

Eigengeräuschmessung eines Quadropters (UAV) im Flug mit dem Fokus auf Datenerfassung, Mikrofonposition und Mikrofonwindschutz

Julian Benz¹, Felix Czwiolong¹, Andreas Gründer²,
Jörg Franke², Stefan Becker¹

¹ Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
91058 Erlangen, E-mail: julian.benz@fau.de

² Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
91058 Erlangen

Einleitung

Fliegende Drohnen, auch als UAVs (englisch: Unmanned Aerial Vehicles) bezeichnet, finden zunehmend Einsatz in verschiedenen Bereichen, wie zum Beispiel in der Foto- und Videografie im Medienbereich, der Rettungs- und Aufklärungsmissionen im Sicherheitsbereich [1, 2, 3] oder der Paketauslieferungen im Logistikbereich [4]. Ein zentrales, noch ungelöstes Problem stellt dabei das erzeugte Eigengeräusch der Drohnen dar. Dieses wird von Menschen im direkten Umfeld des Fluggeräts meist als störend wahrgenommen [5, 6]. Vor diesem Hintergrund sind Ingenieure gefordert, die fliegenden Drohnen, hier speziell Multikopter, akustisch zu optimieren. Ziel ist es, das Eigengeräusch zu reduzieren und gleichzeitig die Effizienz zu steigern, um so die Nachhaltigkeit und Akzeptanz dieser Fluggeräte in der Bevölkerung zu steigern und eine Verbesserung der fliegenden Objekte zu erreichen. Die wesentlichen Geräuschquelle von Multikoptern sind die Propeller welchen den Auftrieb erzeugen. In Abb. 1 sind die Schallemissionen verschiedener Propeller von der Firma *T-Motor* dargestellt. Diese Messungen fanden im

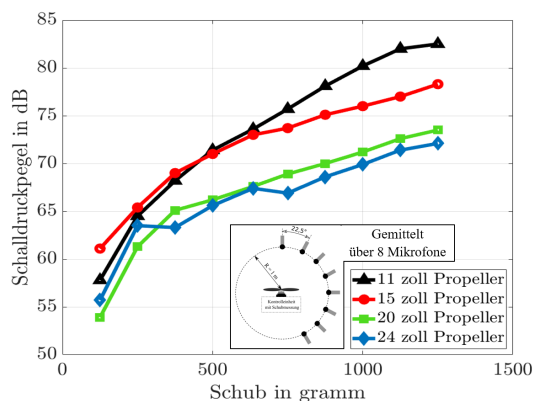


Abbildung 1: Gesamtschalldruckpegel über Schub von verschieden großen Drohnenpropellern.

reflexionsarmen Raum des Lehrstuhls für Strömungsmechanik (LSTM) der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen statt. Es wird deutlich, dass mit abnehmender Größe des Propellers der Gesamtschalldruckpegel je Schub zunimmt. Die Wichtigkeit des Leichtbaus von Multikoptern zur Reduzierung des Eigengeräusches zeigt sich auch anhand der Graphen.

Bei der Analyse der Spektren unter gleichem Schub in Abb. 2 wird offensichtlich, dass diese maßgeblich durch die Blattfolgefrequenz der jeweiligen Propeller und deren n -zähligen Vielfachen charakterisiert ist. Die tonalen Komponenten treten aus einem Grundrauschen hervor, welche auf die Strömung zurückzuführen sind. Die Blattfolgefrequenz f_{BPF} ist von der Drehzahl n des Propellers

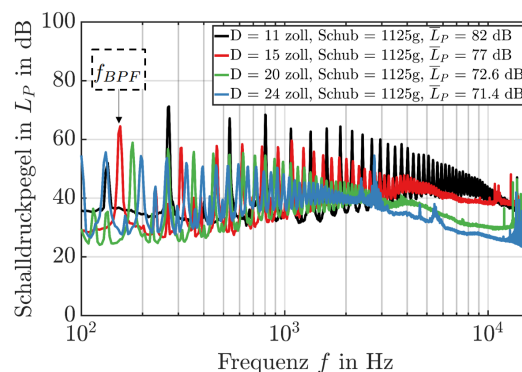


Abbildung 2: Schallspektren bei spezifischem Schub von verschieden großen Drohnenpropellern.

und der Blattzahl N_s abhängig.

$$f_{BPF} = n \cdot N_s \quad (1)$$

Diese Messungen wurden ausschließlich ohne zusätzliche Zuströmung durchgeführt, was dem Hover-/Schwebeflug des Fluggeräts entspricht. Bei einem Multikopter gibt es aber auch noch weitere Flugsituationen, die zu unterschiedlichen Strömungsbedingungen am Propellerblatt führen. Neben dem Steigflug zum Start und dem Sinkflug zur Landung gibt es den Horizontalflug ähnlich wie bei Helikoptern. Diese stationären Flugsituationen verändern die Anströmungscharakteristik der Propeller und damit die Schub-Drehzahl-Charakteristik, abhängig vom Anströmungswinkel und der Anströmungsgeschwindigkeit [7]. Speziell im Sinkflug kann bei mittleren Geschwindigkeiten ein Wirbelringstadium auftreten, bei dem nur noch die Blattspitze Auftrieb erzeugt und am Blattinneren eine Strömungsablösung stattfindet [8]. Bei den verschiedenen Flugsituationen können zudem unterschiedliche Strömungseffekte beobachtet werden auch ähnlich wie bei Helikoptern. Dazu gehören verschiedene Anströmungswinkel, Rückanströmungen, Machzahleffekte an der Blattspitze, Blattwirbelinteraktionen und Strömungsablösungen [8]. Die erwähnten Effekte unterstreichen die Notwendigkeit, Schallmessungen im Flug durchführen zu können, um ein vollständiges Bild der aeroakustischen Eigenschaften eines Multikopters zu erhalten. Obwohl auch Nick-, Gier- und Rollbewegungen für eine umfassende Analyse relevant sind, fokussiert sich diese Untersuchung zunächst auf die stationären Flugzustände. Eine der zentralen Herausforderungen bei der Messung des Eigengeräusches auf einem Multikopter ist die Positionierung des Mikrofons auf dem Fluggerät. Bei der Analyse der Druckschwankungen rund um einen Multikopter zeigt sich die Komplexität dieser Aufgabe, siehe Abb. 3. Die eigentliche Zielmessgröße ist die akustische Druckschwankung $p'_{Drohnenakustik}$. Am Multikopter tre-

ten aber auch hydrodynamische Druckschwankungen auf, erzeugt durch die Propeller $p'_{\text{Propellerströmung}}$ und den Umgebungswind $p'_{\text{Umgebungswind}}$, der einen ähnlichen Effekt wie bei der Bewegung Fluggeräts mit sich bringt. Auch Geräusche aus der Umgebung $p'_{\text{externe Akustik}}$ können vorhanden sein.

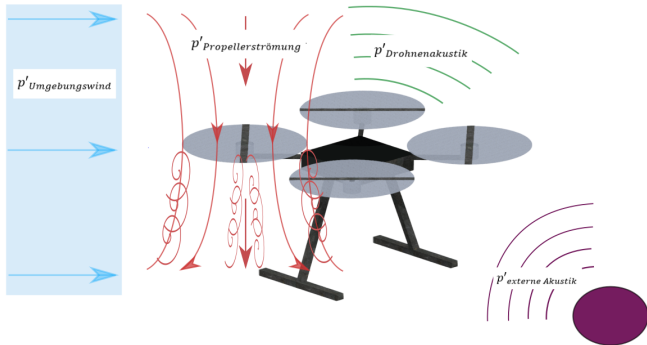


Abbildung 3: Druckschwankungen rund um einen Multi-Kopter.

Datenerfassungssystem und Mikrofonanbringung

Zur Ermöglichung der Eigengeräuschmessung wurde ein Datenerfassungssystem entwickelt, basierend auf einem Einplatinencomputer mit einem NI-Akustikdatenerfassungsmodul, siehe Abb. 4. Dieses

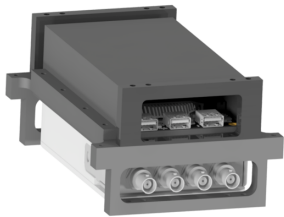


Abbildung 4: Die Hardware des Datenerfassungssystem.

System ermöglicht die Nutzung hochwertiger Messmikrofone, welche in diesem Fall von der *Microtech Gefell GmbH (MTG)*, Modell MM210 sind. Diese Kondensatormikrofone werden mit konstantem Strom gespeist, sind kalibriert und besitzen einen linearen Frequenzgang. Die Flugdaten werden über ROS 2 Humble vom Flightcontroller Pixhawk 6C abonniert und in eine Log Datei zusammen mit den Schallmessdaten synchronisiert gespeichert. Zudem bietet die Inhouse entwickelte Datenerfassungssoftware die Möglichkeit der Live FFT und Schallmessdaten in ROS 2 Humble zu veröffentlichen. Diese Daten können dann während des Fluges über Funk an den Boden zum Piloten gesendet werden, um eine Live-Auswertung durchzuführen. Die Übertragung fokussiert sich derzeit auf den Gesamtschalldruckpegel, bietet jedoch das Potenzial zur Erweiterung für die Analyse psychoakustischer Größen wie Rauheit, Schärfe oder spezifische Frequenzgewichtungen. Die Abmessungen des Datenerfassungssystems sind $162 \times 120 \times 76 \text{ mm}^3$, welches an einen Forschungsmulti-Kopter des LSTMs, hier im speziellen eines Quadrokopters, da mit vier Rotoren, installiert wurde. Der Quadrokopter ist geeignet für ein Abfluggewicht von bis zu 5 kg, mit einer Nutzlast von 2,0 bis 2,5 kg, nutzt die am Markt etablierten T-Motor-Antriebskomponenten, einschließlich der NS15x5 Luftschraube, kombiniert mit einem 6S Lipo Akku. Die

Mikrofonbefestigung wurde mittels zweier Carbonrohre und einer additiv gefertigten Adapterplatte realisiert, die mittig auf der Grundplatte des Quadropterrahmens befestigt wurden, siehe Abb. 5. Die Carbonrohre

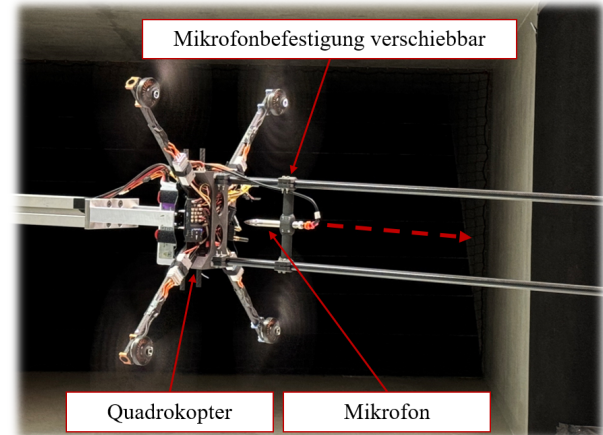


Abbildung 5: Die Mikrofonbefestigung

ermöglichen die Verschiebung des Mikrofons und somit die Untersuchung verschiedener Mikrofonpositionen auf der Saugseite der Propeller. Die Untersuchungen wurden dabei auf die Saugseite beschränkt, weil auf der Druckseite eine deutlich höhere Turbulenz durch den Blattspitzenwirbel und die Strömungsinteraktion mit dem Drohnenrahmen sowie der weiteren Komponenten zu erwarten ist. Ebenfalls wurde von der Nutzung von Auslegern in der Propellerebene abgesehen, basierend auf den Erkenntnissen aus internen Voruntersuchungen. Diese haben gezeigt, dass selbst wenn das Gewicht der Ausleger mit Gegengewichten ausgeglichen wird, um entsprechende Schwerpunktverschiebungen zu vermeiden, die unterschiedlichen Trägheitsmomente in den verschiedenen Achsen regelungstechnische und flugdynamische Herausforderungen mit sich bringen. Zwar lässt sich dies durch Anpassung der PID-Reglerparameter teilweise ausgleichen, was jedoch spezifisches Fachwissen erfordert und folglich würde das Akustikmesssystem nicht ohne weiteres an einem anderen Fluggerät einsetzbar sein. Eine Angleichung der Trägheitsmomente durch zusätzliche Ausleger würde zudem ein erhebliches Mehrgewicht verursachen.

Untersuchungen im Windkanal

Um entsprechend evaluieren zu können, welchen Einfluss die Rotor- und Umgebungsströmung auf das am Fluggerät angebrachte Mikrofon haben, wurden Untersuchungen im Windkanal des LSTMs durchgeführt. Dieser besitzt eine Düsenabmessung von $1,87 \text{ m} \times 1,40 \text{ m}$ und ermöglicht eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 55 m/s bei einem Turbulenzgrad kleiner $0,4\%$. Die Durchführung akustischer Untersuchungen in einem klassischen Windkanal stellt spezifische Herausforderungen dar, insbesondere aufgrund des hohen Eigengeräusches des Windkanals selbst und potenzieller Schallreflexionen. Deshalb wurde bei den Untersuchungen ein zweites Mikrofon, das sich außerhalb der Strömung befindet (Mikrofon 1 in den folgenden Spektren), für Vergleichszwecke verwendet. Der größere Abstand dieses Mikrofons von $1,5 \text{ m}$ mit einem Winkelversatz von 45° zum Fluggerät wurde beachtet und entsprechend bei der Auswertung

korrigiert. Auf Basis der Vergleichsmessungen lässt sich ableiten, welchen Einfluss die Strömung auf die Schalldruckmessung am Fluggerät selbst (Mikrofon 2 in den folgenden Spektren) bei verschiedenen Flugsituationen hat. Die Notwendigen Kippwinkel, welche bei den Windkanaluntersuchungen eingestellt wurden, sind vorab an einem lokalen Flugplatz im Freien aus mehreren Messreihen bestimmt worden. Hierzu wurden mehrere Bahnen in verschiedene Richtungen geflogen, jeweils bei definierten Geschwindigkeiten. Sämtliche Flugdaten des Flightcontrollers wurden dabei aufgezeichnet. Entsprechend wurde aus den Flugdaten dann der Mittelwert des Kippwinkels bei den verschiedenen Flugeschwindigkeiten errechnet. Dieser Kippwinkel wurde schließlich über ein zusätzlich angebrachtes Knickgelenk an der Quadrocopterbefestigung am Traversiersystem im Windkanal reproduziert und die Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals entsprechend der im Freien geflogenen Geschwindigkeit des Quadrocopters angepasst. Aus den Flugdaten wurden auch die Steuersignale für die Motorregler ausgelesen und in den Windkanaluntersuchungen reproduziert. Auf diese Weise konnte die Horizontalflugsituation im Windkanal nachgebildet werden. Der Quadrocopter wurde während der Versuchsreihen von einem Gleichspannungsnetzteil versorgt. Im Folgenden wird vor dem Horizontalflug der Hover-/Schwebeflug betrachtet, also ohne eine zusätzliche Umgebungsströmung. Insgesamt wurden drei verschiedene Mikrofonkonfigurationen, auf Basis des *MTG MM 210*, untersucht. Diese sollen eine Analyse über den Einfluss der Strömung auf das Mikrofon ermöglichen:

1. Als Referenzvariante das Mikrofon mit der Standard-Messmikrofonkapsel, also in der Standardversion.
2. Das Mikrofon mit Nasenkonus.
3. Die Standard-Messmikrofonkapsel in Kombination mit einer Schaumstoffwindschutzkugel von *MTG*.

Die Bestandteile der drei Konfigurationen sind alle kommerziell erhältlich. Im Hover-/Schwebeflug zeigen sich zwischen den verschiedenen Mikrofonkonfigurationen im Spektrum nur geringe Unterschiede bei gleichem Abstand (535 mm zum Drohnenrahmen) siehe Abb. 6. Speziell bei

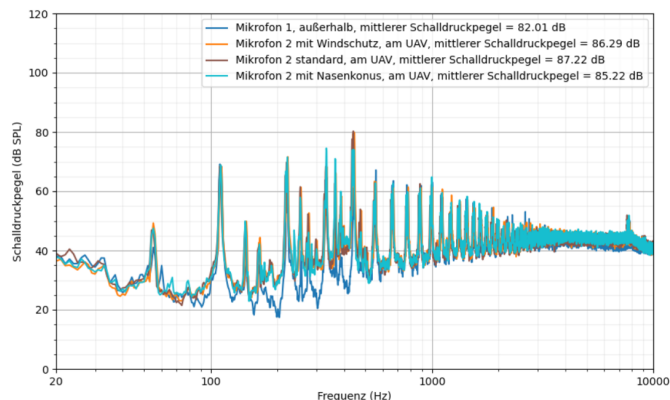


Abbildung 6: Schallspektren verschiedener Mikrofonkonfigurationen im Hover-/Schwebeflug .

den Peaks der Blattfolgefrequenz und deren n-zahligen Vielfachen unterscheiden sich die Pegel nur minimal.

Auch eine Veränderung des Abstands des Mikrofons (von 535 mm) näher hin zum Drohnenrahmen (307 mm und 80 mm) sorgt für nur marginale Veränderungen im Spektrum. Folglich hat im Hover-/Schwebeflug die Propellerströmung keinen erheblichen Einfluss auf die Onboard-Akustikmessungen. Die Untersuchung des Horizontalfluges mit einer Geschwindigkeit von $v_{horizontal} = 5$ m/s hingegen zeigt schon deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Mikrofonkonfigurationen und der Außenmessung, siehe Abb. 7. Insbesondere im niederfrequenten

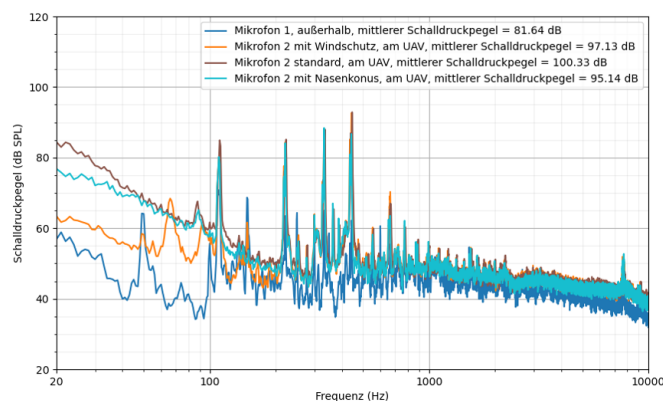


Abbildung 7: Schallspektren verschiedener Mikrofonkonfigurationen mit $v_{horizontal} = 5$ m/s.

Bereich bis $f \approx 200$ Hz ist eine deutliche Pegelerhöhung bei der Standardmikrofonkonfiguration vorhanden. Auch zeigt das Mikrofon mit Nasenkonus signifikante Erhöhungen im Vergleich zur Außenmessung auf. Das Mikrofon mit Windschutz weist die geringste Pegelerhöhung im niederfrequenten Bereich auf. Bei $v_{horizontal} = 10$ m/s nimmt die Pegelerhöhung im niederfrequenten Bereich bis $f \approx 500 - 600$ Hz bei allen Konfigurationen zu, siehe Abb. 8. Oberhalb dieser Frequenzen ist der Unter-

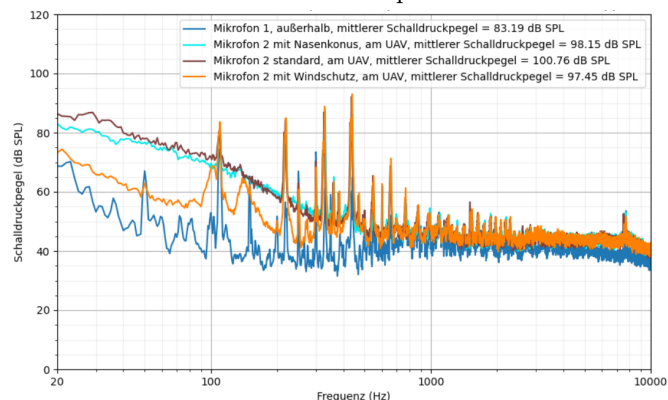


Abbildung 8: Schallspektren verschiedener Mikrofonkonfigurationen mit $v_{horizontal} = 10$ m/s.

schied zur Außenmessung relativ gering. Die Blattfolgefrequenz und deren n-zahligen Vielfachen zeichnen sich bei allen Konfigurationen noch deutlich im Spektrum ab. Bei der Betrachtung des mittleren Gesamtschalldruckpegels ist allerdings eine signifikante Erhöhung von $\Delta L_{p,Mittel} \approx 13$ dB vorhanden, verglichen mit dem Mikrofon außerhalb der Strömung. Folglich ist eine deutliche Beeinflussung des Mikrofonsignals von der Strömung vorhanden. Die Untersuchung bei $v_{horizontal} = 20$ m/s zeigt eine umfassende und erhebliche Erhöhung der Pegel des Spektrums über den gesamten Frequenzbereich,

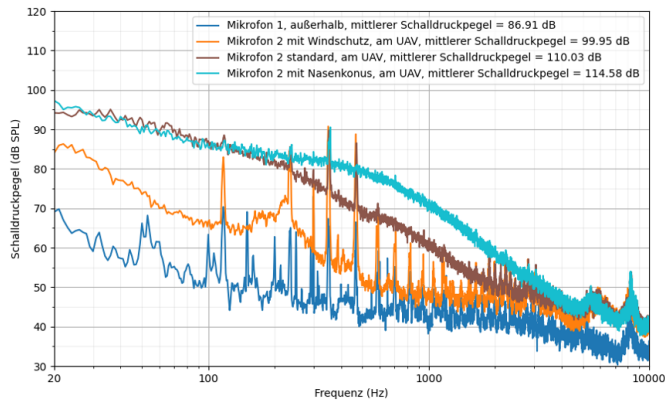


Abbildung 9: Schallspektren verschiedener Mikrofonkonfigurationen mit $v_{horizontal} = 20$ m/s.

siehe Abb. 9. Speziell die Standardmikrofonkonfiguration und die Nasenkonuskonfiguration weisen bis $f \approx 2000$ Hz erhebliche Pegelerhöhungen auf. Dabei ist die erste Blattfolgefrequenz nicht mehr im Spektrum identifizierbar. Auch das Mikrofon mit Windschutz besitzt bei niedrigen Frequenzen bis $f = 100$ Hz eine deutliche Pegelerhöhung von $\Delta L_p \approx 15$ dB. Im Gegensatz zu den anderen Konfigurationen lässt sich im Spektrum allerdings noch die Blattfolgefrequenz erkennen, wenn auch mit einem deutlich erhöhtem Pegel im Vergleich zur Außenmessung. Abschließend erfolgt die Analyse über den Einfluss verschiedener Mikrofonpositionen auf die Schalldruckmessung bei $v_{horizontal} = 5$ m/s und gleichem Windschutz in Abb. 10. Hierbei zeigt sich, dass die Variante mit dem

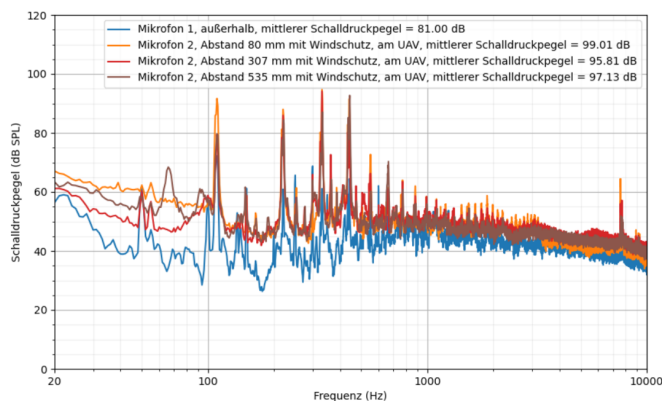


Abbildung 10: Schallspektren verschiedener Mikrofonpositionen mit $v_{horizontal} = 5$ m/s.

mittleren Abstand die geringste Erhöhung der Pegel im niederfrequenten Bereich bis $f = 100$ Hz aufweist. Auch beim Gesamtschalldruckpegel lässt sich eine geringere Abweichung im Vergleich zur Außenmessung quantifizieren. Mögliche Gründe hierfür können die Umlenkung der Umgebungströmung (hier hervorgerufen durch die Horizontalflugbewegung) durch die Propellerströmung und die Ablenkung der Strömung nahe des Drohnenrahmens sein. Diese Unterschiede gilt es in zukünftigen Untersuchungen messtechnisch genauer zu erforschen.

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer speziell optimierten Mikrofonkapselung oder eines Windschutzes, um das Mikrofon effektiv vor hydrodynamischer Strömung zu schützen und präzise Schalldruckmessungen im Horizontalflug bei größeren Geschwindig-

keiten zu ermöglichen. Für zukünftige Untersuchungen wird mittels Stereo-Partikel-Image-Velocimetry (Stereo-PIV) das Strömungsfeld bei verschiedenen Flugsituationen detailliert analysiert werden. Insbesondere sollen die Geschwindigkeit, die Richtung und der Turbulenzgrad der Strömung, denen das Mikrofon ausgesetzt ist quantifiziert werden. Dies dient dann als Grundlage für die Entwicklung effektiver Schutzmaßnahmen gegenüber der strömungsinduzierten Druckschwankungen auf die Mikrofon-Membran. Die potenziellen Lösungsvarianten werden dann isoliert in einem aeroakustischen Windkanal unter Nachbildung der Strömungsbedingungen am Multikopter untersucht werden.

Literatur

- [1] KIPPNICH, Uwe: Drohnen in der medizinischen Versorgung: Ein neues Glied in der Rettungskette? In: *Der Unfallchirurg* 124 (2021), Dezember, Nr. 12, S. 984–989. <http://dx.doi.org/10.1007/s00113-021-01096-2>. – DOI 10.1007/s00113-021-01096-2. – ISSN 0177-5537, 1433-044X
- [2] ERDELJ, Milan ; NATALIZIO, Enrico ; CHOWDHURY, Kaushik R. ; AKYILDIZ, Ian F.: Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management. In: *IEEE Pervasive Computing* 16 (2017), Januar, Nr. 1, S. 24–32. <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2017.11>. – DOI 10.1109/MPRV.2017.11. – ISSN 1536-1268
- [3] SCHMIDBAUER, W. ; JÄNIG, C. ; VITS, E. ; GRUEBL, T. ; SAUER, S. ; WELLER, N. ; KEHE, K. ; HOLZAPFEL, F. ; LÜTH, T. ; KANZ, K. G. ; RITTINGHAUS, E. ; BIBERTHALER, P.: Ein neues Rettungskonzept für Schwerverletzte in militärischen und zivilen Großschadenslagen: DRONEVAC. In: *Notfall + Rettungsmedizin* (2023), August. <http://dx.doi.org/10.1007/s10049-023-01190-5>. – DOI 10.1007/s10049-023-01190-5. – ISSN 1434-6222, 1436-0578
- [4] FRITZSCH, Benjamin ; STONIS, Malte: Drohnen zum Materialtransport: Voraussetzungen und Wirtschaftlichkeit. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019), September, Nr. 9, S. 584–587. <http://dx.doi.org/10.3139/104.112134>. – DOI 10.3139/104.112134. – ISSN 2511-0896, 0947-0085
- [5] EISSFELDT, Hinnerk ; BIELLA, Marcus: The Public Acceptance of Drones – Challenges for Advanced Aerial Mobility (AAM). In: *Transportation Research Procedia* 66 (2022), S. 80–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.009>. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.12.009. – ISSN 2352-1465
- [6] THALHEIMER, Erich: Community Acceptance of Drone Noise. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* 263 (2021), August, Nr. 6, S. 913–924. <http://dx.doi.org/10.3397/IN-2021-1694>. – DOI 10.3397/IN-2021-1694. – ISSN 0736-2935
- [7] YANG, Y. ; LIU, Y. ; LI, Y. ; ARCONDOULIS, E. ; WANG, Y.: Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of an Isolated Multicopter Rotor During Forward Flight. In: *AAAJournal* 58 (2020), März, Nr. 3, S. 1171–1181. <http://dx.doi.org/10.2514/1.J058459>. – DOI 10.2514/1.J058459. – ISSN 0001-1452, 1533-385X
- [8] WALL, Berend G.: *Grundlagen der Hubschrauber-Aerodynamik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44400-9>. – ISBN 978-3-662-44399-6 978-3-662-44400-9