

Vergleichende akustische Untersuchung von Drohnen-Propellern

Konrad Oeckel, Jan Heimann, Dr. Sven Angermann, Michael Kerscher, Dr. Andreas Frahm, Gunnar Heilmann, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rüther-Kindel

Zusammenfassung

Die Reduzierung von Fluglärm ist eine der wesentlichen Herausforderungen der Luftfahrtindustrie. Dies betrifft ebenso unbemannte Luftfahrtsysteme, die zukünftig eine signifikante Rolle im alltäglichen Leben spielen werden. In diesem Zusammenhang wurde im Fachgebiet Luftfahrttechnik der TH Wildau das energetische Potential von Winglets an Propellern („Proplets“) untersucht, deren Einsatz sowohl eine Verbesserung der aerodynamischen Effizienz als auch eine Minderung der Geräuschemission versprochen. Daher musste der akustische Einfluss dieser Proplets präzise bestimmt werden.

In diesem Beitrag wird erstmals die Geräuschemission eines mit Proplets ausgerüsteten Propellers mit einem Referenzpropeller verglichen. Beide Prüftücke sind, abgesehen von den Blattspitzen, identisch. Neben normgerechten, herkömmlichen Messungen der Schallleistungspegel sowie psychoakustischer Eigenschaften werden beide Prüfstücke mit einem Mikrofon-Array („Akustische Kamera“) untersucht, um die Lärmquellen entlang der Propellerblätter zu visualisieren. Hierfür wird erstmals ein virtuell mitrotierendes Array angewendet, um die aero-akustischen Quellen am stehenden Blatt zu identifizieren.

Schlagworte: Fluglärm, Propellerlärm, Winglets, Proplets, Akustische Kamera, Schallquellenlokalisierung, rotational beamforming

Abstract

The reduction of aircraft noise is one of the major challenges of the aviation industry. This also concerns unmanned aerial vehicles (UAVs), since they will play an increasingly important role in everyday life. In the context of the presented project the energetic potentials of winglets at propeller tips ("proplets") were investigated in order to increase the aerodynamic efficiency and decrease the noise emission of propellers. Therefore it was necessary to determine the acoustic effects of the attached proplets.

This paper compares the noise emission of a reference propeller with a proplet-equipped propeller for the first time. Except for the tips, they were identically designed. The acoustic power level of both propellers was determined and the results are assessed psycho-acoustically. Additionally an examination of the test pieces with a spaced microphone array ("Acoustic Camera") was conducted to visualize the localization of sound sources on the propellers. A rotational beamforming filter was applied to precisely identify the positions of the rotating aero-acoustic sources.

Keywords: propeller noise, winglets, proplets, propeller design, sound source localization, rotational beamforming

1. Einführung und Ziel der Arbeit

Die unbemannte Luftfahrt hat in den vergangenen Jahren einen beispiellosen Siegeszug angetreten. Im Jahre 2017 wurden weltweit bereits mehr als 3,5 Millionen UAVs (*unmanned aerial vehicles* – unbemannte Flugsysteme) verkauft, während auch industrielle Anwendungen wie Paketzustelldrohnen erprobt und eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang konnte eine kürzlich veröffentlichte Studie der NASA allerdings ein signifikantes Ablehnungsverhalten der europäischen sowie US-amerikanischen Bevölkerung in Bezug auf das für UAVs typische, hochfrequente Fluggeräusch feststellen – auch im direkten Vergleich zu Straßenverkehrslärm.

Der Hauptanteil des Fluggeräusches, sowohl bei Multikoptern als auch bei konventionellen Tragflügeldrohnen, wird durch die Propeller emittiert. Aus diesem Grunde muss die akustische Verbesserung an dieser Baugruppe ansetzen, um die allgemeine Akzeptanz für UAVs zu steigern.

In der jüngeren Vergangenheit wurden bereits einige Ansätze verfolgt, um den oben genannten Fluglärm zu mindern: Aufrauhn der Blattoberfläche, Ausfransen der Blatthinterkante oder die Nutzung von Proplets. Bis heute konnten allerdings die akustischen Potentiale dieser Ansätze nicht zweifelsfrei vermessen oder verglichen werden. In diesem wissenschaftlichen Beitrag wird nun zum ersten mal eine akustische Untersuchung umgesetzt, die einen mit Proplets ausgestatteten Propeller mit einem Referenzpropeller vergleicht. Mit Ausnahme der Blattspitzen weisen beide Propeller eine identische Geometrie auf. Sie wurden im Rahmen des Projektes SAPODS (*Smart Airbourne Pollutants Detection System*) im Fachgebiet Luftfahrttechnik der Technischen Hochschule Wildau gefertigt, um als Teil des Antriebssystems der fachgebietseigenen Messdrohne ATISS (*Autonomous Testbed for Integrated Sensor Systems*) Flughöhen von ca. 5.000 Meter zu erreichen.

In diesem Beitrag werden die akustischen Eigenschaften beider Propeller zunächst mit herkömmlichen Messmethoden untersucht. Hierzu gehört eine normgerechte Schallleistungsvermessung sowie eine psychoakustische Bewertung. Für einen umfassenderen Einblick in den Entstehungsmechanismus des Propellergeräusches zu gewinnen, ist es aber notwendig, die Schallquellen am Propellerblatt frequenzabhängig begutachten zu können. Aus diesem Grunde wird im Anschluss eine Untersuchung mit einer Akustischen Kamera vorgenommen. Dieses audiovisuelle Messsystem wurde im letzten Jahr um einen neuartigen Filter erweitert, mit dem nun die Schallentstehung von schnell rotierenden Objekten auf das stehende Objekt projiziert werden können. Somit kann nun erstmals eine präzise Begutachtung des Propellerlärms vorgenommen werden.

2. Beschreibung der Prüfstücke

Beide Propeller wurden im Rahmen der Doktorarbeit von Dr. Sven Angermann und der Masterarbeit von Fabian Quaeck konstruiert und gefertigt. Es handelt sich um

Faltpropeller, die für eine Messdrohne mit einem maximalen Abfluggewicht von 25 kg entworfen wurden. Das gesamte Antriebssystem wurde für Flughöhen bis circa 5.000 m ausgelegt (Quaack 2016). Alle geometrischen Kenngrößen sind jeweils identisch:

- Propellerdurchmesser: 22" / 558,8 mm
- Propellersteigung: 19" / 482,6 mm
- Blattanzahl: 2

Beide Propeller wurden in Negativformbauweise als Nass-in-nass-Laminate aus kohlefaserverstärktem Kunststoff gefertigt. Die Negativformen verfügen über eine austauschbare Spitze, sodass die Profile entlang der Propellerblätter – und damit Kenngrößen, die den Gesamtschall des Propellers beeinflussen können, wie Blattdicke oder Wölbung – ebenfalls identisch sind. Die aerodynamische Effizienz der Propeller konnte durch verschiedene CFD-Testreihen überprüft werden (Angermann 2016).

Außerdem konnte Sven Angermann durch die Simulationsreihen die vielversprechendste Proplet-Konfiguration festlegen:

- Typ: Blended Proplet
- Höhe: 30 mm
- Neigungswinkel: 0°
- Krümmung: 0 mm

Nachstehende Abbildung zeigt die 3D-Modelle beider für diesen Beitrag maßgeblichen Propeller.



Abb. 1: Referenzpropeller und Propletpropeller (Angermann 2016)

Beide Propeller wurden auf dem Prüfstand für Elektroantriebe *PRELA* des Fachgebiets Luftfahrttechnik der TH Wildau untersucht, um die Simulationsergebnisse zu verifizieren. Entgegen der Hypothese, dass die Proplets einen positiven aerodynamischen Effekt bewirken, konnte bei diesen Prüfstandsversuchen ein geringfügig schlechterer Schubwirkungsgrad des Propletpropellers festgestellt werden.

Bei den oben beschriebenen Versuchen trat allerdings ein weiterer Effekt zu Tage: Von sämtlichen anwesenden Mitgliedern des Fachgebiets konnte ein wesentlich angenehmerer und weniger schneidender Klang des Propletpropellers festgestellt werden. Aus diesem Grunde sollen beide Propeller einer umfassenden akustischen Untersuchung unterzogen werden.

3. Bestimmung der Schalleistungspegel

Der erste Schritt einer vergleichenden akustischen Begutachtung ist die Bestimmung des Schalleistungspegels des Prüfobjekts, mithin die von sämtlichen Störeinflüssen bereinigte Schallenergie des Erzeugers. In diesem Beitrag wurde das Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 nach (DIN 3747:2011) angewendet. Dieses Verfahren schreibt mindestens vier Messpositionen auf einer Halbkugel rund um das Prüfobjekt verteilt vor. Bei der Vermessung der Propeller wurden fünf Messpositionen im Abstand von 40° aufgezeichnet. Damit konnte verhindert werden, dass sich die fünfte Messposition im Abwindfeld des Propellers befindet, wodurch die Messung aufgrund der auftretenden Luftmassenströme

verfälscht worden wäre. Die Distanz zu den Propellern betrug jeweils 1,50 m (siehe Abbildung 2).

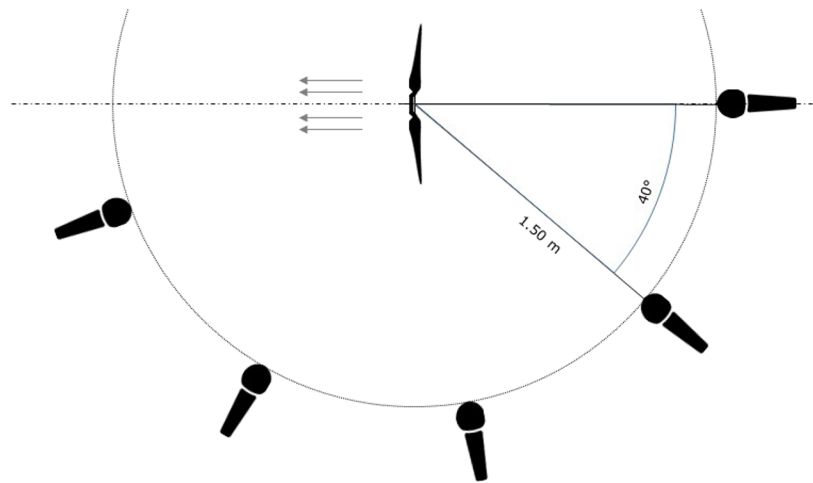


Abb. 2: Schematische Darstellung des Hüllflächenmessverfahrens

Aus den an den Messpositionen aufgezeichneten Schalldruckpegeln konnten unter Berücksichtigung verschiedener in der Norm festgelegter Korrekturfaktoren für Umgebungsgeräusche oder Messraumcharakteristika die Schallleistungspegel für beide Propeller errechnet werden. Wie in nachstehender Tabelle zu sehen ist, wurde dieser Parameter über den kompletten Drehzahlbereich des Antriebssystems bestimmt.

Drehzahl	Schallleistungspegel Referenzpropeller	Schallleistungspegel Propletpropeller
2.500	92,5	93,3
3.000	94	96,1
3.500	97,6	98,1
4.000	100	101
4.500	102	104

Obwohl die Differenz beider Schallleistungspegel nicht mehr als etwa 2 dB pro Drehzahl beträgt, ist die Geräuschemission des Propletpropellers nachweislich etwas höher. Außerdem ist ein linear Zusammenhang der errechneten Schallpegel ersichtlich (siehe Abbildung 3). Der Arbeitsbereich des Antriebssystems wurde bei

diesen Messungen fast vollständig abgedeckt, womit ausgeschlossen werden kann, dass sich die akustischen Eigenschaften des Propletpropellers in einem anderen Drehzahlbereich verändern.

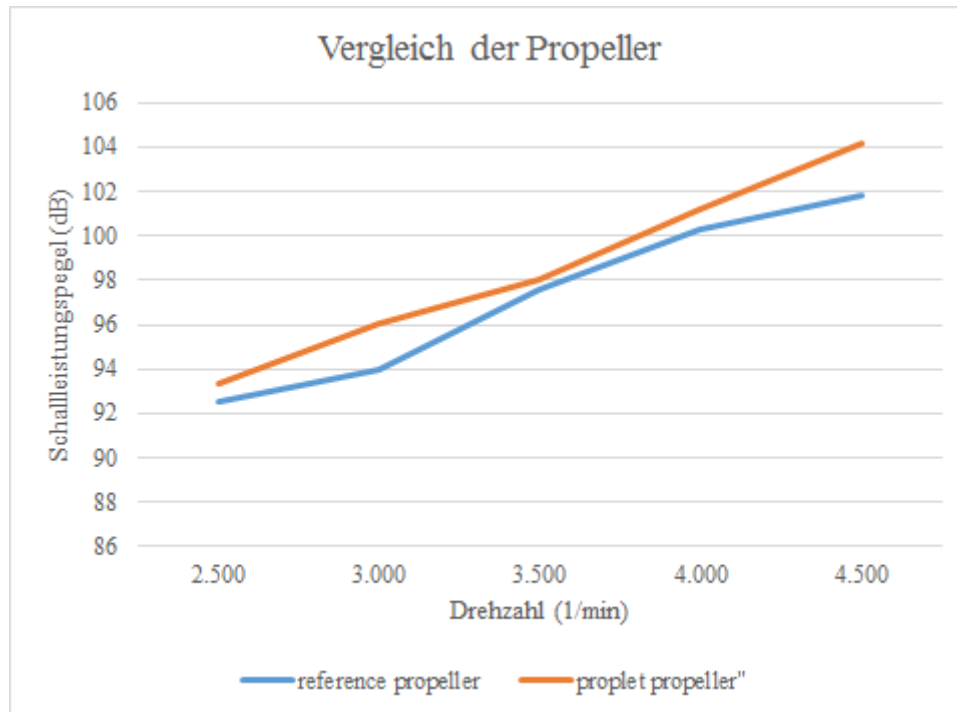


Abb. 3: Vergleich der Schallleistungspegel beider Propeller

Analog zu den Ergebnissen der aerodynamischen Prüfstandsversuche (Angermann 2016) kann also auch hier festgestellt werden, dass die Proplets einen negativen Einfluss auf die Gesamtschallerzeugung des Propellers haben.

4. Psychoakustische Bewertung

Eine Betrachtung der psychoakustischen Eigenschaften der Propeller verspricht Aufschluss über die subjektive Wahrnehmung der Propellergeräusche. Aus diesem Grunde wurden die Geräusche der Propeller bei den oben beschriebenen Versuchen über einen Zeitraum von jeweils 30 Sekunden aufgezeichnet. Somit ist es möglich den Frequenzverlauf der Propeller hinsichtlich des menschlichen Hörvermögens zu begutachten.

4.1. Frequenzspektren

Aus den *Kurven gleicher Lautstärke* (DIN 226:2003) geht hervor, dass der Mensch Schallereignisse im Bass- bzw. Hochtonbereich deutlich schlechter wahrnehmen kann, als im Mittentonbereich (siehe Abbildung 4). Allerdings sinken die Verträglichkeitsschwellen in diesen Randbereichen deutlich schneller ab.

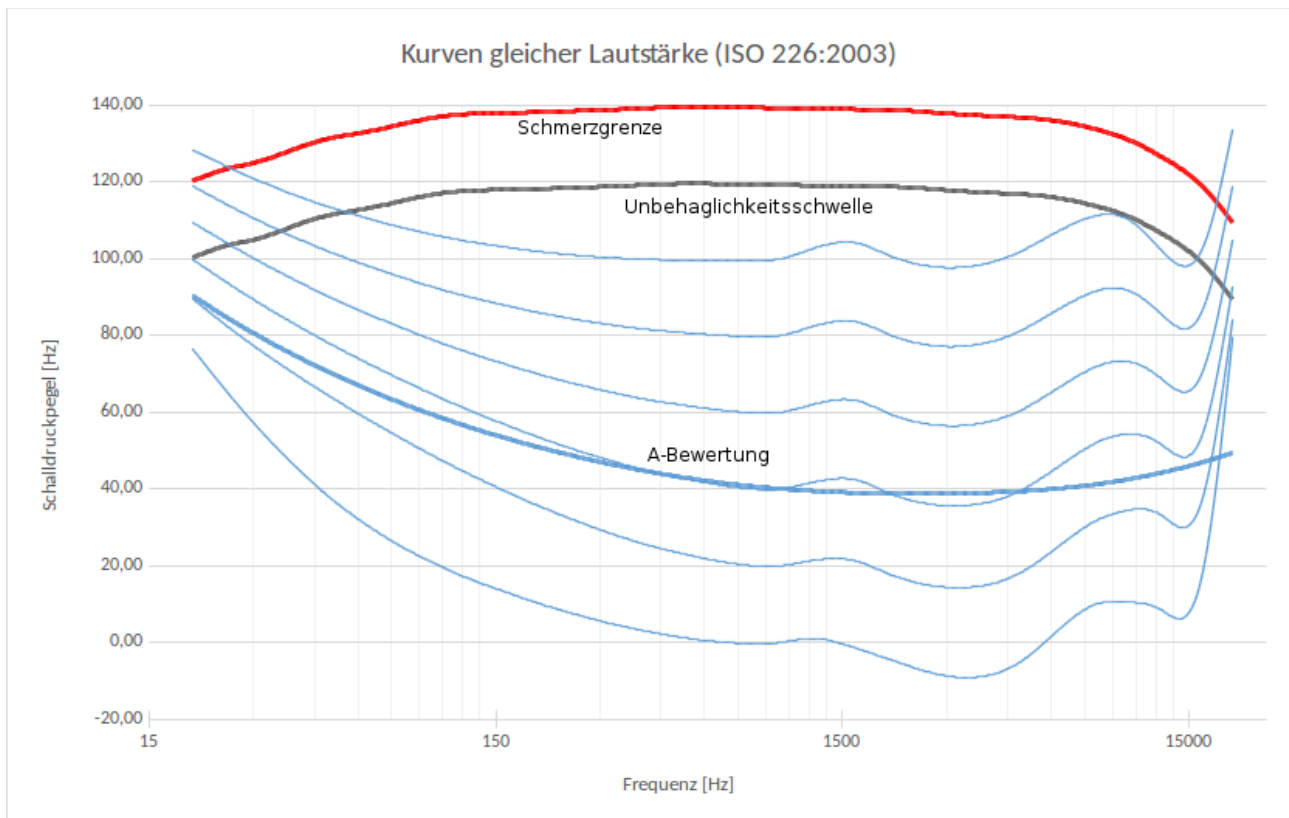


Abb. 4: Kurven gleicher Lautstärke mit Schmerz- und Unbehaglichkeitsschwelle

Die aufgezeichneten Geräusche der Propeller können durch eine schnelle Fouriertransformation in 1.024 Frequenzanteile zerlegt werden. Somit kann der jeweilige Frequenzgang dargestellt werden. In der nachstehenden Abbildung wurde eine lineare Skalierung der Abszisse gewählt, um vor allen Dingen den Hochtonbereich besser begutachten zu können.

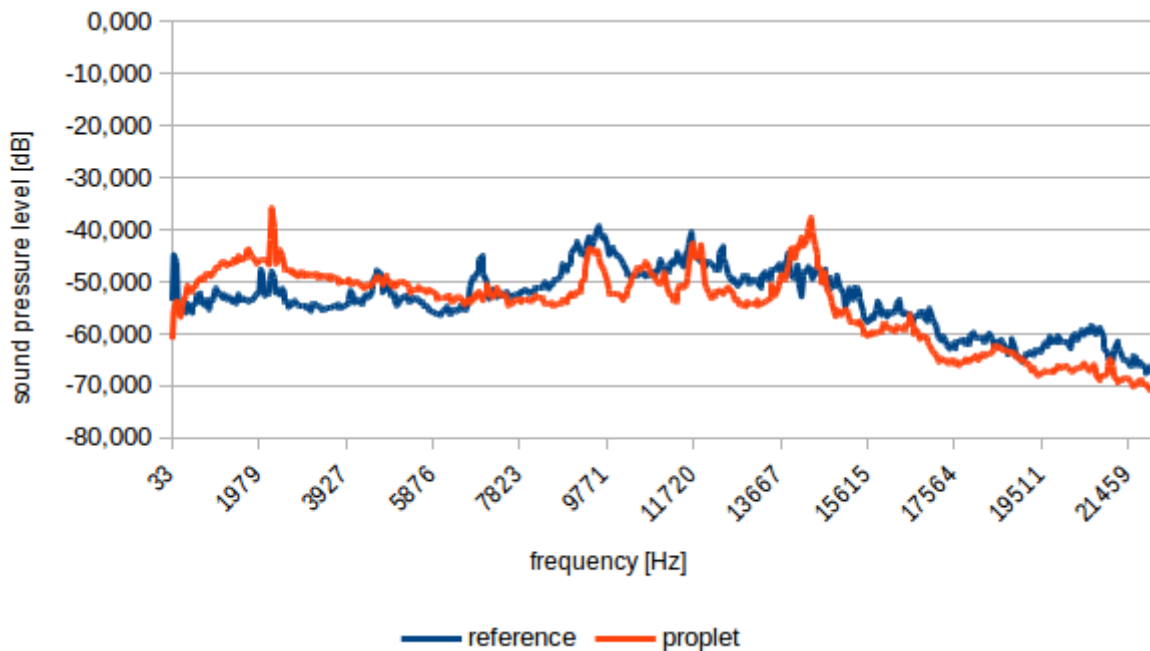


Abb. 5: Frequenzverläufe beider Propeller bei 3.000 min^{-1}

Aus diesen Frequenzspektren geht hervor, dass der Propletpropeller deutlich höhere Pegel im Mittentonbereich aufweist. Dies scheint in Bezug auf die Ergebnisse der Schallleistungsuntersuchung sinnvoll, da dieser Frequenzbereich den größten Anteil des Gesamtschallereignisses einnimmt. Im Hochtonbereich ab ca. 4.000 Hz ist eine deutliche breitbandige Anhebung im Spektrum des Referenzpropellers sichtbar. Dieser Frequenzbereich ist mitbestimmend für die subjektive Wahrnehmung eines Schallereignisses, da die Unbehaglichkeitsschwelle in diesem Bereich deutlich absinkt und identische Schallpegel als deutlich störender empfunden werden, als bspw. im Mittenbereich.

4.2. Schärfe

Um diese Erkenntnisse zu stützen soll nun die akustische Schärfe bestimmt werden. Dieser Empfindungsparameter wurde in (DIN 45692:2009) definiert und ist als Subroutine in vielen akustischen Analysetools enthalten. Die zugehörige Einheit ist das Acum. Je höher der Wert, desto unangenehmer und schärfer klingt das jeweilige Geräusch. Ein hochdrehendes Motorrad weist eine Schärfe von ca. $1,8 \text{ acum}$ auf. Zur Bestimmung der Schärfewerte der Propeller wurden dieselben Aufzeichnungen wie in Abschnitt 4.1 herangezogen.

- Schärfe Referenzpropeller: 2,76 acum
- Schärfe Propletpropeller: 2,21 acum

Damit konnten die psychoakustischen Bewertungen die oben genannten Wahrnehmungen bei den aerodynamischen Versuchen bestätigen. Zwar ist die Gesamtschallemission des Propletpropellers höher, gleichzeitig steigt aber auch die subjektive Verträglichkeit.

5. Untersuchung mit der Akustischen Kamera

Um die Lärmemission entlang des Propellerblattes besser zu verstehen, ist eine genauere Untersuchung der Geräuscentstehung vonnöten. Aus diesem Grunde wurde nun eine Akustische Kamera, also ein ringförmiges Mikrofon-Array, in die Messungen eingebunden. Dieses audiovisuelle Messsystem basiert auf den Laufzeitunterschieden von einer Schallquelle zu den verschiedenen Mikrofonen im Array, wodurch die Quelle millimetergenau lokalisiert werden kann.

Durch die Anwendung eines neuartigen *rotational beamforming*-Filters konnten nun erstmals die Schallquellen eines schnell rotierenden Prüfobjekts auf das stehende Objekt rückaufgelöst werden. Dies wird durch ein virtuelles, zusätzliches Array erreicht, welches sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Messobjekt dreht. Die Funktionsweise des Messsystems und der Filteralgorithmus wurden in (Kerscher et al. 2017) beschrieben.

5.1. Prüfstand und Messraum

Für die Untersuchung mit der Akustischen Kamera ist ein akustisch optimierter Messraum notwendig. Daher wurden die Messungen in der reflexionsarmen Schallkabine der Forschungsgruppe für Maschinendynamik und lärmarme Konstruktion der TH Wildau durchgeführt.

Des Weiteren wurde ein einfacher und mobiler Propellerprüfstand aufgebaut (siehe Abbildung 6). Hierbei konnte eine Minimalkonfiguration genutzt werden, da

keine weiteren aerodynamischen Parameter mit aufgenommen werden mussten. Zusätzlich wurde ein einfaches LabVIEW-Programm geschrieben, mit dem die Drehzahl am Prüfstand präzise eingestellt wurde.

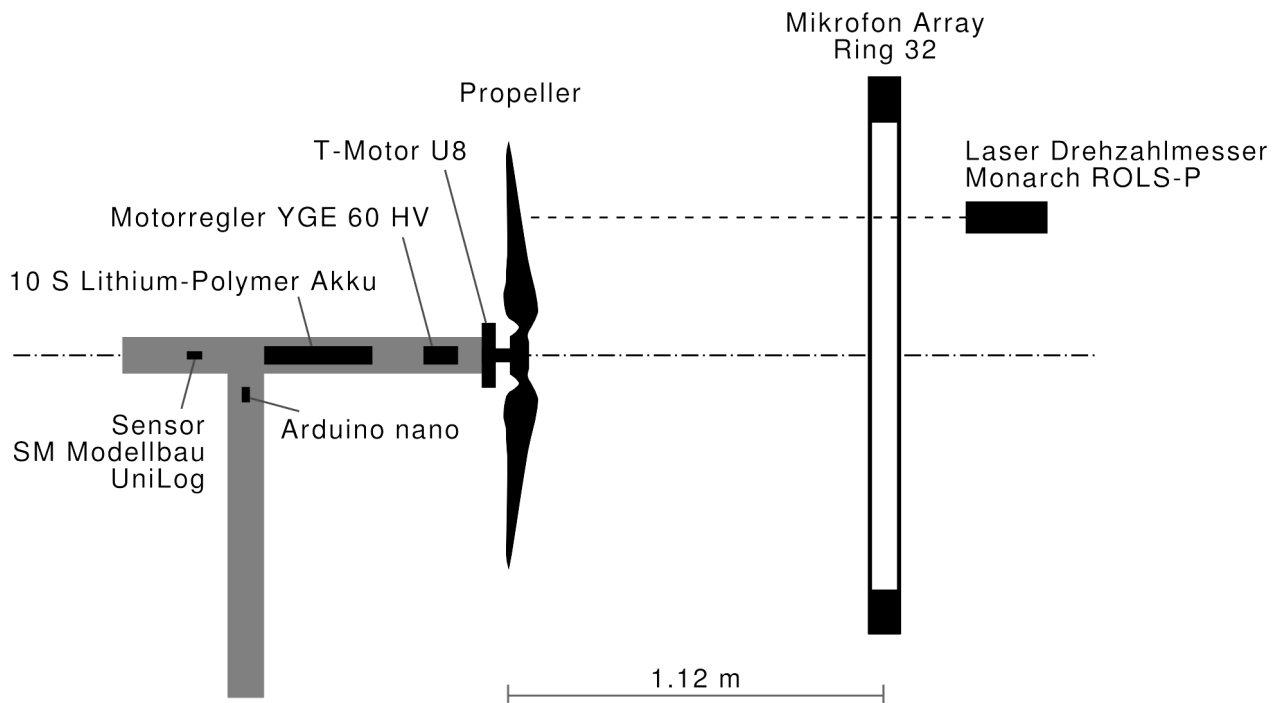


Abb. 6: Schematische Darstellung des Prüfstands

Für die korrekte Anwendung des *rotational beamforming*-Filters ist es notwendig, das Mikrofon-Array parallel zur Propellerdrehebene und konzentrisch zur Propellernabe zu platzieren. Dies konnte durch schrittweise, trigonometrische Annäherung mit einer Propellerreferenzscheibe umgesetzt werden.

Außerdem muss die Drehzahl dem Messsystem zeitsynchron zugespielt werden. Hierzu wurde ein zusätzlicher Laser-Drehzahlmesser genutzt, der direkt an das Messsystem angeschlossen werden kann. Aus diesem Grunde wurden Reflexionsstreifen auf den Propellern aufgebracht.

Nach dem Einstellen der Zieldrehzahl (3.000 min^{-1}) wurden die Geräusche beider Propeller aufgezeichnet und mit einer Quantisierungstiefe von 24bit bzw. einer Samplerate von 96 kHz gewandelt. Als Software sowohl für die Aufnahme als auch für die Analyse wurde das zum Messsystem gehörige Noiselimage 4.9 genutzt.

5.2. Messergebnisse

Nachdem der *rotational beamforming*-Filter auf die aufgezeichneten Daten angewendet wurde, konnte nun ein Akustisches Foto des Propellergeräusches generiert werden. Hiermit können die Schallquellen entlang der Propellerblätter begutachtet werden. Um die Ergebnisse aus den Abschnitten 3 und 4 vertiefen zu können, wird im Folgenden eine Terzbandanalyse vorgenommen. Hiermit können die Schallquellen frequenzbasiert analysiert werden.

Abbildung 7 zeigt das Mittenfrequenzband bei 1.600 Hz.

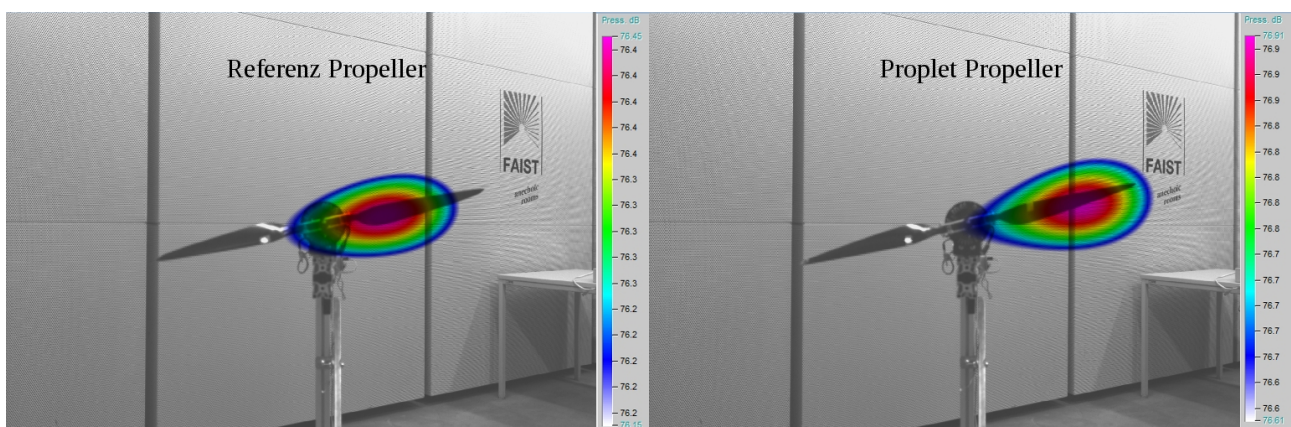


Abb. 7: Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 1.600 Hz

Hier ist ein Einfluss der Propellerdicke auf die Schallemission zu sehen. Das Zentrum der Schallquelle befindet sich beim Referenzpropeller wie erwartet an der dicksten Stelle. Beim Propletpropeller befindet sich dieser Punkt allerdings weiter außen in Richtung der Blattspitze. Dies impliziert eine durch die Proplets induzierte, hochfrequente Blattschwingung und damit eine virtuelle Aufdickung des Profils. Die Aufnahme des Blattes am Mittelstück entwickelt keine Bremswirkung, da es sich um einen Falt- bzw. Klapppropeller handelt. Dieses Verhalten erklärt ebenso die in Abschnitt 2 genannten, schlechteren aerodynamischen Eigenschaften des Propletpropellers sowie den höheren Schallleistungspegel.

Weitere charakteristische Unterschiede sind im Terzband bei 3.000 Hz auszumachen (siehe Abbildung 8).

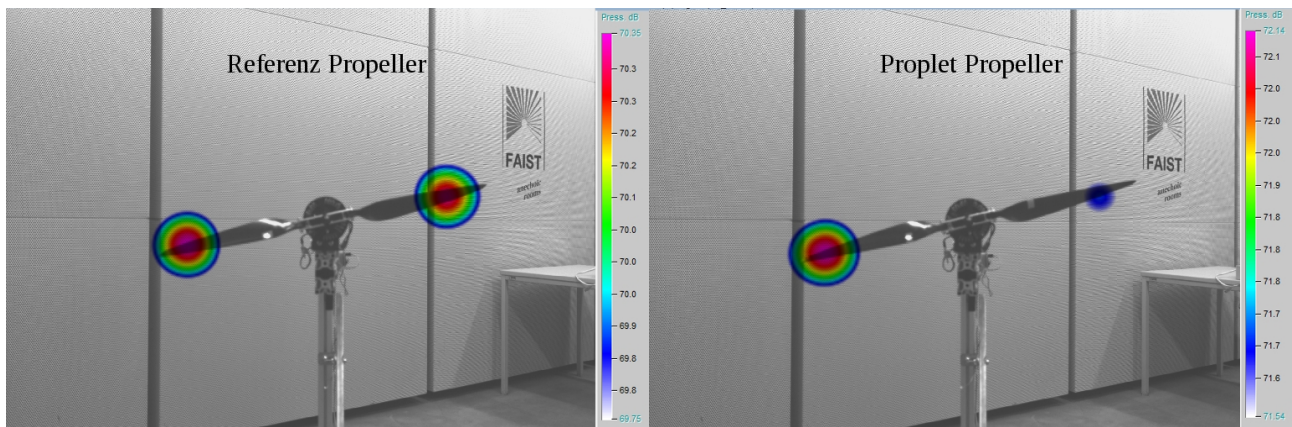


Abb. 8: Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 3.000 Hz

In diesem Akustischen Foto ist der Blattspitzenschlag zu sehen. Beim Referenzpropeller sind die Pegel der Schallquellen gleich verteilt. Beim Propletpropeller hingegen konzentriert sich die Schallenergie auf die linke Blattspitze. Das linke Blatt ist damit dominant. Grund hierfür könnte eine Unwucht sein, die durch eine Masseungleichheit der beiden Blätter (statische Unwucht) oder durch eine Verschiebung der Schwerpunktlagen (dynamische Unwucht) induziert ist.

In Abbildung 9 ist das Schallverhalten der Propeller im Terzband bei 8.000 Hz zu sehen.

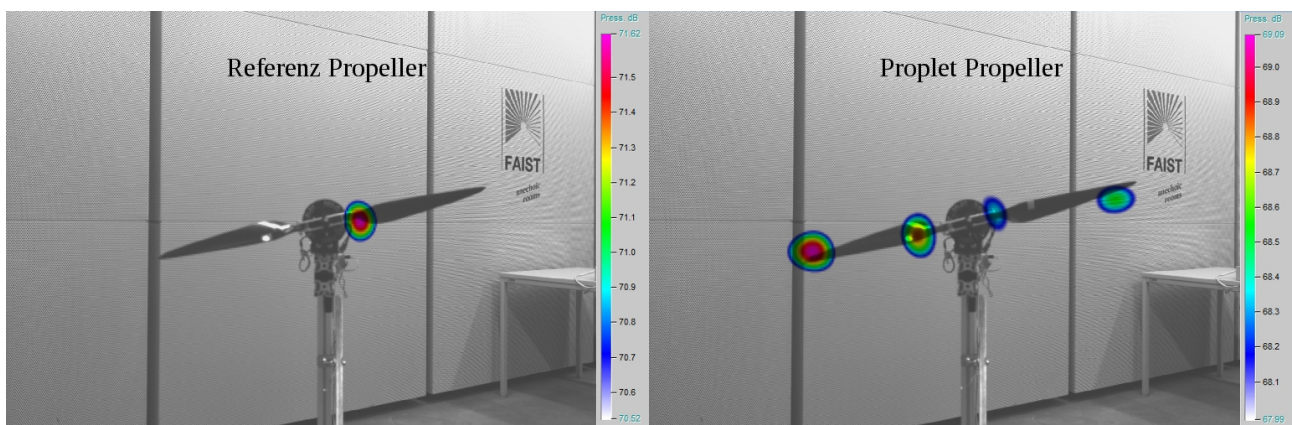


Abb. 9: Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 8.000 Hz

Die Schallenergie des Referenzpropellers konzentriert sich hier auf einen Punkt an der Propellerwurzel. Dies weist auf einen Strömungsabriss hin, was plausibel erscheint, da der Anstellwinkel an dieser Stelle maximal ist. Das akustische Foto

des Propletpropellers zeigt hingegen eine gleichmäßige Verteilung der Schallenergie, wobei auch hier das linke Blatt dominant erscheint.

5.3. Validierung

Aus den Akustischen Fotos im vorherigen Abschnitt konnten verschiedene Annahmen hergeleitet werden, welche die unerwarteten Ergebnisse der aerodynamischen und akustischen Untersuchungen erklären können. Es ist allerdings notwendig, diese Thesen auf Sinnhaftigkeit zu prüfen.

Die vermutete Blattschwingung konnte durch eine Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigt werden. Hierbei wurde die Kamera senkrecht zur Propellerdrehebene platziert. Nach Einstellen der Zieldrehzahl wurden jeweils vier Sekunden Propellerdrehung mit 1.000 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Zur Auswertung wurden Standbilder am oberen Scheitelpunkt des Propellerdurchlaufs extrahiert. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Ausschläge wurde die Propellersehne nachgezeichnet. In folgender Abbildung sind die Extrema dieser Ausschläge für beide Propeller skizziert.

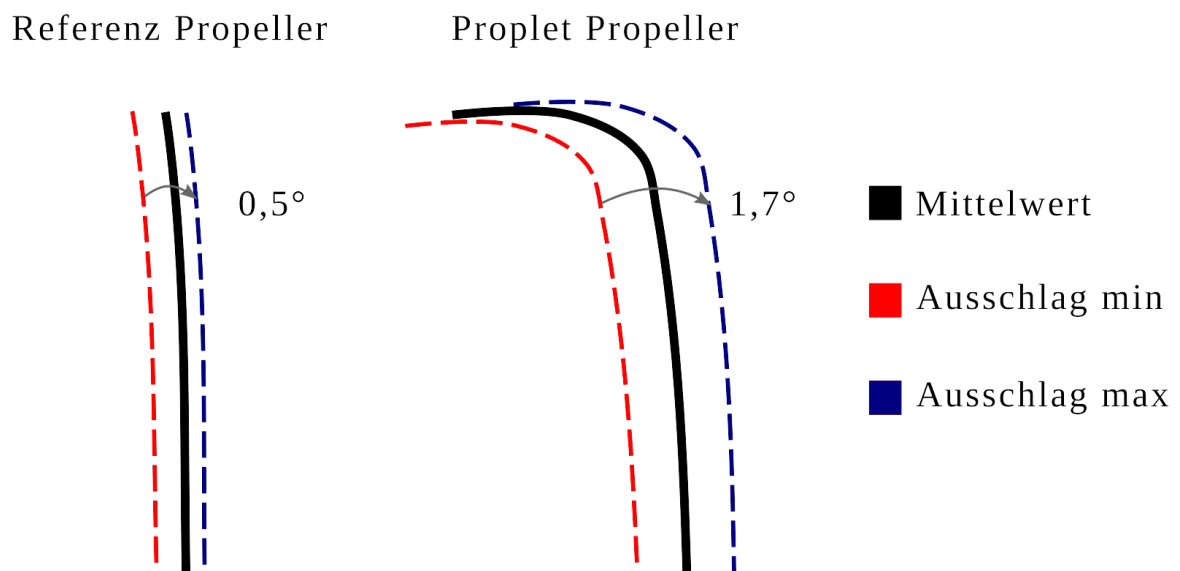


Abb. 10: Blattausschläge von Referenz- und Propletpropeller

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass die Blätter des Propletpropellers mit deutlich größerer Amplitude oszillieren, als die des Referenzpropellers. Damit konnte die vermutete Blattschwingung nachgewiesen werden.

Weiterhin ist auf verschiedenen akustischen Fotos ein dominantes Blatt des Propletpropellers sichtbar geworden. Alle Propellerblätter wurden bei der Fertigung statisch gewuchtet, also auf ein Zehntel Gramm abgewogen worden. Allerdings wurde darauf verzichtet, den Schwerpunkt der Blätter zu bestimmen, mithin eine dynamische Wuchtung vorzunehmen. Bei der Überprüfung des Propletpropellers konnte nun festgestellt werden, dass sich die Schwerpunktlage entlang der Propellersehne um 0,91 mm unterscheidet. Beim Referenzpropeller beträgt diese Differenz lediglich 0,13 mm. Demnach konnte auch die vermutete (dynamische) Unwucht nachgewiesen werden.

6. Fazit

In diesem Beitrag konnte eine umfängliche Messmethode erarbeitet werden, die es ermöglicht, die Lärmemission von Propellern besser zu verstehen und präziser zu analysieren. Fertigungsmängel konnten identifiziert werden. Durch die Anwendung des *rotational beamforming*-Filters ist die Akustische Kamera nun in der Lage, einen tieferen Einblick in das Schallverhalten am Propellerblatt zu gewähren und lärm mindernde Potentiale künftig zielgerichteter anzuwenden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Proplets einen Einfluss auf die Geräuschentwicklung der Propeller hat. Sie können ein Ansatz darstellen, um künftig die Akzeptanz von UAVs zu steigern, da sie die Schärfe des Propellerlärms abmildern, wodurch der Klang des Propeller als angenehmer bzw. weniger störend wahrgenommen wird.

Es wird daher empfohlen, die akustischen Potentiale der Proplets noch umfangreicher zu analysieren. Hierzu könnten die oben beschriebenen Messungen mit festgestellten Propellerblättern sowie mit Proplets halber Höhe durchgeführt werden. Außerdem sollte die Messmethode auf größere Antriebssysteme umgesetzt werden, da hier aufgrund der steigenden Anzahl von

Propellermaschinen im Sportluftverkehr sowie im Kurzstreckenlinienverkehr noch dringendere Notwendigkeiten der Lärmvermeidung angezeigt sind.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Referenzpropeller und Propletpropeller
- Abb. 2: Schematische Darstellung des Hüllflächenmessverfahrens
- Abb. 3: Vergleich der Schalleistungspegel beider Propeller
- Abb. 4: Kurven gleicher Lautstärke mit Schmerz- und Unbehaglichkeitsschwelle
- Abb. 5: Frequenzverläufe beider Propeller bei 3.000 min^{-1}
- Abb. 6: Schematische Darstellung des Prüfstands
- Abb. 7: Akustisches Foto beider Propeller – Terzband 1.600 Hz
- Abb. 8: Akustisches Foto beider Propeller – Terzband 3.000 Hz
- Abb. 9: Akustisches Foto beider Propeller – Terzband 8.000 Hz
- Abb. 10: Blattausschläge von Referenz- und Propletpropeller

Literaturverzeichnis

- (Angermann 2016) Sven Angermann, *Investigations of Propeller Optimization by using Proplets*, Doktorarbeit, Università degli studi di Roma "Tor Vergata", Italien, 2016.
- (DIN 226:2003) DIN EN ISO 226:2003 – *Acoustics – Normal equal-loudness-level contours*, April 2003.
- (DIN 3747:2011) DIN EN ISO 3747:2011 – *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering/survey methods for use in situ in a reverberant environment*, März 2011
- (Kerscher et al. 2017) M. Kerscher, G. Heilmann, C. Puhle, C. Friebe und R. Krause, *Sound Source Localization on a Fast Rotating Fan Using Rotational Beamforming*, InterNoise, 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Hong Kong, 27.–30. Aug. 2017
- (Quaeck 2016) Fabian Quaeck, *Auslegung eines höhentauglichen Antriebes für das unbemannte Luftfahrtsystem ATISS*, Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau, Deutschland, 2016.