

## Messungen an einem Modell-Propellerprüfstand

Thomas Geyer<sup>1</sup>, Ennes Sarradj<sup>2</sup>, Peggy Winkler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BTU Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Technische Akustik, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@b-tu.de

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, 10587 Berlin, Deutschland

### Einleitung

Propeller stellen eine sehr wirksame und energieeffiziente Art des Antriebs von Flugzeugen dar. Dies trifft vor allem für das Konzept von gegenläufigen Propellern zu. Nachteilig ist jedoch die starke Schallentstehung, die sich vor allem durch sehr starke tonale Anteile bei der Blattfolgefrequenz und ihren Harmonischen äußert.

Um Untersuchungen der aerodynamischen Kräfte sowie der Schallerzeugung von Propellern zu ermöglichen, sind Messungen an maßstäblich verkleinerten Modellen in einem Propellerprüfstand eine zeit- und kosteneffiziente Alternative gegenüber Überflugmessungen. Im Rahmen einer Studie an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg wurde ein solcher Prüfstand konzipiert und aufgebaut. Zu Validierungszwecken wurden sowohl aerodynamische als auch akustische Messungen an einer Reihe unterschiedlicher Modellpropeller durchgeführt. Die Messung der aerodynamischen Parameter erfolgte dabei mit Hilfe eines Mehrkomponenten-Kraftsensors, die Schallabstrahlung wurde mit Freifeldmikrofonen in der Propellerebene im Inneren eines aeroakustischen Windkanals gemessen. Im vorliegenden Beitrag werden Details zur konstruktiven Umsetzung des Prüfstands sowie erste Messergebnisse vorgestellt.

### Grundlagen

Bereits in [1] wurde der prinzipielle Aufbau eines Prüfstands für Messungen an Modellpropellern in einem Windkanal vorgestellt. Um die aerodynamischen Parameter (wie Schubkraft  $F_S$  und Drehmoment  $Q$ ) sowie die für die Schallentstehung wesentlichen Größen (Frequenz  $f$ ) vom realen Propeller auf einen Propeller im Modellmaßstab übertragen zu können, sollten nach Möglichkeit wesentliche dimensionslose Kennzahlen konstant gehalten werden. Dazu gehören zum Beispiel

- der Fortschrittsgrad

$$J = \frac{U}{\omega \cdot d}, \quad (1)$$

als das Verhältnis von Fluggeschwindigkeit  $U$  zu Umfangsgeschwindigkeit,

- der aerodynamische Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{F_S \cdot U}{\omega \cdot Q} \quad (2)$$

als das Verhältnis von Schubleistung zu Antriebsleistung,

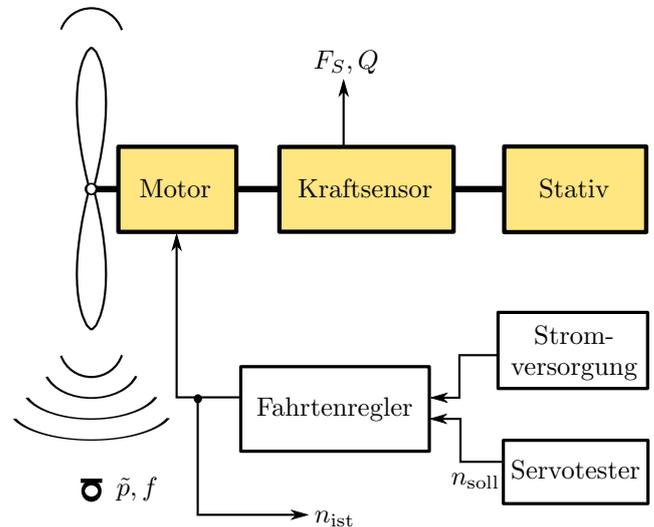


Bild 1: Blockschaltbild des Messaufbaus

- die Strouhalzahl

$$Sr = \frac{f}{\omega \cdot B}, \quad (3)$$

- die Machzahl

$$M = \frac{U}{c_0}, \quad (4)$$

- und die helikale Machzahl,

$$Ma_h = \frac{\sqrt{U^2 + (\omega \cdot d/2)^2}}{c_0}, \quad (5)$$

als das Verhältnis von Blattspitzengeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit  $c_0$ .

Dabei ist  $\omega$  die Drehzahl in  $s^{-1}$ ,  $d$  der Propellerdurchmesser und  $B$  die Blattzahl.

Ziel beim Aufbau eines Prüfstands für Modellpropeller sollte sein, diese Kennzahlen einzuhalten. In [1] wurde eine Beispielrechnung für die Übertragung der Daten eines zweiblättrigen Propellers einer *Cessna 150* auf einen Modellpropeller mit einem Durchmesser von 0,12 m durchgeführt.

### Aufbau des Prüfstands

Eine einfache Möglichkeit, einen solchen Prüfstand praktisch zu realisieren, ist die Verwendung von Komponenten aus dem Modellflugzeugbau. Das bietet vor allem den

**Tabelle 1:** Übersicht der verwendeten Komponenten des Prüfstands

Propeller		
Bezeichnung	Durchmesser	Steigung
APC E 4,5" × 4,1"	114,3 mm	104,1 mm
CAM Speed Prop 4,7" × 4,7"	119,4 mm	119,4 mm
APC E 5,5" × 4,5"	139,7 mm	114,3 mm
APC E 7" × 6"	177,8 mm	152,4 mm
AEJ Slowfly 8" × 6"	203,2 mm	152,4 mm

Motoren	
Bezeichnung	Typ
Robbe BL 3630/06	Innenläufer
Parkzone 480B	Außenläufer

Messsensor	
Bezeichnung	Nennkräfte (x, y, z)
K6D40	500 N, 500 N, 2000~N

Vorteil, dass die benötigten Teile vergleichsweise billig sowie einfach und schnell beschaffbar sind. Ein Nachteil jedoch, der sich auch in der vorliegenden Studie bemerkbar machte, ist, dass nicht alle Komponenten uneingeschränkt miteinander kompatibel sind. Darüber hinaus sind für manche Teile nur unzureichende Beschreibungen und Datenblätter vorhanden. Ein weiterer Vorteil ist, dass für die Berechnung der Propelleraerodynamik zahlreiche von Modellbauern erstellte Open-Source-Software existiert (zum Beispiel PropCalc [2]).

Bild 1 zeigt ein Blockschaltbild des verwendeten Prüfstands, der mit Hilfe von RC-Komponenten zusammengesetzt wurde. Der zum Antrieb des Propellers verwendete Motor wird von einem Fahrtenregler gesteuert, der die benötigte 3-Phasen-Wechselspannung bereitstellt. Angesteuert wird dieser Fahrtenregler von einem Servotester, der im Prüfstandsbetrieb die Fernbedienung ersetzt und dem Benutzer die Vorgabe der Drehzahl ermöglicht. Die notwendige Versorgungsspannung der Motoren wurde durch handelsübliche Akkupacks bereitgestellt.

Da die Kenntnis der Drehzahl für die Berechnung wesentlicher Kennzahlen (siehe Gleichungen (1), (2), (4) und (5)) benötigt wird, ist die fehlerfreie Messung der Drehzahl ein sehr wichtiger Aspekt. Eine optische Messung scheint dabei nur bedingt geeignet, da sie unter Umständen das Anbringen von Markern an den Propellermodellen erfordert, was zu Unwuchten führen kann. Im vorliegenden Fall wurde die Drehzahl mittels eines Bandpassfilters aus der Frequenz der Motorspannung abgelesen.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Konstruktion eines solchen Prüfstands beachtet werden muss, ist, dass die stromab des Propellers befindlichen Komponenten (Motor, Sensor und Stativ) im Vergleich zum Propellerdurchmesser möglichst klein sein sollten, um die Strömung wenig zu beeinflussen.

**Bild 2:** Verwendete Propeller (von links nach rechts: APC E 4,5" × 4,1", CAM Speed Prop 4,7" × 4,7", APC E 5,5" × 4,5", APC E 7" × 6", AEJ Slowfly 8" × 6")

Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten des Prüfstands kurz vorgestellt. Eine Übersicht der Komponenten kann Tabelle 1 entnommen werden.

### Propeller

Eine wesentliche Voraussetzung für Messungen im Windkanal ist, dass der Propeller bezogen auf die Dimension der Düse nicht zu groß sein darf. Anderenfalls käme es zu einer nicht mehr zu vernachlässigenden Versperrung der Düse, was zu einer unrealistischen Umströmung des Propellermodells führen würde. Eine einfache Regel [3] besagt, dass die durch den Propeller aufgespannte Kreisfläche weniger als 60 % der Düsenaustrittsfläche betragen sollte. Bei der in der vorliegenden Untersuchung verwendeten kreissymmetrischen Windkanaldüse mit einem Außendurchmesser von 0,35 m können somit Propeller mit einem Durchmesser von bis zu 0,27 m untersucht werden.

Bild 2 zeigt die verwendeten Propellermodelle. Ein solcher Propeller wird üblicherweise durch die Angabe von Durchmesser und Steigung gekennzeichnet, d.h. der Propeller mit der Bezeichnung APC E 4,5" × 4,1" hat einen Durchmesser von 4,5 Zoll (= 11,4 cm) und eine Steigung von 4,1 Zoll (= 10,4 cm).

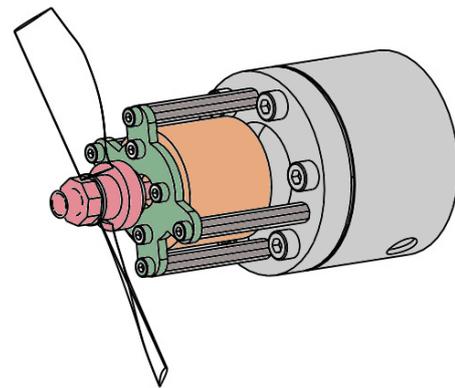
### Motoren

Als Antrieb stehen generell bürstenlose Elektromotoren als sogenannte Innenläufer oder Außenläufer zur Verfügung. Bei Innenläufern rotiert der bewegliche Anker im Inneren der feststehenden Spulenpakete, bei Außenläufern befindet sich der Anker außerhalb der Spulen. Bild 3 zeigt ein Foto der verwendeten Motoren, welche einen Außendurchmesser von maximal 36 mm aufweisen.

Innenläufer erreichen üblicherweise die höheren Drehzahlen, was für die Verwendung in einem Propellerprüfstand wesentlich ist. Im Berechnungsbeispiel aus [1] ergab sich beispielsweise eine benötigte Drehzahl von  $41.215 \text{ min}^{-1}$ . Der verwendete Innenläufer besitzt laut Datenblatt eine Leerlaufzahl von  $5300 \text{ min}^{-1}/V$ , mit einer Versorgungsspannung von 10 V ergibt sich also ein theoretischer Wert



**Bild 3:** Verwendete Motoren (links: Innenläufer Robbe BL 3630/06, rechts: Außenläufer Parkzone 480B)



**Bild 5:** Skizze des Sensors in Verbindung mit dem Innenläufer



**Bild 4:** Verwendeter Sechs-Komponenten-Sensor K6D40

von  $53.000 \text{ min}^{-1}$ . Für den Außenläufer war kein entsprechendes Datenblatt vorhanden.

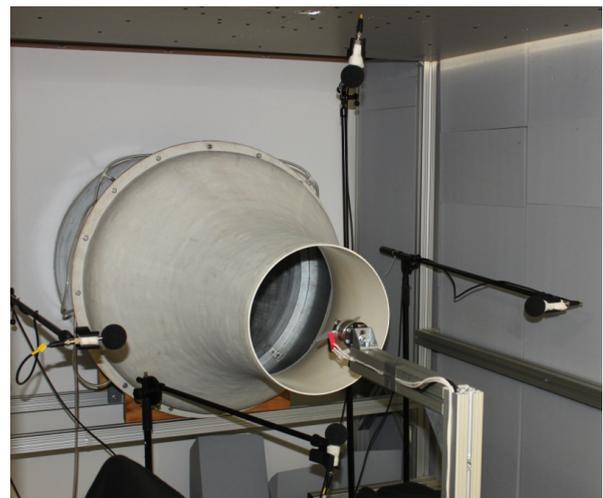
Leider zeigte sich in den Messungen, dass die erreichbare Drehzahl mit montiertem Propeller sehr viel geringer ist, vor allem bei Betrieb im laufenden Windkanal. Zudem ließen sich die größeren Propellermodelle nicht mit dem schnelleren Innenläufer verbinden, da dieser nicht die erforderliche mechanische Leistung aufbringen kann.

#### *Sensor zur Messung des Schubs*

Die Messung der vom Propeller erzeugten Schubkraft erfolgte mit einem 6-Achsen Kraft-Momenten-Sensor vom Typ K6D40 der Firma ME-Meßsysteme GmbH (siehe Bild 4). Dieser hat einen Außendurchmesser von 60 mm. Die Nennkraft in Achsrichtung (entspricht der Schubkraft) beträgt 2 kN, die Nennkräfte in den beiden anderen Richtungen betragen jeweils 500 N. Angeschlossen wurde der Sensor an den Verstärker GSV-1A16USB des gleichen Herstellers, welcher einen integrierten A/D-Wandler enthält. Aus den vom Sensor gelieferten sechs Spannungen konnten dann mit Hilfe der bekannten Kalibriermatrix die drei resultierenden Kräfte und die zugehörigen Momente berechnet werden.

#### Messdurchführung

Die Messungen fanden im aeroakustischen Freistrahwindkanal an der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus statt. Die verwendete Düse erlaubt eine Maximalgeschwindigkeit von etwa 40 m/s. Der vor der Düse gemessene Turbulenzgrad beträgt weniger als 0,2 % [4].

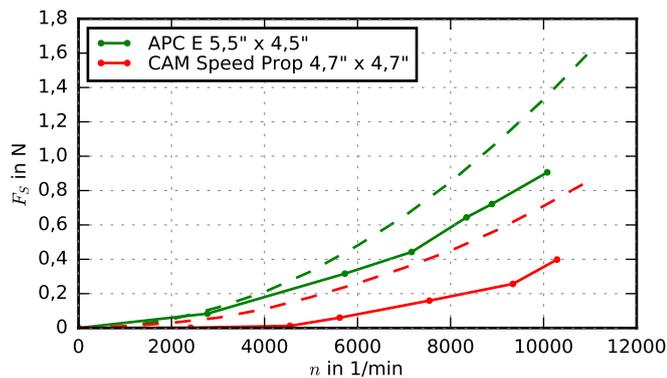


**Bild 6:** Messaufbau im Windkanal

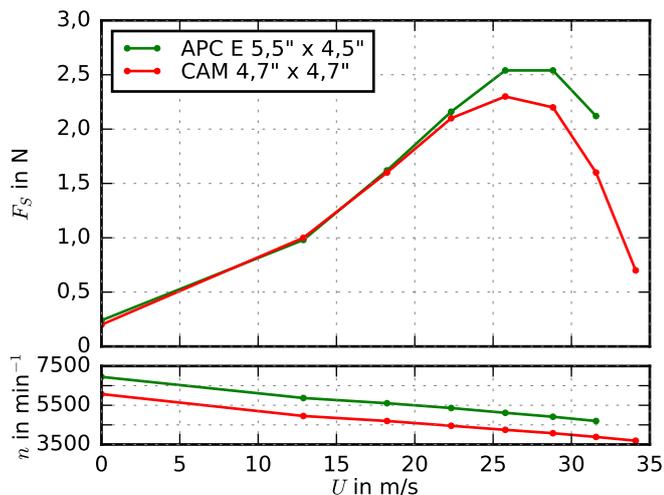
Während der Messungen befand sich der Propeller mittig in einem Abstand von 0,13 m zur Düsenaustrittsebene. Die Messung des Schubs erfolgte mit der bereits erläuterten Messtechnik. Der von den Propellermodellen erzeugte Schall wurde simultan mit vier 1/4 Zoll Freifeldmikrofonen gemessen, die in einem Abstand von 0,5 m (Mikrofone 1, 2 und 3) bzw. 0,25 m (Mikrofon 4) in Winkeln von  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  um den Propeller innerhalb der Propellerebene angeordnet waren. Bild 6 zeigt ein Foto des Messaufbaus. Die Datenaufnahme erfolgte mit dem Vierkanal-Analog-I/O-Modul NI USB-4431. Um die vorhandenen Ergebnisse später gegebenenfalls auch vom Modellmaßstab auf größere Modelle umrechnen zu können, wurden die akustischen Messungen mit einer vergleichsweise hohen Abtastfrequenz von 102,4 kHz durchgeführt.

#### Ergebnisse

Vor den eigentlichen Untersuchungen im Windkanal erfolgte in einem ersten Schritt die Messung des Standschubs der Propeller, d.h. die Messung ohne Strömung. Bild 7 zeigt exemplarisch das Ergebnis für zwei Propellermodelle (APC E 5,5"  $\times$  4,5" und CAM Speed Prop 4,7"  $\times$  4,7"), die mit dem Innenläufer betrieben wurden. Dabei wurde den Messwerten noch eine Überschlagsrechnung gegenübergestellt [5], in die nur Durchmesser und Steigung des Propellers, Drehzahl sowie Spannung und Wirkungs-



**Bild 7:** Gemessener Standschub zweier Propeller, angetrieben vom Innenläufer, als Funktion der Drehzahl  $n$  (durchgezogene Linien: Messwerte, gestrichelte Linien: Abschätzung)

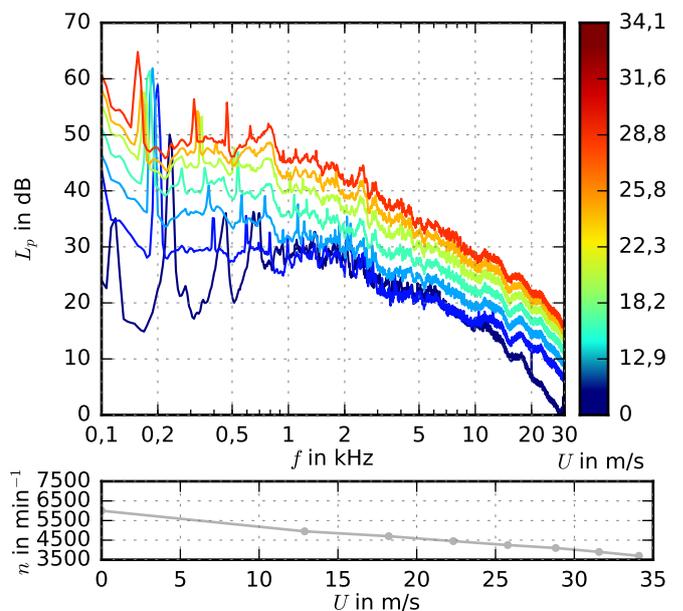


**Bild 8:** Gemessene Schubkraft zweier Propeller, angetrieben vom Innenläufer, bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

grad des Motors eingingen. Natürlich kann nicht erwartet werden, dass eine solch einfache Rechnung exakte Werte liefert. Trotzdem zeigt sich, dass trotz Unterschieden in den Absolutwerten die Differenzen zwischen beiden Propellern übereinstimmen.

Bild 8 zeigt die für zwei Propellermodelle in Verbindung mit dem Innenläufer im Windkanalversuch gemessenen Schubkräfte. Die Windgeschwindigkeiten wurden von 0 m/s bis etwa 35 m/s variiert. Beim Betrieb im Windkanal stellte sich heraus, dass sich aufgrund der fehlenden Drehzahlregelung die Drehzahl des Propellers ändert. Das macht den Vergleich der Messdaten mit bekannten Vorhersagemodellen (neben PropCalc zum Beispiel JAVAProp [6]) schwierig. Die qualitativen Verläufe der Messkurven sehen zwar glaubwürdig aus, eine quantitative Überprüfung fehlt jedoch noch.

Bild 9 zeigt die mit einem Mikrophon zeitgleich gemessenen Leistungsdichtespektren für den Propeller APC E 5,5" x 4,5" bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Der von den Propellern erzeugte Schall besteht aus einem breitbandigen Anteil sowie einem tonalen Anteil, der aus den entsprechenden Blattfolgefrequenzen und deren Harmonischen besteht.



**Bild 9:** Beispielschalldruckspektrum des APC E 5,5" x 4,5"-Propellers, angetrieben vom Innenläufer, bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

## Zusammenfassung

Im Rahmen einer an der BTU Cottbus - Senftenberg durchgeführten Arbeit wurde ein Prüfstand für Modellpropeller mit Hilfe von Komponenten aus dem Modellflugzeugbau aufgebaut. Der Antrieb erfolgt dabei mit bürstenlosen Elektromotoren (Innenläufer oder Außenläufer), während zur Messung der Schubkraft ein 6-Achsen Kraft-Momenten-Sensor Verwendung findet. Die Schallentstehung wird mit einzelnen Freifeldmikrofonen gemessen, die innerhalb der Propellerebene regelmäßig um den Propeller verteilt sind. Um die Funktionstüchtigkeit des Prüfstands zu erproben, wurden Messungen an einer Reihe von Modellpropellern mit unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlicher Steigung durchgeführt.

## Literatur

- [1] Geyer, T., Sarradj, E., Nowigk, J., Design and Construction of a Test Stand for Noise Measurements on Model Propellers. In: Fortschritte der Akustik - AIA-DAGA, 1888 - 1891 (2013)
- [2] Schenk, H., PropCalc Version 3.0, <http://www.drivecalc.de/PropCalc/> (2007)
- [3] Glauert, H.: Wind Tunnel Interference on Wings, Bodies and Airscrews. Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda No. 1566 (1933)
- [4] Sarradj, E. et al.: Acoustic and Aerodynamic Design and Characterization of a Small-Scale Aeroacoustic Wind Tunnel. Appl Acoust, 70, 1073 - 1080 (2009)
- [5] Überslagsmäßige Leistungs-, Schub- und Geschwindigkeitsberechnung V2.1.1, <http://www.maltemedia.de/schub/>
- [6] Hepperle, M., JavaProp, <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javaprop.html> (2003)