerechnet und entsprechend skaliert. Hierfür muss die Position der Drohne zu jedem Zeitpunkt der Auswertung bekannt sein. Neben den aufgezeichneten GPS-Daten können hier auch die akustischen Messdaten zu deren Bestimmung herangezogen werden. Anschließend wird der Raum der möglichen Abstrahlrichtungen in Abschnitte eingeteilt und aus den normierten Signalen ermittelte Kurzzeit-Leistungsspektren dem der aktuellen Richtung zum Mikrofon entsprechenden Abschnitt zugeordnet und gemittelt.

Abbildung 7 (siehe folgende Seite) zeigt räumliche Richtcharakteristiken für die Fluggeschwindigkeiten 10 m/s und 20 m/s in exemplarischen Oktavbändern. Auch hier ist zu sehen, dass die Abstrahlung nach unten stärker als in seitliche Richtung ist. Nicht eingefärbte Bereiche kennzeichnen Winkelbereiche, in denen sich im Verlauf des Flugs zu keinem Zeitpunkt ein Mikrofon befand und somit auch keine Informationen zur Schallabstrahlung verfügbar sind. Da der Flugpfad nicht exakt mittig über das Array verlief, sind diese Bereiche in der Kartierung nicht symmetrisch.

Bei beiden betrachteten Fluggeschwindigkeiten ähneln sich die Abstrahlcharakteristiken qualitativ. Nach unten wird deutlich mehr Schall abgestrahlt als zur Seite oder nach hinten. Die Maximalpegel bei 20 m/s liegen, wie zu erwarten, deutlich über de-

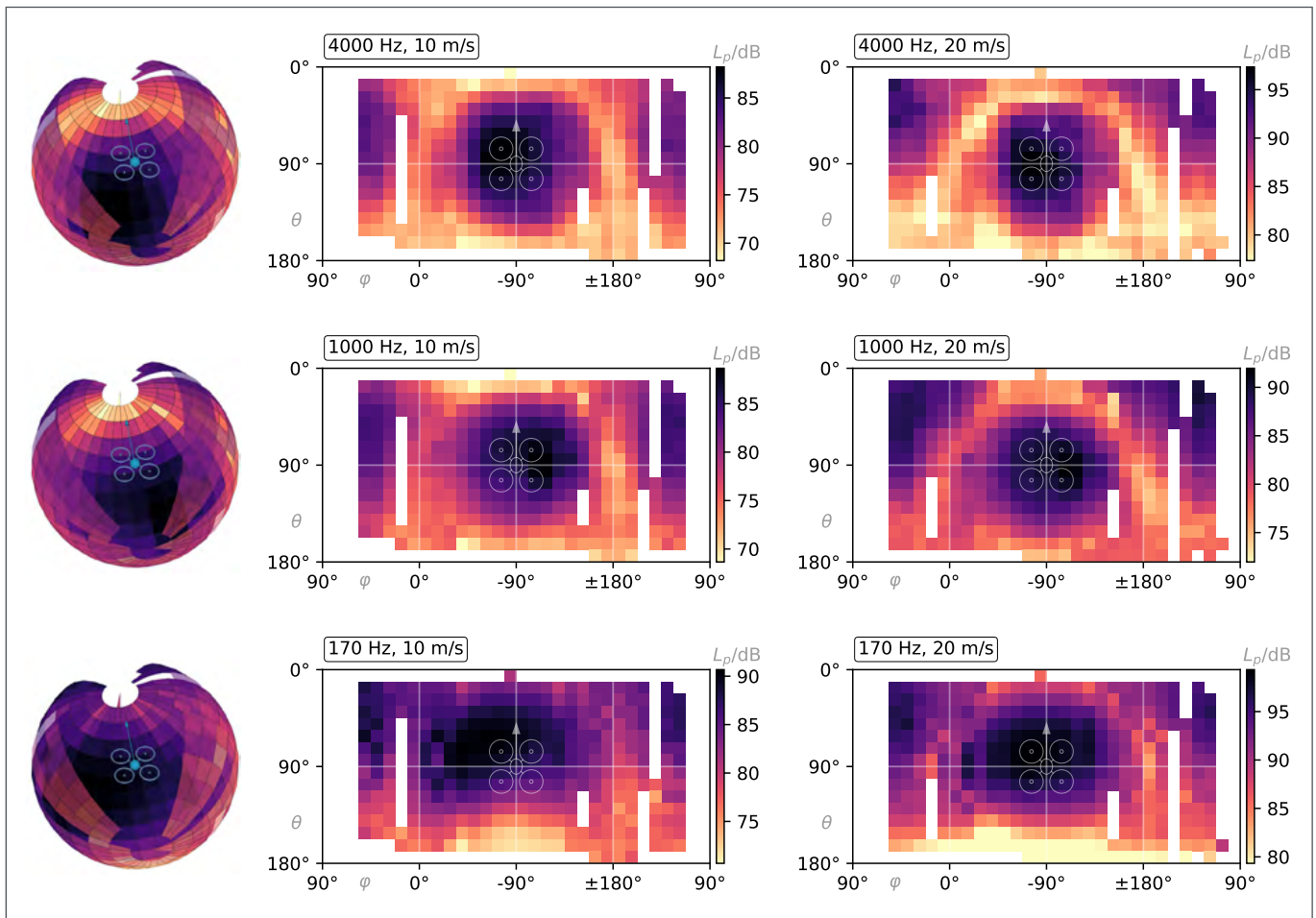


Abb. 7: Gerichtete Schallabstrahlung der Drohne im Horizontalflug bei 10 m/s (links, 3D + Projektion) und 20 m/s (rechts, Projektion) für die Oktavbänder 170 Hz, 1 kHz und 4 kHz

nen bei 10 m/s. Wie im stationären Fall ist auch im Horizontalflug bei 170 Hz der Bereich der erhöhten Abstrahlung zur Seite hin etwas erweitert. Die Abstrahlung nach oben geschieht leicht in Flugrichtung geneigt. Bei der höheren betrachteten Geschwindigkeit von 20 m/s ist dieser Effekt noch deutlicher ausgeprägt, was durch den ebenfalls erhöhten Nickwinkel plausibel erscheint.

Mithilfe der räumlichen Richtcharakteristiken lassen sich über eine gewichtete Mittelung der Werte repräsentative Schallleistungsspektren für die verschiedenen Flugzustände berechnen. Diese sind in Abbildung 8 dargestellt und hilfreich für einen quantitativen und vom Beobachtungspunkt unabhängigen Vergleich der jeweiligen Lärmabstrahlung.

Während bei tiefen Frequenzen der Schallleistungspegel mit höherer Fluggeschwindigkeit steigt, strahlt die Drohne im Schwebflug bereits bei Frequenzen ab 500 Hz stärker ab als beim Horizontalflug mit 10 m/s und zeichnet sich durch deutlich ausgeprägtere Töne im Spektrum aus. Bei höheren Frequenzen ab 2 kHz haben die Flüge bei Geschwindigkeiten von 0 m/s bzw. 10 m/s einen ähnlichen Verlauf, während bei 20 m/s in diesem Bereich 5–10 dB mehr abgestrahlt werden.

Die Berechnung des A-bewerteten Schallleistungsspegels ergibt für den Flug mit 10 m/s ($L_{WA,10\text{ m/s}} = 99\text{ dB}$) gegenüber dem Schwebflug ($L_{WA,\text{Hover}} = 100\text{ dB}$) für die hier untersuchte Drohnenkonfiguration sogar einen leicht geringeren Pegel. Wird die Drohne mit 20 m/s geflogen, strahlt sie mit einer deutlich höheren Gesamtschallleistung von $L_{WA,20\text{ m/s}} = 106\text{ dB}$ ab.

Schlussbemerkungen

Der von Drohnen im realen Flugbetrieb abgestrahlte Lärm ist komplex und lässt sich nur begrenzt durch einzelne Pegelwerte beschreiben. Die akustische Wirkung einer Drohne wird nicht allein durch ihre Leistung bestimmt, sondern wesentlich durch Flugzustand, Geschwindigkeit und die gerichtete Abstrahlung des Schalls. Bereits im einfachen Horizontalflug treten deutliche Unterschiede zwischen der nach unten, seitlich und nach oben abgestrahlten Schallenergie auf, die für die Wahrnehmung an verschiedenen Beobachtungspositionen relevant sind. Damit wird deutlich, dass Bewertungsansätze, die auf stationären Flugzuständen oder stark vereinfachten Annahmen beruhen, den realen Einsatzbedingungen von Multicoptern nur eingeschränkt gerecht werden.

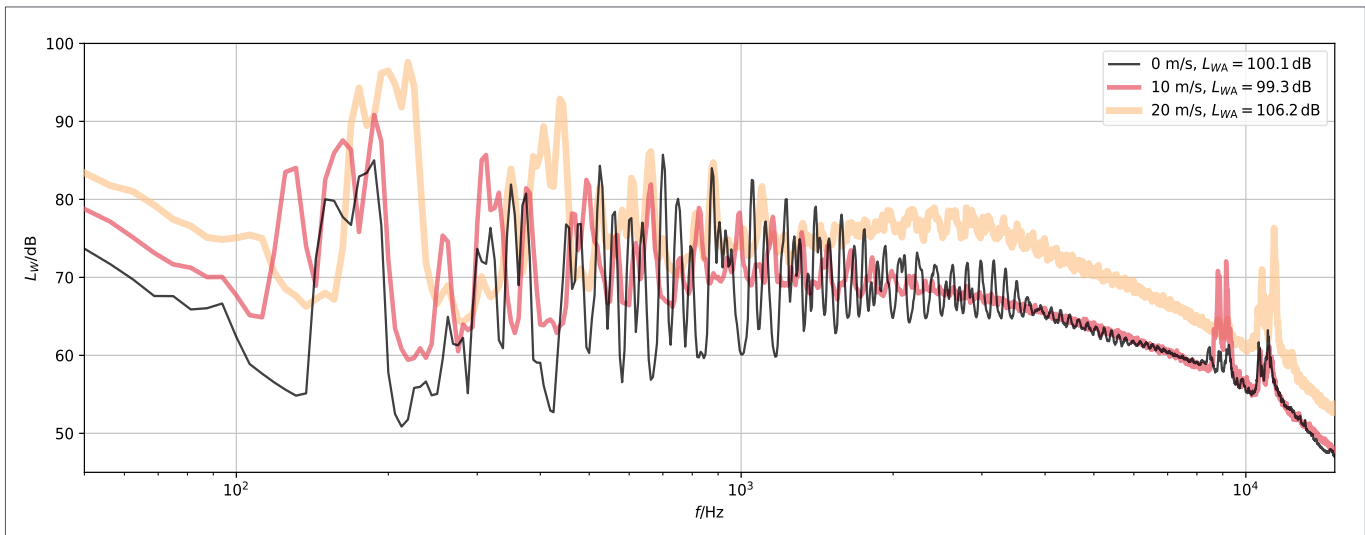


Abb. 8: Aus der gerichteten Schallabstrahlung berechnetes Schmalband-Schallleistungsspektren ($\Delta f = 6,25$ Hz)

Zugleich zeigt die Messkampagne, dass mit geeigneten Messaufbauten und einer präzisen Erfassung der Flugbahn belastbare Aussagen über die Schallabstrahlung im Betrieb möglich sind.

Die gewonnenen Messdaten bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung von Messverfahren und Bewertungsgrößen und tragen dazu bei, den Einsatz von Drohnen in lärmsensiblen Umgebungen fundiert und rücksichtsvoll zu gestalten. Neben weiteren Fluggeschwindigkeiten umfassen die erhobenen Daten auch Steig- und Sinkflüge mit unterschiedlichen Anstiegswinkeln, mehrere Drohnentypen sowie verschiedene Propellerkonfigurationen an derselben Plattform. Es ist geplant, diesen umfangreichen Datensatz zu veröffentlichen, um weiteren Forschungsgruppen die Weiterentwicklung und den Vergleich von Auswerteverfahren zu ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den zahlreichen Mitwirkenden an der TU Berlin, der FAU Erlangen-Nürnberg und dem Modellfliegerclub Nürnberger Land e.V., deren Unterstützung die Durchführung dieser Messkampagne ermöglicht hat. Besonderer Dank gilt Ennes Sarradj (TUB, TA), Stefan Becker und Philipp Schlatter (FAU, LSTM) sowie Andreas Gründer (FAU, FAPS).

Literatur

- [1] Nonami, K.: Overview of the Global Drone Industry. 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). Wollongong, Australia: IEEE, 2025.
<https://doi.org/10.1109/ICM62621.2025.10934845>
- [2] The European Commission: Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on thirdcountry operators of unmanned aircraft systems. 62 (11 June 2019).
- [3] ISO: ISO 5305:2024 – Noise measurements for UAS (unmanned aircraft systems). 2024.
- [4] European Union Aviation Safety Agency: Guidelines on Noise Measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk). 2023.
- [5] Benz, J.; Gründer, A.; Czwiolong, F.; Becker, S.: Acoustic Self-Noise Measurement of a Quadcopter (UAV) in Flight with Focus on Data Acquisition, Microphone Position, and Microphone Wind Protection. en. 2024.
<https://doi.org/10.17866/rd.salford.27696333>
- [6] Benz, J.; Heigl, C.; Gruetzner, D.; Czwiolong, F.; Gruender, A.; Franke, J.; Becker, S.: Flow characterisation using PIV to optimise microphone windscreens for on-board self-noise measurements of a multicopter (UAV) under different flight conditions. en. Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum / Euro-Noise 2025. Málaga, Spain: European Acoustics Association, 2025.
<https://doi.org/10.61782/fa.2025.0406>
<https://dael.euracoustics.org/confs/fa2025/data/articles/000406.pdf>
- [7] Herold, G: In-flight directivity and sound power measurement of small-scale unmanned aerial systems. Acta Acustica 6.58, 2022.
<https://doi.org/10.1051/aacus/2022052>
- [8] Pascioni, K.A.; Page, J.A.; Boyle, D.K.: UAM Source Noise Hemisphere Flight Test Measurement Protocol. NASA/TM-20240011587. Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center, 2024. ■



Gert Herold
ehemals: TU
Berlin, Fachgebiet
Technische Akustik
aktuell: DLR,
Institut für
Antriebstechnik,
Triebwerksakustik,
Berlin



Julian Benz
FAU Erlangen-
Nürnberg,
Lehrstuhl für Strö-
mungsmechanik