



# Ergebnisse zum Anfassen: Das interdisziplinäre Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik

F. Biertümpfel, J. Frey\*, S. Schubert, H. Pfifer

<sup>1</sup> *Flugmechanik und Flugregelung, Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenwesen, TU Dresden*

## **Abstract: Ergebnisse zum Anfassen: Das interdisziplinäre Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik**

Im Rahmen des Interdisziplinären Entwurfsprojektes Luft- und Raumfahrttechnik entwerfen Studierende unbemannte Flugsysteme für Such- und Rettungsaufgaben. Dies umfasst den Vorentwurf (z.B. Aerodynamische Auslegung), Detailentwurf (z.B. Strukturauslegung) und, bisher, die Implementation in eine Simulationsumgebung. Im laufenden Semester soll der Entwurf vom Computer in die Luft gebracht werden. Hierfür stellt die Professur für Flugmechanik und Flugregelung die elektronischen und mechanischen Komponenten (Motoren, Flugrechner, etc.) zur Verfügung. Die Flugzeugstruktur soll von den Studierenden selbst gefertigt werden. Hierfür steht ihnen ein hochmodernes Laserschneidgerät zur Verfügung, das die Professur im Rahmen der Ausschreibung für Lehr-/Lernprojekte der Fakultät Maschinenwesen beschaffen konnte. Dieses erlaubt den schnellen und effizienten Zuschnitt der Strukturteile in Holzbauweise. Das selbstgebaute Flugsystem wird im Windkanal und Flugversuch evaluiert.

Within the Interdisciplinary Design Project in Aerospace Engineering, students design unmanned aerial systems for search and rescue tasks. This includes the preliminary design (e.g. aerodynamic design), detailed design (e.g. structural design) and, so far, implementation in a simulation environment. In the current semester, the design is to be brought from the computer into the air. The Chair of Flight Mechanics and Flight Control is providing the electronic and mechanical components (motors, flight computer, etc.) for this purpose. The aircraft structure is to be manufactured by the students themselves. A state-of-the-art laser cutter is available to them for this purpose, which the Chair was able to procure as part of the tender for teaching/learning projects of the Faculty of Mechanical Engineering. This allows the structural parts to be cut quickly and efficiently in wood. The self-built flight system is being evaluated in the wind tunnel and flight tests.

\*Corresponding author: [juergen.frey@tu-dresden.de](mailto:juergen.frey@tu-dresden.de)

## 1. Einleitung

An der Professur für Flugmechanik und Flugregelung findet im Sommersemester 2023 zum zweiten Male die Lehrveranstaltung „Interdisziplinäres Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik“ statt. In diesem Projekt entwerfen und testen Gruppen aus vier bis fünf Studierenden ein kleines unbemanntes Flugsystem (engl. small Unmanned Aerial System - sUAS) speziell für Such- und Rettungsmissionen. Für dieses Anwendungsfeld sind sUAS geradezu prädestiniert und dementsprechend ist ihr Markt stark im Wachstum [1]. Der Betrieb von autonomen Fluggeräten unter wechselnden Wind- und Wetterbedingungen ist ferner ein zentrales Forschungsfeld der Professur für Flugmechanik und Flugregelung [2].

Im Zuge des Semesters durchlaufen die Teilnehmenden die typischen Phasen eines jeden Entwicklungsprojektes: den Vorentwurf, den Detailentwurf einschließlich konstruktiver Umsetzung und die Implementation sowie Verifizierung des Konzeptes. Letzteres erfolgt im laufenden Jahrgang erstmals auch praktisch. Zur Umsetzung erhalten die Studierenden von der Professur standardisierte Commercial-off-the-Shelf-(COTS)-Komponenten sowie die Baumaterialien. Mithilfe des von der Fakultät geförderten Laser-Cutters können aus den Konstruktionsunterlagen in kurzer Zeit die Strukturkomponenten hergestellt werden. Die Montage erfolgt durch die Studierenden selbst. Analog zum Großflugzeugbau wird dem krönenden Flugversuch ein Windkanaltest vorangestellt.

Ein solches Projekt erfordert von den Beteiligten ein hohes Maß an Kooperation, Selbstorganisation und fachübergreifendem Denken, um die vielfältigen Teilaufgaben effektiv abzuarbeiten und zu einem sinnvollen Ganzen zusammenzuführen. Das gilt umso mehr, da die Aufgabe nunmehr auch die praktische Umsetzung beinhaltet. Eine Vielzahl von Detaillösungen muss erarbeitet, auf technische Umsetzbarkeit geprüft und letztendlich praktisch verwirklicht werden. Parallel dazu bleibt der rechnerische Nachweis in der Simulationsumgebung erhalten, ist jedoch vom Umfang her zugunsten der konstruktiven und praktischen Ausführung verglichen zur ersten Iteration reduziert [3]. Eine realitätsnahe Durchführung

des Gesamtprojektes ist auch über die praktische Umsetzung hinaus ein wesentliches Anliegen der Lehrveranstaltung. Das umfasst realistische Anforderungen, Erarbeitung von Lastenheften, Reviews, Progress-Meetings und die Präsentation von „Milestones“ in Kombination mit „Deliverables“. Diese werden, realitätsnah, von den Lehrenden strikten Reviews in Form von Präsentationen unterzogen.

Durch die Arbeit im Kleingruppenformat und die regelmäßigen Fortschrittskontrollen wird eine intensive Interaktion untereinander aber auch mit den Lehrenden stark gefordert und gefördert. Damit werden entscheidende Fähigkeiten im Umgang miteinander trainiert. Außerdem kann damit der Lernfortschritt einzelner Teilnehmender genau verfolgt und gezielt auf Probleme eingegangen werden. Hierdurch können die Studierenden individuell besser gefördert und gefordert werden.

## 2. Konzept des Moduls und Ablauf im ersten Jahr

Die praktische Umsetzung des Projektes in ein flugfähiges Modell war von Anfang an Bestandteil des Konzeptes, konnte jedoch aufgrund der verfügbaren Fertigungskapazitäten im ersten Jahr noch nicht verwirklicht werden. Stattdessen fand das Projekt zunächst ausschließlich auf dem Papier bzw. im Rechner statt [3]. Die theoretischen Aufgaben waren dementsprechend umfangreicher gehalten: Ein eigener Rumpf war Teil der Auslegung, eine breitere Palette an Antriebsoptionen stand zur Auswahl, die Simulation war umfangreicher auszuführen. Diese Teilbereiche wurden später mit Rücksicht auf den Arbeitsaufwand eingeschränkt.

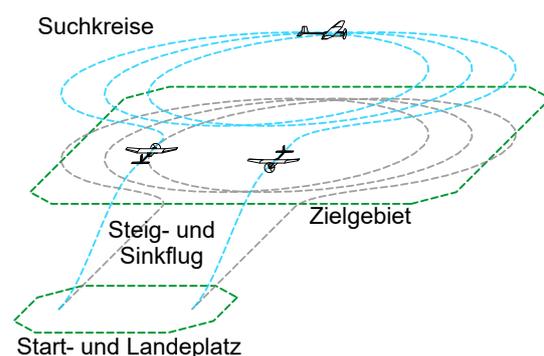


Abb. 1: Darstellung des Flugpfades auf einer typischen Suchmission.

Das Projekt startet mit der Vorgabe einer realitätsnah erscheinenden Einsatzsituation für ein kleines unbemanntes Flugsystem: In einem schwer zugänglichen Zielgebiet sollen vermisste Personen gesucht und gefunden werden (Abb. 1). Dazu muss das UAV als Nutzlast eine kleine Kamera mit notwendigem Datenübertragungssystem mitführen und eine gewisse Wegstrecke zum Einsatzort zurücklegen können. Zu Beginn wird es aus der Hand gestartet und steigt selbständig auf seine Einsatzhöhe. Im Zielgebiet muss es für eine vorgegebene Zeit operieren und nach den Vermissten suchen. Nach der Rückkehr zum Startpunkt erfolgt die Landung in einem Fangnetz. Dabei müssen genügend Reserven in Geschwindigkeit und Reichweite vorgesehen sein, um die Mission auch unter widrigen Windverhältnissen absolvieren zu können. Die Vorgaben differieren leicht zwischen den Gruppen. Diese Variation soll die Diversität der Entwürfe und das unabhängige Arbeiten der Gruppen fördern.

Auf Basis der gestellten Anforderungen, welche in einem Lastenheft zusammengefasst sind, ist ein Vorentwurf zu erarbeiten, der diese erfüllt. Zentral ist in dieser Phase die Aerodynamik, im Wesentlichen ist ein geeignetes Flügelprofil auszuwählen und die notwendige tragende Fläche festzulegen. Als Werkzeug dafür dient XFOIL [4], ein leicht zu beherrschendes Rechenprogramm auf Basis eines 2-D-Panelfahrens mit überlagerter Grenzschichtrechnung (Abb. 2).

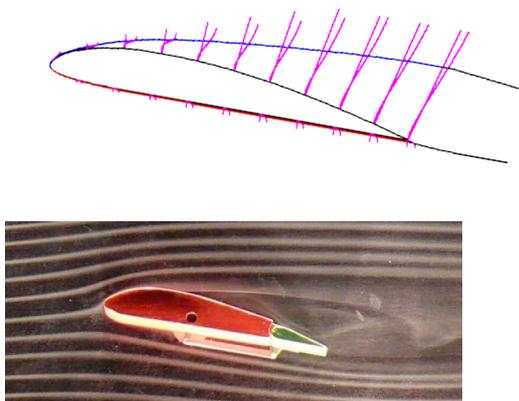


Abb. 2: XFOIL-Rechnung einer Profilumströmung bei sehr niedriger Reynoldszahl (Clark Y,  $Re=5 \cdot 10^4$ ,  $\alpha=10^\circ$ , oben) im Vergleich zur Visualisierung (unten).

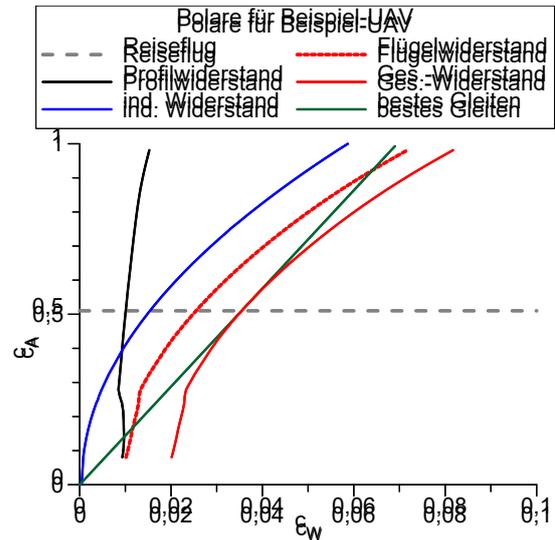


Abb. 3: Darstellung einer ersten, mit einfachen Verfahren abgeschätzten Polaren (Auftrieb und Widerstand in Form dimensionsloser Beiwerte)

Mit einfachen Ansätzen zum induzierten Widerstand und Handbuchmethoden zur Abschätzung der Wandreibung an den übrigen Flächen [5] entsteht eine erste Flugleistungspolare (Abb. 3). Diese ist Ausgangspunkt für die Vorauswahl von Antrieb und Akku aus einem vorgegebenen Portfolio.

In der nächsten Phase, dem Detailentwurf, entsteht die konkrete Flügelgeometrie mit Zuspitzung, V-Stellung und Querrudern. Weiterhin ist das Leitwerk mit Höhen- und Seitenruder zu dimensionieren. Das mit einem Wirbelgitterverfahren arbeitende Programm Athena Vortex Lattice (AVL) [6] liefert die flugmechanischen Derivativa (Abb. 4). Von besonderem Interesse ist die Neutralpunktlage, aus der sich der zulässige Schwerpunktbereich ergibt, in dem das Fluggerät stabil und steuerbar bleibt. Dieser Schwerpunktbereich muss von den Studierenden auf Basis der relevanten Momentengleichgewichte berechnet werden. Anhand dessen müssen die Studenten alle für den Flugbetrieb notwendigen Systemkomponenten (Akku, Telemetrie, Pixhawk Flugcomputer, GPS, etc.) im Rumpf positionieren.

Eine einfache Strukturabschätzung ist ebenso Bestandteil des Aufgabenteils, sowohl in Hinblick auf die finale Masse als auch die Festigkeit.

Mithilfe der bis dahin gewonnenen aerodynamischen und flugmechanischen Parameter erfolgt die Umsetzung in der eigenentwickelten

Simulationsumgebung, die bisher einen zentralen Bestandteil des Kurses ausmacht.

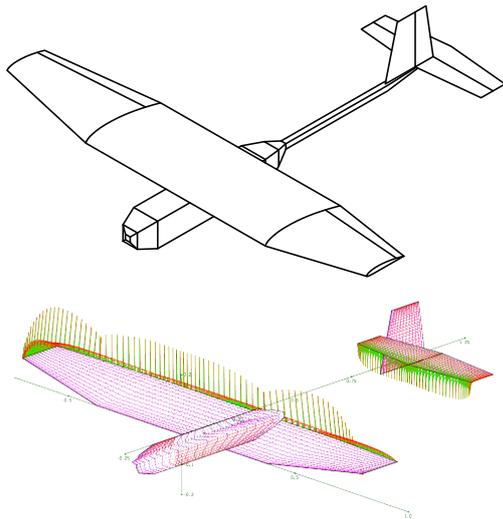


Abb. 4: Geometrie des diesjährigen Beispielentwurfs (oben) und Umsetzung als Wirbelgittermodell in AVL (unten).

Alle Rechnungen mit den Daten aus XFOIL und AVL haben in Matlab [7] zu erfolgen, dadurch sind die Lösungswege nachvollziehbar und Fehler lassen sich leichter finden. Außerdem erlaubt eine saubere Implementierung in Matlab den Studierenden notwendige Iterationen im Designprozess schneller durchzuführen. Die Simulation erfolgt in der Matlab-Umgebung Simulink.

### 3. Neuerungen im Sommersemester 2023

Wesentliche und zentrale Neuerung ist die praktische Umsetzung des Entwurfs. Hierzu kommen das geförderte Laserschneidergerät sowie eigenfinanzierte Komponenten zum Einsatz. Damit wird ein grundlegender Baustein des methodisch-didaktischen Konzeptes des Moduls verwirklicht: Es gibt ein motivierendes Ziel mit einem greifbaren Ergebnis. Weiterhin lernen die Teilnehmenden die vielen kleinen Hindernisse bei der praktischen Umsetzung eines Entwurfs kennen, damit umzugehen und sie zu überwinden.

Infolge dessen verlagert sich der Schwerpunkt der Arbeitspakete mehr in Richtung der konkreten Auskonstruktion. Vorab wurde am Lehrstuhl ein Referenz-sUAS (Abb. 4, 7, 8) entworfen, konstruiert und gebaut. Dies erlaubte

es den Lehrenden den Aufwand für die einzelnen Prozessschritte besser abschätzen und den Studierenden gezieltere Hilfestellung geben zu können.

Im Zuge von Konstruktion und Bau des UAVs muss eine Vielzahl an Detaillösungen erarbeitet und umgesetzt werden. Fällt die globale Struktur des Flügels in Holm-Rippenbauweise mit Bespannung noch relativ übersichtlich aus, so steigert sich die Komplexität erheblich bei den Aussparungen für die Ruder, der Positionierung der Servos und Antriebe oder dem demontierbaren Anschluss des Flügels am Rumpf einschließlich der Übergänge und Kabeldurchführungen.

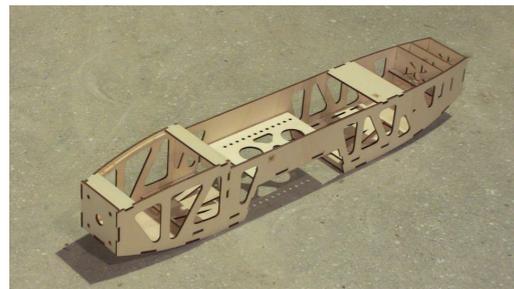


Abb. 5: Standardisierter Kastenrumpf im Rohbau, noch ohne Bespannung.

Eine gewisse Vereinfachung und damit Reduzierung des Arbeitsaufwandes wird durch engere Vorgaben bei den verfügbaren Komponenten erreicht. Der standardisierte Kastenrumpf wird vom Lehrstuhl vorgefertigt (Abb. 5).

Der Leitwerksträger ist als einfaches Kohlefaserrohr ausgeführt, was eine unkomplizierte Variation des Leitwerkshebelarms erlaubt. Ebenfalls eingeschränkt wurde die Auswahl an Motoren und Akkus (Abb. 6). Der zu verwendende Propeller ist vorgegeben.



Abb. 6: Motor, Propeller und Flugakku aus dem gehobenen Modellbauzubehör-Sortiment

Selbst auszulegen und zu konstruieren sind Flügel und Leitwerk, die entsprechend der verfügbaren Technologie in klassischer Holm-Rippen-Bauweise aus Flugzeugsperrholz entstehen. Das Laserschneidgerät erlaubt eine schnelle und effiziente Produktion der vielen Einzelteile sowie einfacher Positioniervorrichtungen für die Montage. Den Zusammenbau bewerkstelligen die Gruppen selbst unter Anleitung und Aufsicht des Lehr- und Werkstattpersonals.



Abb. 7: Holm-Rippen-Struktur des Flügels für das Referenz-sUAS.

Das fertige Flügelgerüst (Abb. 7) wird abschließend mit Modellbaufolie bespannt, um eine glatte geschlossene Oberfläche zu erhalten (Abb. 8). Zur Feinjustierung des Schwerpunktes sind die Positionen der einzelnen Systemkomponenten im Rumpf noch verschiebbar. Darüber hinaus können Einbauhöhe und -winkel des Elektromotors eingestellt werden. Der Schubvektor soll möglichst durch den Schwerpunkt verlaufen, um das schubinduzierte Nickmoment zu minimieren.

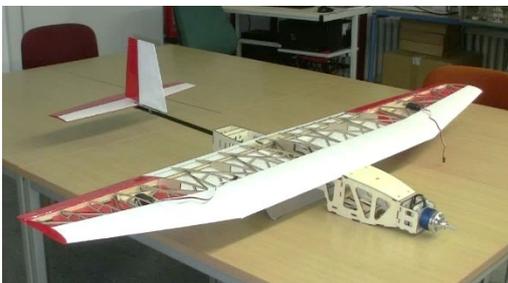


Abb. 8: Erste Abschätzung der tatsächlichen Schwerpunktlage auf einem Prisma.

Die Flugsteuerung erfolgt zentral über einen Pixhawk-Autopiloten [8]. Ausgehend von den in der Simulation gewonnenen flugdynamischen Eigenschaften und Reglerentwürfen wird der Pixhawk-Flugcomputer mittels

QGroundControl [9] programmiert. Die Kombination aus QGroundControl und Pixhawk erlaubt den Studenten einen erleichterten Zugang zur Programmierung von Autopiloten und Missionsplanung (Flugrouten etc.). QGroundControl fungiert des Weiteren als eine Bodenstation für den Betrieb des sUAS.

Anschließend muss das Zusammenspiel der elektronischen und mechanischen Komponenten erprobt und optimiert werden.

Der Windkanalversuch erfolgt vorerst noch mit einer recht einfachen Fesselung, mit der die Wirkung der Steuerung demonstriert und überprüft werden kann.

Als Kompensation für den erheblichen zusätzlichen Aufwand bei Detailkonstruktion und Bauausführung wird der Umfang der Simulation zurückgefahren und nur noch ein schriftlicher Bericht zum Projektabschluss gefordert. Die regelmäßigen Präsentationen zum Arbeitsfortschritt wurden beibehalten und so alle zur fortlaufenden Dokumentation angehalten.

#### 4. Erfahrungszuwachs im 2. Jahrgang

Umfangreiche Erfahrungen konnten auch von den beteiligten Lehrenden selbst gesammelt werden, die bisher noch sehr wenig Berührung mit dem Flugmodellbau hatten. Das umfasst die Handhabung der Materialien, z.B. beim Laserschnitt, die Bandbreite der Eigenschaften angelieferter Halbzeuge, den Zeitaufwand für Nachbearbeitung und Zusammenbau. Als grundsätzlich tauglich erwies sich das Konzept des Holm-Rippen-Verbundes mit ineinandergreifenden Steckverbindungen, die mit Klebstoff final fixiert werden. Die Beschränkung des Laserschnitts auf ebene Konturen weitgehend konstanter Dicke macht vor allem händische Nacharbeit für diagonale Aussteifungen erforderlich, die zur Sicherstellung ausreichender Torsionssteifigkeit gebraucht werden. Eine Überraschung stellte sich bei der Schwerpunktlage des Referenzmodells ein, es war zunächst deutlich hecklastiger als in der Auslegung angenommen.

Es zeigte sich, dass, durchaus nicht unerwartet, der Teufel im Detail steckt: Für jedes kleine Problem muss tatsächlich eine Lösung gefunden werden. Das trifft besonders auf bewegli-

che Verbindungen und Anlenkungen/Betätigungen zu. Als konkretes Beispiel für ein weiteres Detail sei hier die Messung des dynamischen Drucks und damit der Fluggeschwindigkeit angeführt, ein zentraler Parameter zur Bestimmung des aktuellen Flugzustandes. Die Punkte, an denen Gesamt- und statischer Druck dafür abgenommen werden, befinden sich immer im Einfluss der Umströmung des Flugzeuges selbst, die wiederum von der Fluglage abhängig ist. Mithin muss die variable Abweichung abgeschätzt und eine geeignete Korrektur eingeführt werden (Abb. 9, 10).

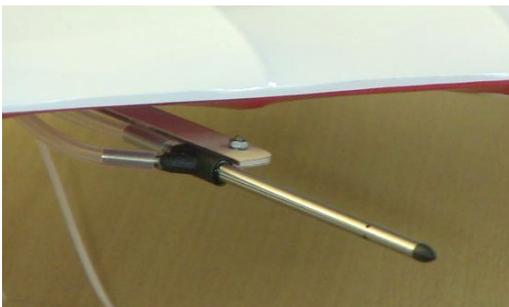


Abb. 9: Prandtl-Rohr aus dem Modellbaubedarf zur Abnahme von statischem und Gesamtdruck vor der Flügelnase

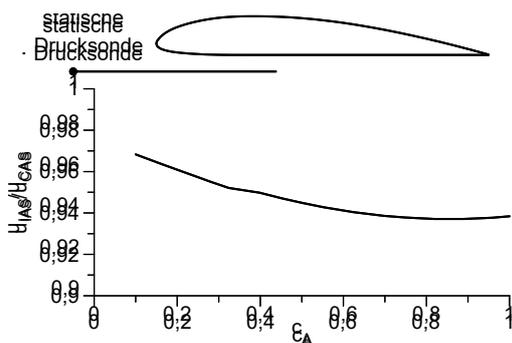


Abb. 10: Zu erwartender Fehler in der angezeigten Fluggeschwindigkeit durch die Wirkung vom Druckfeld des Flügelprofils auf die Messposition (XFoil-Rechnung)

Bei der Zusammenarbeit der Studierenden vor Ort ließen sich sehr spezielle gruppenspezifische Effekte beobachten, die sich von einer Gruppe zur anderen sehr stark unterscheiden können. Grundsätzlich zeichnete sich die Arbeitsweise aller Gruppen genauso wie im Vorjahr durch hohe Motivation und großen Einflusssreichtum bzw. starke Experimentierfreude aus.

Die Platzierung des Kurses im Stundenplan (Fr., 1. Und 4. DS) erwies sich als noch ungünstiger als die im Vorjahr, wodurch bspw. nach der Ausgabe der Aufgaben die nötige Zeit fehlte, sinnvolle Fragen für die darauffolgende Konsultation vorzubereiten. Noch dazu kam es zu Überschneidungen mit anderen LV mit verpflichtender Teilnahme (Exkursionen). Von angebotenen Zusatzterminen zur selbständigen, aber dennoch betreuten Arbeit wurde reger Gebrauch gemacht.

Die räumliche Situation im Windkanalgebäude mit z.T. erheblichen Einschränkungen durch fortlaufende Baumaßnahmen stellte eine zusätzliche Herausforderung dar, die allerdings durch gegenseitiges Verständnis bei den Beteiligten bewältigt werden konnte.

Den Abschluss bildete ein vereinfachter Windkanaltest mit den fertiggestellten Modellen, bei dem sie an einer gefesselten Aufhängung einfach angeströmt wurden (Abb. 11). Damit war unter Beweis gestellt, dass die Entwürfe im geforderten Geschwindigkeitsbereich stabil in der Luft liegen.

## 5. Ausblick

Künftig sind detailliertere Windkanalmessungen vorgesehen, die eine Überprüfung der berechneten Charakteristika am realen Objekt erlauben und so einen kontinuierlichen Zusammenhang von den Vorhersagen der Auslegung zu den tatsächlichen Flugeigenschaften herstellen. Studien- oder Abschlussarbeiten für eine Waage mit passendem Messbereich sind ausgeschrieben.

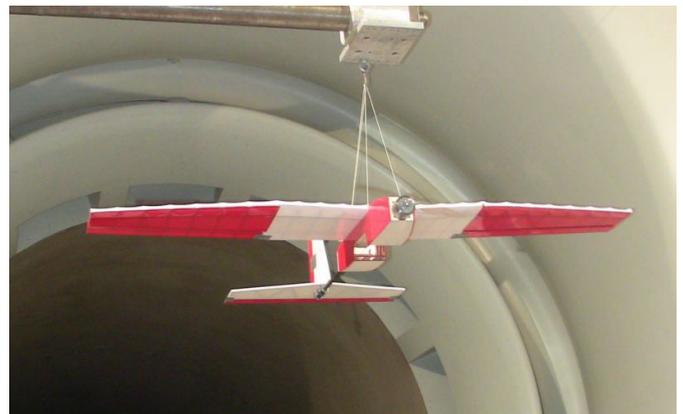


Abb. 11: Modell im Windkanal an einfacher Fesselung mit blockierten Rudern

Im Zuge einer laufenden Diplomarbeit wurde das Kennfeld eines typischen Propellers im Windkanal vermessen. Dadurch wird eine genauere Abschätzung der Leistungsdaten ermöglicht, insbesondere mit Bezug auf Reichweite und Flugdauer. Ein Vergleich der tatsächlichen Charakteristik mit Vorhersagen aus XROTOR [10] erlaubt eine Extrapolation auf die real zu erwartenden Leistungsdaten dann auch für beliebige Konfigurationen.

Materialseitig ist die Verwendung auch dünneren Sperrholzes angedacht, bis hin zu steifen Kartonagen. Zum einen ermöglicht das die Herstellung leichterer Strukturen mit günstigerer Schwerpunktlage, zum anderen werden damit auch beplankte gekrümmte Oberflächen erreichbar, die sich durch eine höhere aerodynamische Güte auszeichnen. Außerdem lassen sich so leichter torsionssteife geschlossene Profile (Nasenkasten) anfertigen, sodass auf diagonale Aussteifungen weitgehend verzichtet werden kann.



Abb. 12: Gruppe 1 vor ihrem Entwurf „SN-23 Penguin“



Abb. 13: Gruppe 2 vor ihrem Entwurf „FeuerFalke“

der „Ausschreibung für Lehr-/Lernprojekte der Fakultät Maschinenwesen“, bedanken.

## Literatur

- [1] M. Garvens, Analyse des deutschen Drohnenmarktes, Verband Unbemannte Luftfahrt, Berlin, 2021
- [2] H. Rienecker, V. Hildebrand, H. Pfifer, Energy optimal flight path planing for unmanned aerial vehicle in urban environments, Proceedings of the 2022 CEAS EuroGNC conference, CEAS, Berlin, Germany, 2022. CEAS-GNC-2022-031
- [3] F. Biertümpfel, J. Frey, H. Pfifer, Vom Computer in die Luft – Das interdisziplinäre Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik, Lessons Learned 3, 1 (2023), DOI: 10.25369/ll.v3i1.59
- [4] M. Drela, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils, In: Mueller, T.J. (eds) Low Reynolds Number Aerodynamics. Lecture Notes in Engineering, vol 54., pp. 1-12, 1989
- [5] C.-C. Rossow, K. Wolf, P. Horst, Handbuch der Luftfahrzeugtechnik, Carl Hanser Verlag, 2014, ISBN: 9783446436046
- [6] M. Drela, H. Youngren, MIT, AVL User Primer – AVL 3.40, 2020, [http://web.mit.edu/drela/Public/web/avl/avl\\_doc.txt](http://web.mit.edu/drela/Public/web/avl/avl_doc.txt) (abgerufen am 29.09.2023)
- [7] The Mathworks, Inc. MATLAB. Version 2021b, 2021
- [8] Homepage - Pixhawk, <https://pixhawk.org/> (abgerufen am 27.09.2023)
- [9] QGC - QGroundControl - Drone Control, <http://qgroundcontrol.com/> (abgerufen am 27.09.2023)
- [10] M. Drela, H. Youngren, MIT, XROTOR User Guide, 2003, [http://web.mit.edu/drela/Public/web/xrotor/xrotor\\_doc.txt](http://web.mit.edu/drela/Public/web/xrotor/xrotor_doc.txt) (abgerufen am 29.09.2023)

## Danksagung

Die Autoren möchten sich herzlichst bei der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden, für die Förderung des Lasercutters im Rahmen