Analyse akustischer Emissionen und Profile ziviler Drohnen

Jonas Klug[1,2], Danilo Hollosi[1], Andreas Volgenandt[1], Christian Rollwage[1], Joerg Bitzer[1,2]
[1] *Projektgruppe für Hör-, Sprach- und Audiotechnologie des Fraunhofer IDMT, Oldenburg*
[2] *Institut für Hörtechnik und Audiologie, Jade Hochschule, Oldenburg*

Einleitung

Unbemannte Fluggeräte, auch UAV (unmanned areal vehicles) oder ugs. Drohnen genannt, erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Aufgrund miniaturisierter Regelungstechnik, konnten in den letzten Jahren immer leistungsfähigere Geräte konstruiert und diese zu sehr geringen Preisen angeboten werden. Drohnen existieren in unterschiedlichen Größen und in unterschiedlicher Anzahl an Rotoren. Eine gängige Größeneinteilung erfolgt in die Klassen nano (sehr kleine, taktische oder aber auch Spielzeugdrohnen), micro (mittlere Größe, von FPV-Racecopter bis ca. 25 kg Gesamtgewicht) und militärische Drohnen (alles oberhalb von 25 kg).Ein Gefahrenpotential durch illegale Nutzung stellen aufgrund des Preises und der Verfügbarkeit vor allem micro-UAV dar. Die Zunahme der, zum Teil illegalen, Drohnen-Nutzung, wirft sicherheitspolitische Fragen auf. Es ergeben sich neue Szenarien bezüglich des Schutzes der Privatsphäre, der Industriespionage, aber auch bezüglich Schmuggel und Terror. Eine erfolgreiche Abwehr lässt sich nur realisieren, wenn die Fluggeräte sicher detektiert werden können. Hierbei kommt der Verwendung akustischer Sensoren eine wesentliche Rolle zu, da diese im Gegensatz zu einigen anderen Modalitäten kostengünstiger und in unübersichtlichen, urbanem Gelände gewisse Vorteile bieten.[1]
Für eine akustische Detektion ist es sinnvoll, möglichst viel Wissen über die Drohnen in einen automatischen Erkenner einfließen zu lassen. Da bisher wenig über die speziellen akustischen Charakteristika bekannt ist, wurden unterschiedliche Drohnenmodelle auf ihre grundsätzlichen akustischen Eigenschaften untersucht: Zeitliche Struktur, Spektrale Merkmale und das Abstrahlverhalten. Besonders das Abstrahlverhalten stellt eine wichtige Komponente zur automatischen Detektion der UAV dar, da bei Ausprägung bestimmter Vorzugsrichtungen die Detektionsleistung von der Lage der Drohne und der relativen Position zum Mikrofon abhängt.

Little Spyder Align M480L FPV

Abbildung 1: Gemessene Quadrokopter -Modelle

Im Folgenden werden drei Quadcopter-Modelle (Abb. 1) exemplarisch aus dieser Kategorie untersucht. Hierbei handelt es sich um einen selbstgebauten FPV-Racingcopter (25 cm Durchmesser), eine SkyHero LittleSpyder (45 cm Durchmesser) und einen Align M480L (85 cm Durchmesser).

Messaufbau

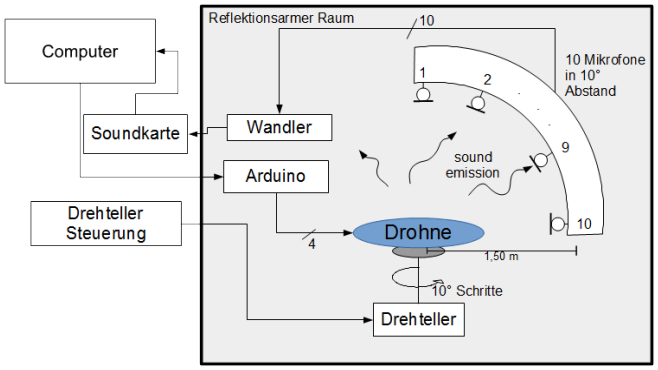


Abbildung 2: Messaufbau Richtcharakteristik von Drohnen.

Abb. 2 zeigt den genutzten Messaufbau für alle drei Messreihen. Um in einer für den realen Einsatz ausreichenden Genauigkeit sämtliche Messparameter zu erfassen, wurde in Azimut-Richtung und in der Elevation eine Winkelauflösung von 10° gewählt. An einem hölzernen Viertelkreisbogen mit 1,50 m Radius, wurden 10 Mikrofone mit Windfellen so befestigt, dass Aufnahmen mit Elevationswinkeln von 0 bis 90° möglich waren. Die zu messenden Drohnen wurden einmal in der natürlichen Ausrichtung und einmal kopfüber mit einer 10° Rasterung auf einem Drehteller im Zentrum des Mikrofonarray eingespannt. Für jede Winkelposition wurde die Ansteuerung der einzelnen Rotoren wiederholt, während die Mikrofone den abgestrahlten Schall aufnahmen. Die Ansteuerung der Motordrehzahlregler erfolgte mittels eines Arduino-Mikrocontrollers über Pulsweiten modulierte Signale (PWM), da die UAV-eigene Flugsteuerung keine reproduzierbaren Signale in den gegebenen Messsituationen geliefert hätte (vergleiche 3 für den Aufbau der technischen Ansteuerung). Als reproduzierbare Flugprofile wurden zehn schneller werdende Geschwindigkeiten für einen und vier Propeller aufgeprägt. Des Weiteren wurden die Flugmanöver Rechtsdrehung und Rechtskippen simuliert.

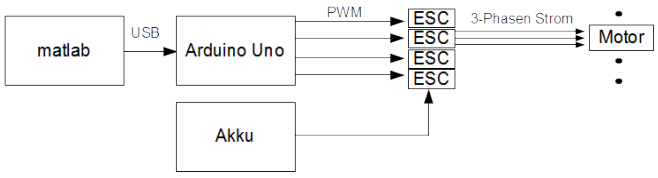


Abbildung 3: Konzept der Drohnenansteuerung.

Die Steuerdaten des Mess-Skriptes werden von einem Arduino in PWM-Signale umgesetzt (Abb. 3), die Electronic Speed Controle (ESC) interpretiert diese und sendet einen 3-phasigen Strom, der für die gewünschte Drehzahl der bürstenlosen Motoren sorgt.

Ergebnisse

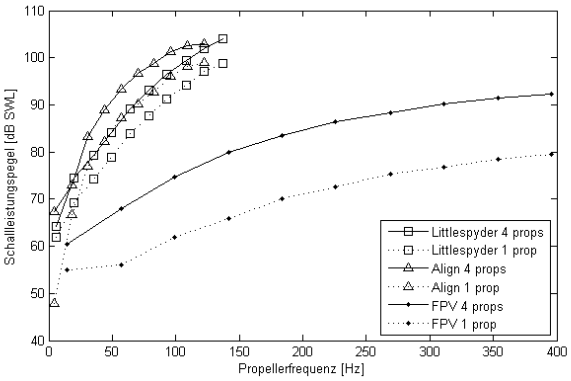


Abbildung 4: Schallleistungspegel der verschiedenen Drohnenmodelle für einen bzw. 4 Propeller.

Abb. 4 zeigt für ansteigende Drehfrequenzen den gemessenen Schalldruckpegel. Es zeigt sich der erwartete Anstieg mit steigender Frequenz. Der Unterschied zwischen einem und vier Rotoren als Quelle ist ebenfalls deutlich sichtbar, wobei sich für die LittleSpyder und die Align ein 6 dB Unterschied ergibt und für die FPV Drohne 12 dB. Dies lässt darauf schließen, dass die kleinere Drohne trotz der vier Rotoren als eine kohärente Quelle messtechnisch erfasst wird.

Zeitliche Struktur

Bei der Analyse des Zeitsignals der verschiedenen Drohnen (Abb. 5) zeigt sich eine ausgeprägte Pulshaftigkeit. Wie in [2] erwähnt, ist zu erkennen, dass diese sich in Abhängigkeit von Länge und Materialdicke der Rotoren stärker ausprägt. Hinzu kommt die höhere Drehzahl von kleinen Propellern, sodass ein größerer Rauschanteil vorliegt. In realen Flugsituationen kann durch Dispersion und anderer Filtereffekte der Luft die Pulsform deutlich weniger ausgeprägt sein. Abbildung 6 zeigt beispielhaft einen realen Flug der Align-Drohne.

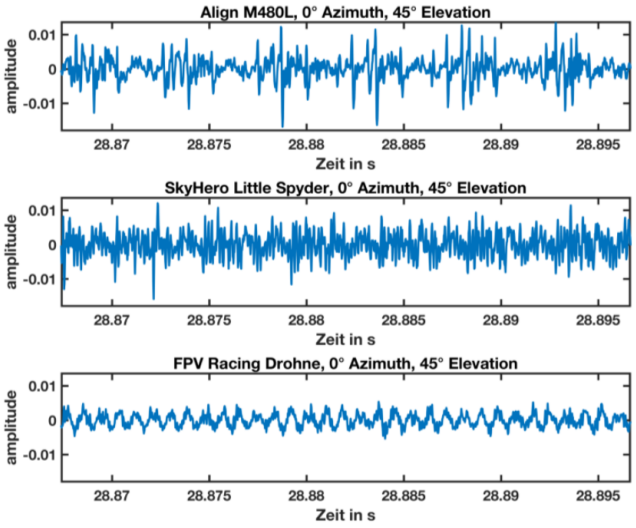


Abbildung 5: Zeitsignale der unterschiedlichen UAV

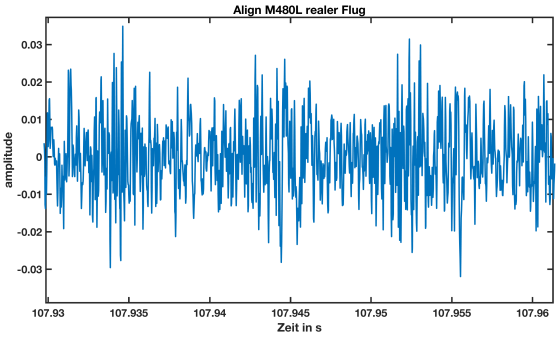


Abbildung 6: Zeitsignale der Align im Fernfeld (realer Flug)

Spektrale Struktur

Spektral setzt sich der emittierte Schall aus Rauschen, pulshaften Anteilen (Harmonische, bedingt durch die Propeller Drehfrequenz) und tieffrequenten Windgeräuschen zusammen. Wie erwartet und im Spektrogramm (Abb. 7) zu sehen, werden die Pulse zu markanten Spektrallinien bei den Propellerfrequenzen und deren Harmonischen. Diese Harmonischen verschieben sich mit höheren Propellerdrehzahlen in höhere Frequenzbereiche. Je höher die Propellerdrehzahl und je höher der Frequenzbereich, desto verrauschter sind die Schallemissionen.

Ausnahme bildet die hohe Schallabstrahlung durch das Steuersignal zwischen Electonic Speed Control (ESC) und Brushless Motor (BM), die für die LittleSpyder und FPV Drohne nachgewiesen werden konnte (Abb. 8). Für hohe Drehzahlen wird der 16 kHz Ton überlagert durch andere Fluggeräusche.
Bei einem realen Flug (Abb. 9) sind die meisten Harmonischen weniger stark ausgeprägt, im Gegensatz zu den statischen Ansteuerungen der Propeller des Messaufbaus zeigt sich im Bereich von 5 bis 14 kHz eine pulsierende Pegelveränderung, die durch die ständige Regelung der Motoren zu erklären ist.

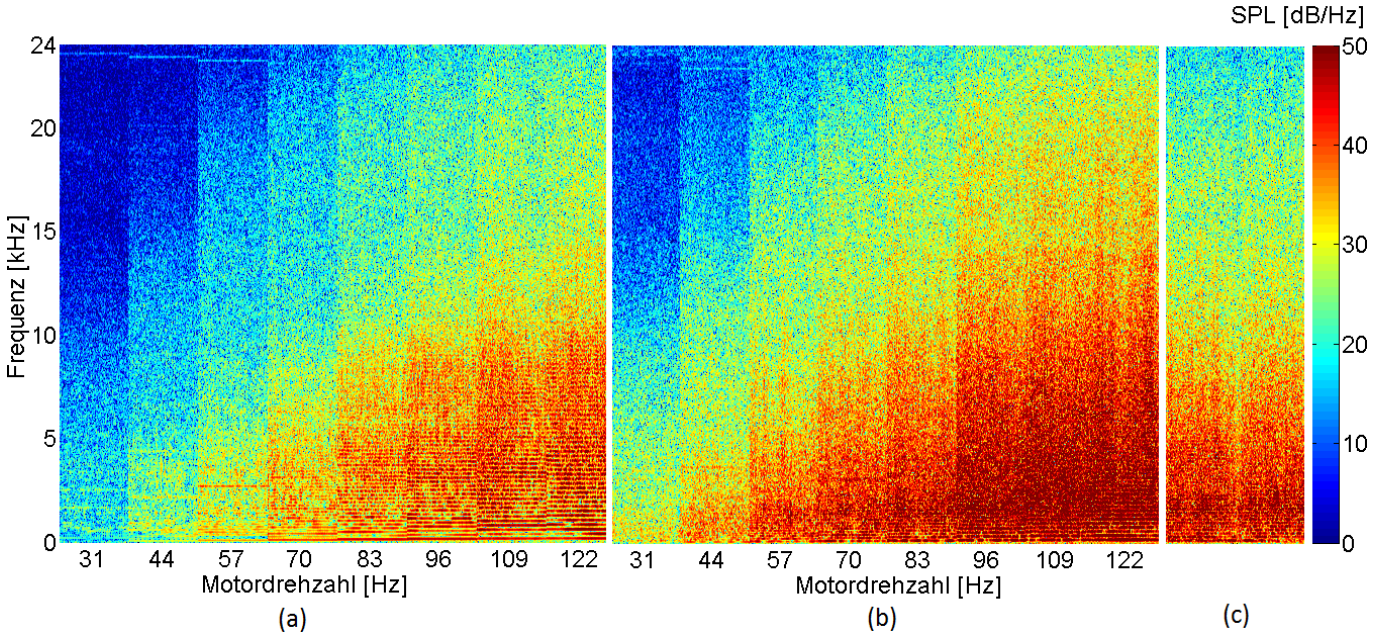


Abbildung 7: Spektrogramm für die ALign Drohne für eine bestimmte Richtung. (a) schneller werdende Drehzahlen für einen Propeller (b) schneller werdende Drehzahlen für vier Propeller (c) asynchron laufende Propeller für Rechtsdrehung und Rechtskippen (jeweils 44 und 57 Hz)

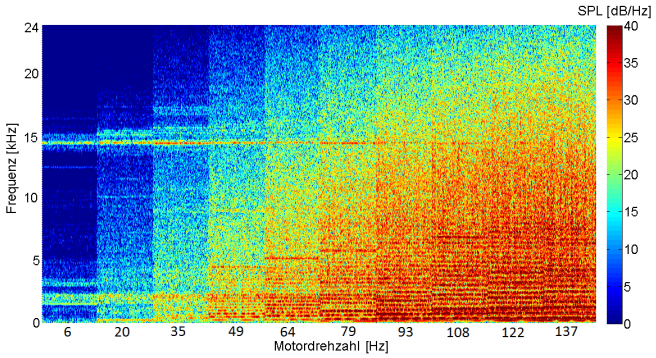


Abbildung 8: Spektrogramm für ein Flugprofil für eine bestimmte Richtung. Von links nach Rechts ist die Drehzahl der 4 Propeller dargestellt.

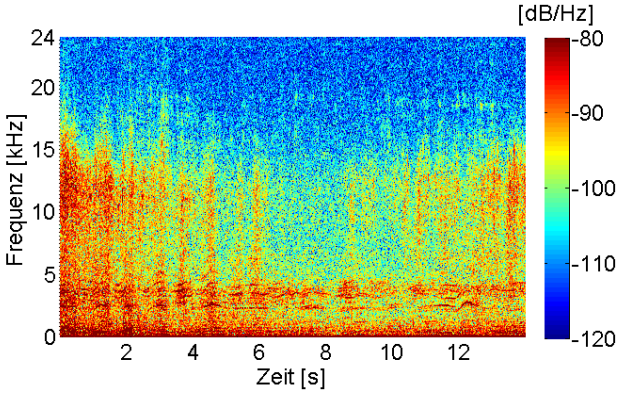


Abbildung 9: Spektrogramm eines realen Fluges der Align Drohne. Erkennbar sind impulsartige Pegelanstiege mit der veränderlichen Propellerfrequenz und die sich damit verändernden Harmonischen.

Abstrahlcharakteristik

Das in Abbildung 10 gezeigte frequenzabhängige Bündelungsmaß weist im niederfrequentem Bereich hohe Schalldruckpegel und eine hohe Richtwirkung auf. Diese ist durch den Propellerwind nach unten gerichtet und hat wenig Einfluss auf das Fernfeld. Mit einem Directivity Index (DI) von 6 dB (10 dB für Oktavbänder) zeigt sich auch für den höherfrequenten Bereich ab 600 Hz eine Richtwirkung.

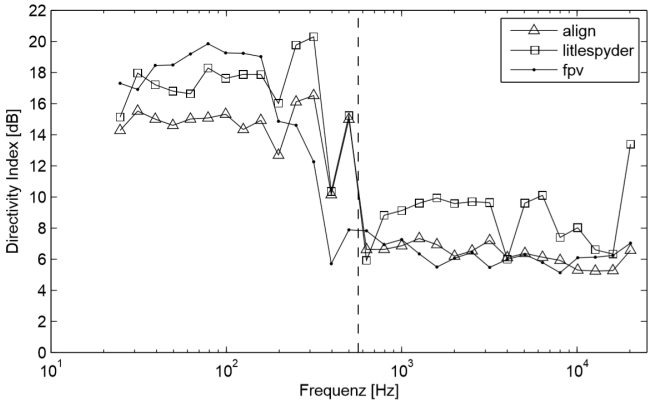
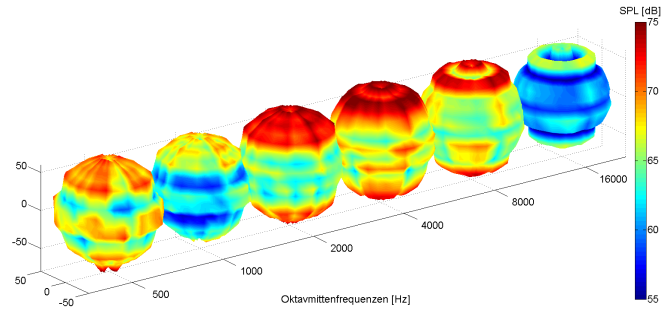
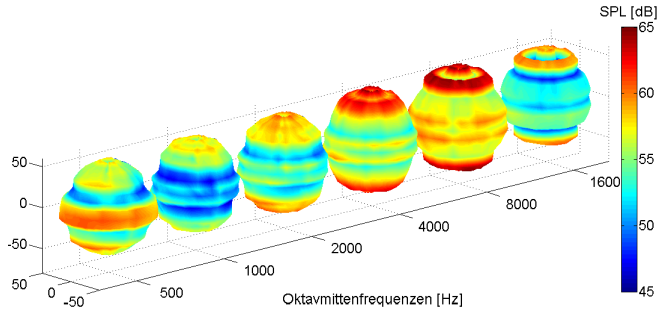


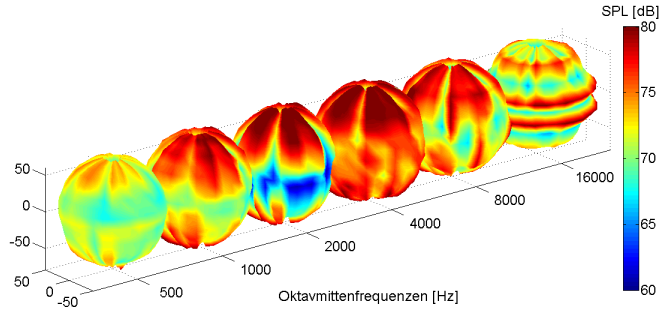
Abbildung 10: Bündelungsmaß (Directivity Index) in dB mit der Referenzachse bei p_{max} für alle Terzbänder (über alle Frequenzen gemittelt) bei höchster Fluggeschwindigkeit (Qualitativ/Verlauf für alle Geschwindigkeiten ähnlich).



(a) Align



(b) FPV



(c) LittleSpyder

Abbildung 11: Richcharakteristik für verschiedene Oktavbänder der gemessenen Drohnen bei höchster Drehzahl aller Propeller. Über alle Frequenzen zeigt sich eine Hauptabstrahlrichtung nach oben und unten sowie leicht in die Horizontalebene.

Insgesamt zeigt sich in Abb. 11 über alle Frequenzen eine Hauptabstrahlrichtung nach oben und unten. Für keinen Azimut-Winkel lässt sich eine besondere Richtwirkung erkennen, nur bei der LittleSpyder zeigen sich für die Rotorwinkel leicht höhere Pegel. Die geringste Abstrahlung (ca. -10 dB) weisen die gemessenen Drohnen für ± 30° von der Horizontalen auf, d.h. ein Anflug in diesem Elevationswinkel könnte die Detektion erschweren. Durch die Luftabsorption der hohen Frequenzen und die Rauschhaftigkeit in diesem Frequenzbereich eignet sich mit Hinblick auf eine Detektion im Bereich 50 bis 100 m vor allem der Frequenzbereich zwischen, 500 Hz und 4 kHz. Innerhalb dieses Bereiches bilden sich Harmonische die mit Veränderung der Propeller-Drehfrequenz pulsierende Richtcharakteristiken ausbilden.

Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag konnten einige Annahmen bezüglich der akustischen Abstrahlung von Quadkoptern bestätigt werden. Es zeigen sich zum einen harmonische Strukturen durch die Propeller-Drehfrequenzen, zum anderen aber auch die starken rauschhaften Anteile durch die Überlagerung der vier Rotoren, die bei Realflügen modulierten Steuerfrequenzen und die Übertragung des Signals durch das Medium Luft. Die für eine akustische Detektion wichtige Abstrahlcharakteristik zeigt im Nahfeld nur die Besonderheit der nach unten gerichteten Direktivität durch den Propellerwind. Im Fernfeld kann von einer kugelförmigen Quelle ausgegangen werden. Im Weiteren ist zu untersuchen, wie unter realen Bedingungen die akustische Detektion optimiert werden kann, um für den besonderen Fall der Drohnen als Schallquelle eine sichere Detektion, Verifikation und Lokalisation zu erhalten.

Literatur

[1] Hollosi, D., Nagy, G., Rodigast, R., Goetze, S. and Cousin, P. (2013). Enhancing Wireless Sensor Networks with Acoustic Sensing Technology: Use Cases, Applications & Experiments. IEEE International Conference on Internet of Things (iThings2013), Beijing, China, August 2013

[2] Mueller,Arnold W.; Childress, Otis S.; Hardesty, Mark : Helicopter Main-Rotor Speed Effects on Far-Field Acoustic Levels. NASA Technical Memorandum 100512, Oktober 1987