

Akustisches UAV-Tracking in 6 Freiheitsgraden für directionale Schallabstrahlungsmessungen

Leon Steinhoff¹, Carsten Spehr

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 37073 Göttingen, Deutschland, Email: leon.steinhoff@dlr.de

Einleitung

Die Nutzung von Drohnen oder UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) ist in letzter Zeit stark angestiegen. Prognosen zeigen ein Wachstum des Marktes auf über 50 Milliarden US-Dollar im weiteren Verlauf des Jahres 2026 [1]. Insbesondere in den Sektoren Logistik, medizinischer Versorgung, humanitärer Hilfe, Vermessungen, Polizei und Feuerwehr, Landwirtschaft, Foto- und Videografie oder auch freizeithlicher Nutzung ist ein deutlicher Anstieg der eingesetzten UAVs zu spüren. Diese Entwicklungen bedingen eine erhöhte Aussetzung mit dem als störend wahrgenommenem Fluglärm. Der durch UAVs verursachte Lärm unterscheidet sich von der klassischen Fluglärmbelastung bemannter Flugzeuge [2]. Da die meisten Drohnen deutlich kleiner und leiser als bemannte Luftfahrzeuge sind, werden sie tendenziell erst in kürzerer Entfernung wahrgenommen. Die abweichende Lärmsignatur, bei der die dominanten Töne höher sind als bei bemannten Luftfahrzeugen, führt zudem zu einer höheren Belästigung als durch tiefere Töne. Dies sind unter anderem die Gründe, warum die europäische Flugsicherheitsbehörde EASA Lärm als den wichtigsten Aspekt für die gesellschaftliche Akzeptanz von UAVs einstuft [3]. Für eine standardisierte Schallemissionsmessung veröffentlichte die EASA eine Richtlinie für Drohnen [4]. Hierbei wird allerdings nur eine einzelne Abstrahlungsrichtung gemessen. Eine wiederholbare und umfangreiche Vermessung der Schallemission von verschiedenen Drohnen ist daher in Bezug auf die Beurteilung der gesellschaftlichen Akzeptanz und Entwicklung von Zertifizierungsprozessen von großer Bedeutung. Ansätze für Messverfahren, um die directionale Schallabstrahlung zu erfassen, wurden bereits veröffentlicht [5], [6], ein geeignetes akustisches Verfahren zur Messung der Trajektorie der Drohne in 6 Freiheitsgraden wurde jedoch bisher nicht entwickelt. Neben der Position der Drohne zusätzlich noch die drei Lagewinkel zu messen, ist allerdings für die Bestimmung der directionalen Schallabstrahlung bei komplexen Flugmanövern unerlässlich, da sich bei Änderung der Fluglage auch die relative Richtung zu den Mikrofonen ändert. Die folgenden Forschungsergebnisse zeigen einen Ansatz mit dem es möglich ist, die Trajektorie einer fliegenden Drohne in 6 Freiheitsgraden zu bestimmen.

Versuchsaufbau

Die Messung fand am Nationalen Erprobungszentrum für Unbemannte Luftfahrt auf dem Flughafen von Cochstedt statt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen. Zwei Mikrofon Arrays kamen im Versuchsaufbau zum Einsatz. Das erste ist das Schallsphären-Array



Abbildung 1: Versuchsaufbau auf dem Vorfeld in Cochstedt. Zu sehen sind die zwei mit MEMS Mikrofonen bestückten Tore, das Tracking-Array rechts an der Seite und die Kameras.

„SA“ welches aus 184 MEMS Mikrofonen, die sich jeweils ringsum auf zwei Tore verteilen, besteht. Die Tore stehen in einem Abstand von etwa 4 Metern zueinander und haben eine Abmessung von 2 m Höhe und 3 m Breite. Der primäre Zweck dieses Arrays ist, die directionale Schallabstrahlung, also die Schallsphäre, von hindurchfliegenden Drohnen erfassen zu können. Ein zweites Array, das Tracking-Array „TA“, befindet sich an der Seite und dient der Vermessung der Trajektorie der Drohne. Es ist ein einzelnes Modul des am DLR für Windkanalversuche entwickelten MEMS-Arrays [7]. Das Tracking-Array hat eine Fläche von 1 x 2 m, 800 Mikrofone und ist so ausgerichtet, dass die Fläche des Arrays parallel zur Flugbahn steht. Außerdem wurde ein optisches Motion Tracking System verwendet, welches aus vier Global-Shutter Kameras mit 1-Zoll Sensoren und Objektiven mit einer Brennweite von 6 mm besteht. Die Kameras wurden auf den höher gebauten Trägern über den Mikrofonarray Toren montiert und so ausgerichtet, dass sie den Raum zwischen den zwei Toren abdecken. Zudem wurden LED Ringlichter zur gleichmäßigen Beleuchtung jeder Kamera an den Objektiven montiert. Das Messobjekt war eine etwa 3.5 kg schwere Quadcopter-Drohne der FAU Erlangen. Um die zwei Arrays und die Kameras in ein einzelnes Koordinatensystem zu bringen, wurden die Positionen und Ausrichtungen optisch eingemessen. Auch eine zeitliche Synchronisierung wurde mittels der Aufnahme der Kameratrigger auf beiden Mikrofon-Arrays gewährleistet.

Optisches Motion Tracking

Für das optische Tracking wurde ein Triangulationsverfahren mit vier Kameras verwendet. Die aufgeklebten

retro-reflektierenden Marker auf der Oberseite der UAVs werden von den Kameras durch die LED-Beleuchtung als helle Punkte wahrgenommen. Mit einer geeigneten Kalibrierung der optischen Verzerrung der Objektive können für jedes aufgenommene Bild drei Triangulationslinien von den Kameras aus aufgespannt werden. Ein Minimierungsalgorithmus findet dann die Position der Drohne anhand der bekannten relativen Position der aufgeklebten Marker. Die Kostenfunktion des Minimierungsalgorithmus ist in Formel (1) angegeben. Die drei Marker p_i werden mit einer Rotationsmatrix R und einem Translationsvektor t positioniert. Die Summe der quadrierten Abstände von den Markern zu allen 12 Triangulationslinien L_j ergibt den zu minimierenden Wert.

$$C_{op}(R, t) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{12} (\text{dist}(R \bullet p_i + t, L_j))^2 \quad (1)$$

Die Variablen des Minimierungsalgorithmus sind dabei die sechs Freiheitsgrade der Bewegung des UAVs. Diese sind die drei translatorischen Dimensionen x , y und z , die im Translationsvektor t enthalten sind, sowie die drei rotatorischen Dimensionen θ , ϕ und ψ , die in der Rotationsmatrix R enthalten sind und entsprechend das Nicken, Rollen und Gieren der Drohne beschreiben. Die Positionsbestimmung der Drohne wird nur für Zeitpunkte berechnet, für die alle vier Kameras alle drei Marker erkennen. Da dies nicht immer der Fall ist, werden fehlende Werte mit einer Spline-Interpolation ergänzt und geglättet. Die Ergebnisse des optischen Motion Trackings (OMT) dienen als „Ground Truth“ zur Validierung des akustischen Trackings. Sie sind als gestrichelte, schwarze Linien in den Ergebnissen (Abbildung 4 und 5) dargestellt.

Akustisches Tracking

Um die Trajektorie der Drohne akustisch nachzuverfolgen, werden Beamforming Ergebnisse für einzelne Zeitfenster berechnet. Für einen sinnvollen Vergleich des akustischen Trackings mit dem optischen Tracking wurde die gleiche Abtastrate (90 Hz) gewählt. Die Zeitfenster für das Beamforming sind mit 2048 Samples etwa 0.01 Sekunden lang. Das Beamforming wird auf einem dreidimensionalen, würfelförmigem Gitter mit einer Abmessung von 1.2 Metern und Auflösung von 41 Punkten pro Seite berechnet. Dies ergibt ein Gitter mit etwa 69000 Fokuspunkten. Um die Position und Lage der Drohne aus den Beamforming Ergebnissen zu gewinnen wird, wie auch beim optischen Tracking, ein Minimierungsalgorithmus eingesetzt. Dabei wird ein akustisches Modell der Drohne möglichst nah an die aus dem Beamforming identifizierten Schallquellen positioniert. Das akustische Modell besteht aus gewichteten Punkten, die an potentiell auftretende Schallquellorte gesetzt werden. Es sind verschiedene akustische Modelle denkbar (siehe Abbildung 2). Die entsprechende Kostenfunktion für die Minimierung ist in Formel (2) bzw. (3) angegeben. Die Rotationsmatrix R und der Translationsvektor t positionieren die Punkte p_i des Modells möglichst nahe an die Beamforming Quellen s_j . Zusätzlich gibt es eine Gewichtungsfunktion $w_{i,j}$, die die Gewichtung der Modellpunkte und

die relative Amplitude der Schallquellen beinhaltet. Bei Formel (2) werden die Distanzen zwischen den Modellpunkten zu allen Schallquellen aufsummiert, Formel (3) summiert nur die Distanzen zu den am Nächsten gelegenen Schallquellen. Die Kostenfunktion (3) ist dadurch unstetig, besitzt allerdings auch eine höhere lokale Positionierungsgenauigkeit.

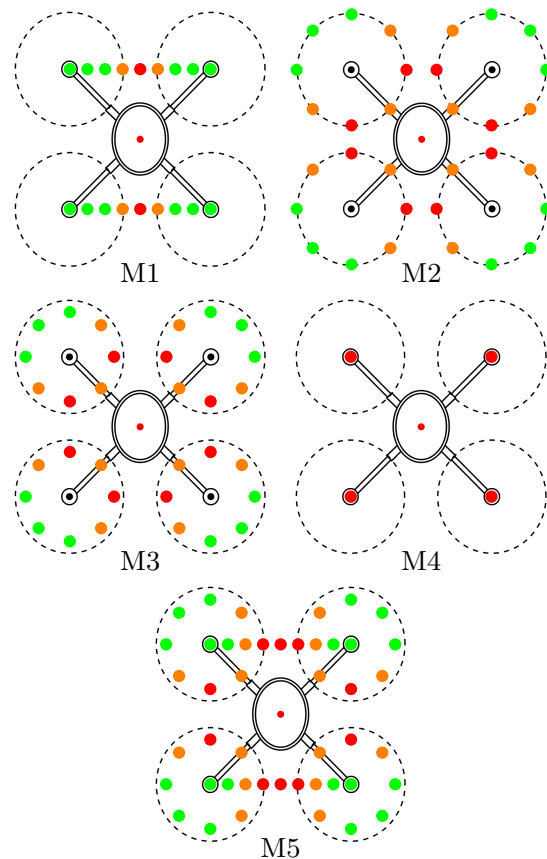


Abbildung 2: Übersicht über die akustischen Modelle. Diese werden als Schallmodell für das akustische Tracking benutzt. Die Punkte stellen jeweils einzelne Schallquellen dar. Die Gewichtung der Punkte ist farblich markiert. Grün = 0.5, Orange = 0.8, Rot = 1.

$$C_{a1}(R, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \text{dist}(R \bullet p_i + t, s_j)^2 \cdot w_{i,j} \quad (2)$$

$$C_{a2}(R, t) = \sum_{i=1}^N \min \left(\text{dist}(R \bullet p_i + t, s_j)^2 \cdot w_{i,j} \right) \quad (3)$$

Parameterstudie

Die Beamforming-Ergebnisse sowie das akustische Tracking werden durch viele verschiedene Parameter beeinflusst (z.B. Kostenfunktionen und akustische Modelle), daher wurde eine Parameterstudie zur Identifikation einer optimalen Parameterkombination durchgeführt. Die ausgewählten Parameter sind: **f_{range}**: der verwendete Frequenzbereich, **f_{weight}**: ob die Frequenzen gewichtet einfließen, **Kostenfunktion**: welche Kostenfunktion gewählt wird, **Algorithmus**: der verwendete Beamforming-Algorithmus, **Array**: das verwendete

Mikrofon-Array (hierbei sind auch Kombinationen aus den Ergebnissen von einzelnen Arrays möglich), **Modell**: das akustische Modell des UAVs (siehe Abbildung 2), **Modell_{weight}**: ob die Punkte des Modells gewichtet einfließen, **Modell_{dyn}**: ob das Modell statisch oder dynamisch (um die Hochachse zum Tracking Array ausgerichtet) benutzt wird, **K**: die Anzahl an extrahierten Quellen aus den Beamforming Ergebnissen und **r_s**: der Mindestabstand der extrahierten Quellen zueinander. Tabelle 1 gibt zusätzlich an, welche Werte für die einzelnen Parameter gewählt wurden.

Tabelle 1: Die für die Parameterstudie ausgewählten Parameter und ihre Werte.

Parameter	Werte
f_{range}	0-96, 6-55, 12-55, 24-55, 16-27 [kHz]
f_{weight}	gewichtet, ungewichtet
Kostenfunkt.	C_{a1} (2), C_{a2} (3)
Algorithmus	Conventional, Clean-SC [8], Functional [9]
Array	A1: TA, A2: SA, A3: TA+SA, A4: TA+0.5-SA
Modell	M1, M2, M3, M4, M5 (siehe Abbildung 2)
Modell _{weight}	gewichtet, ungewichtet
Modell _{dyn}	statisch, dynamisch
K	10, 20, 35, 50
r_s	0.1, 0.05, 0.01 [m]

Insgesamt ergeben sich 57600 Parameterkombinationen. Für jeden Parameterwert wurden die zugehörigen Kombinationen nach der erreichten Genauigkeit, also Abweichung vom optischen Tracking, sortiert und anschließend ein gewichteter Mittelwert berechnet. Die Gewichtung erfolgte mittels eines Hanning-Fensters, sodass hohe Genauigkeiten stärker und niedrige Genauigkeiten schwächer in den Mittelwert eingehen. Die resultierenden gewichteten Mittelwerte sind für jeden Parameter in Abbildung 3 dargestellt. Aus den gewonnenen Informationen über den Einfluss der Parameter auf die Tracking-Genauigkeit kann nun eine Parameterkombination gewählt werden, die einen Kompromiss zwischen der translatorischen und rotatorischen Genauigkeit bildet. Diese sind: **f_{range}**: 6-55 kHz, **f_{weight}**: gewichtet, **Kostenfunktion**: C_{a1} (2), **Algorithmus**: Conventional, **Array**: A1: TA, **Modell**: M5, **Modell_{weight}**: ungewichtet, **Modell_{dyn}**: statisch, K : 50 und r_s : 0.1 m.

Fazit

Die mit den ausgewählten Parametern erzielten Ergebnisse für das akustische Tracking sind in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Die mittleren Abweichungen zwischen akustischem Tracking und optischem Motion Tracking (OMT) sind in Tabelle 2 angegeben, ebenso wie die mittleren räumlichen Abweichungen. Die Parameterstudie ergab Kombinationen mit hoher translatorischer und rotatorischer Tracking-Genauigkeit. Mit dem in dieser Arbeit erläuterten Verfahren lässt sich eine fliegende Quadcopter-Drohne in 6 Freiheitsgraden lokali-

Tabelle 2: Genauigkeit des akustischen Trackings.

Dimension	mittlere Abweichung	räumliche Abweichung
x	2.6 cm	5.8 cm
y	3.8 cm	
z	2.2 cm	
θ	1.4 °	4.7 °
ϕ	3.0 °	
ψ	1.9 °	

sieren. Zukünftig wird das akustische Tracking verbessert, indem Bodenreflexionen und eine Dipolannahme im Beamforming-Algorithmus berücksichtigt werden. Zudem können mithilfe des akustischen Trackings directionale Schallabstrahlungen für verschiedene Drohnen und Flugmanöver berechnet werden, was Einblicke in die aeroakustische Schallentwicklung ermöglicht und für Auralisierungen nutzbar ist.

Literatur

- [1] Investing.com, URL: <https://de.investing.com/news/company-news/globaler-drohnenmarkt-soll-bis-2026-auf-uber-53-milliarden-usdollar-wachsen-93CH-3320711>
- [2] Kawai, C.; Jäggi, J.; Georgiou, F.; Meister, J.; Pieren, R.; Schäffer, B.: Short-term noise annoyance towards drones and other transportation noise sources: A laboratory study. Journal of the Acoustical Society of America, 2024
- [3] EASA: Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe. 2021
- [4] EASA: Guidelines on Noise Measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk). 2023
- [5] Go, Y.-J.; Choi, J.-S.: An Investigation of Multi-rotor Drone Noise Based on the Acoustic Hemisphere in an Actual Environment. International Journal of Aeronautical and Space Sciences 25:420–434, 2024
- [6] Herold, G.; Sarradj, E.: Gerichtete Schallabstrahlung einer Quadcopter-Drohne bei unterschiedlichen Flugzuständen. Tagungsband der DAGA 2023 369-372, Hamburg, 2023
- [7] Ernst, D.; Geisler, R.; Philipp, F.; Ahlefeldt, T.; Goudarzi, A.; Spehr, C.: Enhancing Aeroacoustic Wind Tunnel Studies Through Massive Channel Upscaling With MEMS Microphones. Tagungsband der AIAA/CEAS Aeronautics Conference, Rom, 2024
- [8] Sijtsma, P.: CLEAN based on spatial source coherence. International Journal of Aeroacoustics 357-374, 2007
- [9] Dougherty, R. P.: Functional Beamforming. Berlin Beamforming Conference, Berlin, 2004

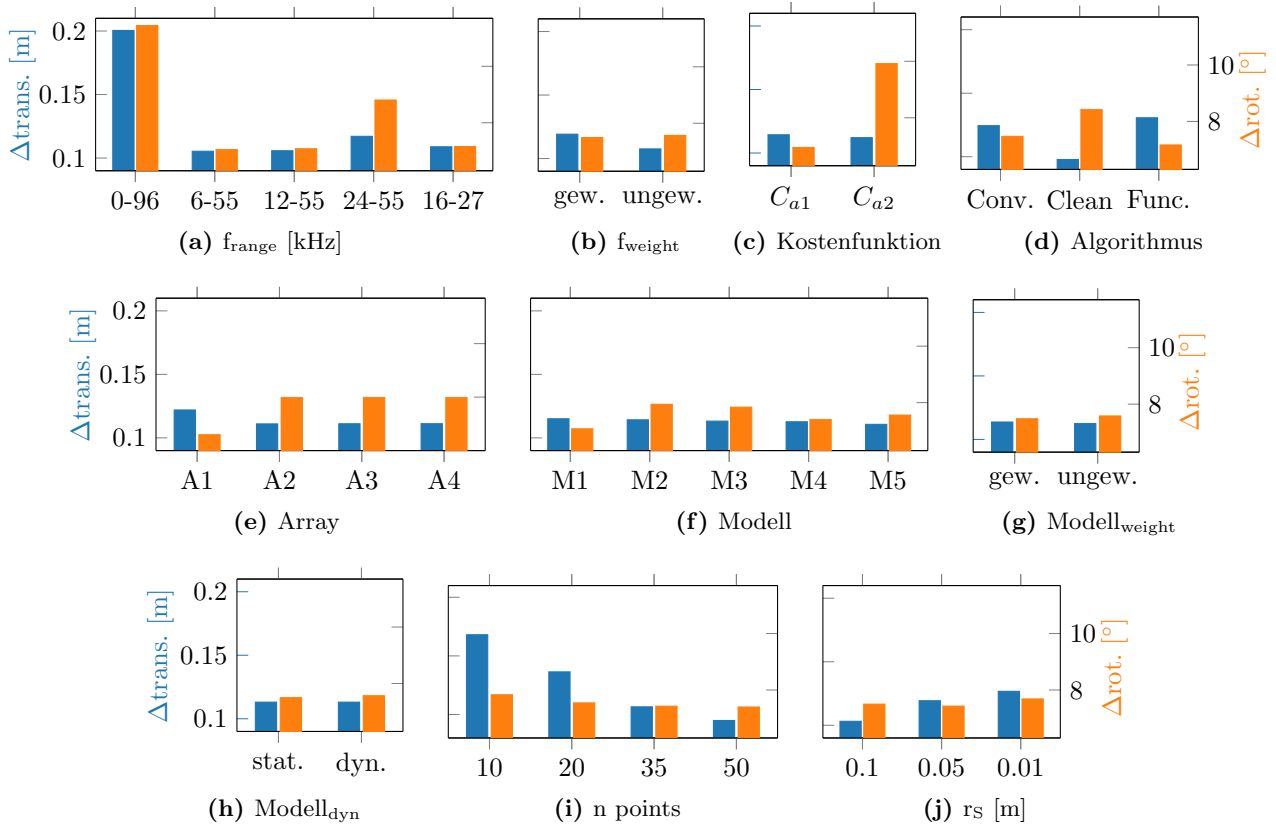


Abbildung 3: Gewichtete Mittelwerte der Abweichung vom akustischen Tracking zum optischen Motion Tracking. Die Ergebnisse sind für jeden Parameter translatorisch und rotatorisch getrennt.

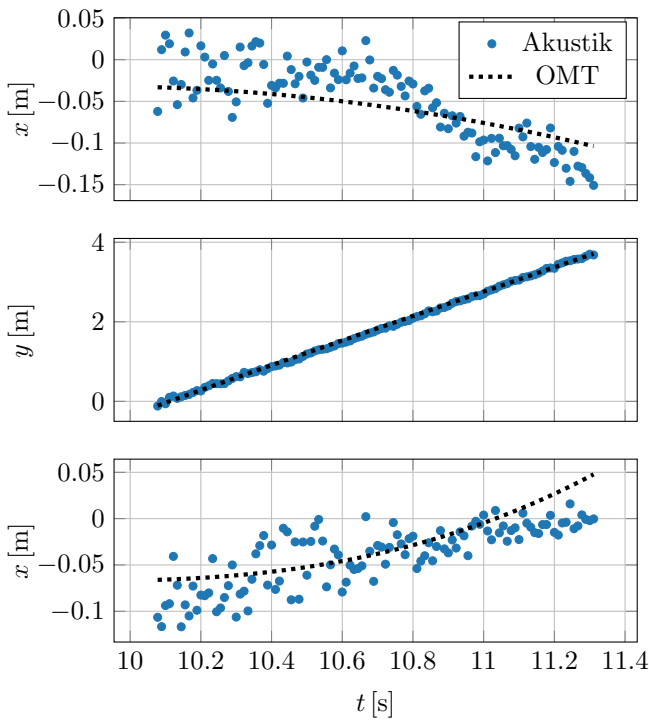


Abbildung 4: Translatorische Ergebnisse des akustischen UAV Trackings im Vergleich zum optischen Motion Tracking (OMT). Die Flugrichtung der Drohne war entlang der y -Achse.

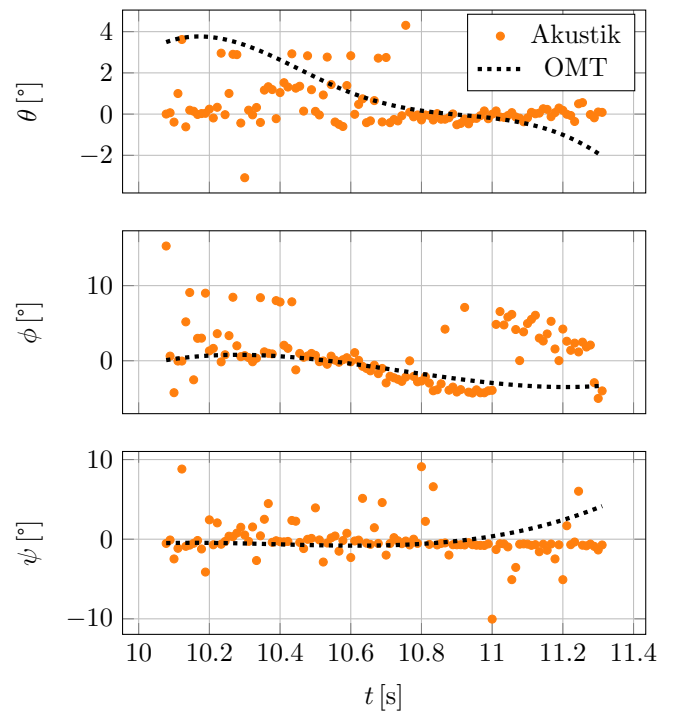


Abbildung 5: Rotatorische Ergebnisse des akustischen UAV Trackings im Vergleich zum optischen Motion Tracking (OMT).