



# Vom Computer in die Luft – Das interdisziplinäre Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik

F. Biertümpfel\*, J. Frey, H. Pfifer

*Flugmechanik und Flugregelung, Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenwesen, TU Dresden*

## Abstract

Im Rahmen des Interdisziplinären Entwurfsprojektes Luft- und Raumfahrttechnik entwerfen Studierende unbemannte Flugsysteme für Such- und Rettungsaufgaben. Dies umfasst den Vorentwurf (z.B. Aerodynamik), Detailentwurf (z.B. Autopilotenentwurf) und, bisher, die simulationsbasierte Verifikation des Gesamtkonzeptes. Nun soll der Entwurf vom Computer in die Luft gebracht werden. Hierfür stellt die Professur für Flugmechanik und Flugregelung sämtliche elektronischen Komponenten (Motoren, Flugrechner, etc.) zur Verfügung. Die Flugzeugstruktur soll von den Studierenden selbst gefertigt werden. Hierfür steht ihnen ein hochmoderner Lasercutter, welchen die Professur im Rahmen der Ausschreibung für Lehr-/Lernprojekte der Fakultät Maschinenwesen gefördert bekommen hat, zur Verfügung. Dieser erlaubt den schnellen und effizienten Zuschnitt der Strukturteile in Holzbauweise. Das selbstgebaute Flugsystem wird im Flugversuch evaluiert.

As part of the Interdisciplinary Design Project Aerospace Engineering, students design unmanned aerial systems for search and rescue missions. This includes preliminary design (e.g. aerodynamics), detailed design (e.g. autopilot design) and, so far, simulation-based verification of the overall concept. Now the design is to be brought from the computer into the air. For this purpose, the Chair of Flight Mechanics and Flight Control provides all electronic components (engines, flight computers, etc.). The aircraft structure is to be manufactured by the students themselves. For this purpose, they have a state-of-the-art laser cutter at their disposal, which the professorship received funding for within the framework of the call for proposals for teaching/learning projects of the Faculty of Mechanical Engineering. This allows the fast and efficient cutting of the structural parts in wooden construction. The self-built flight system is being evaluated in a flight test.

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

## 1. Einleitung

Die Lehrveranstaltung „Interdisziplinäres Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik“ lief erstmalig im Sommersemester 2022 an der seit Januar 2021 bestehenden Professur für Flugmechanik und Flugregelung. Im Rahmen des Projektes entwerfen und testen die Studierenden in Vierergruppen ein kleines unbemanntes Flugsystem (engl. small Unmanned Aerial System - sUAS) speziell für Such- und Rettungsmissionen – ein stetig wachsendes Anwendungsfeld von sUAS. Die derzeitige Iteration des Projektes setzt sich aus den drei Kernthemen eines jeden Entwurfsprojektes zusammen: dem Vorentwurf, dem Detailentwurf und der Implementation sowie Verifizierung des Konzeptes. Letzteres erfolgt jedoch noch rein numerisch innerhalb einer Simulationsumgebung. Das Projekt verlangt von den Studierenden ein Höchstmaß an Teamfähigkeit, Selbstorganisation und fachübergreifendem Denken. Die direkte Interaktion untereinander, aber auch mit den Lehrenden, fördert die Entwicklung essenzieller Softskills, von denen die Studierenden in ihrer späteren Karriere profitieren können. Die Arbeit und Konsultation im Kleingruppenformat ermöglichen es, den Lernfortschritt einzelner genau zu verfolgen, gezielt zu fördern und auch zu fordern. Ein Kernpunkt der LV ist eine realitätsnahe Umsetzung des Entwurfsprojektes, was realistische Anforderungen, Erarbeitung von Lastenheften, Reviews, Progressmeetings und die Präsentation von Milestones beinhaltet. In der nächsten Evolutionsstufe des Projektes sollen die Entwürfe nun vom Computer in die Luft gebracht werden. Hierfür werden die Studierenden mittels von der Professur gestellten Commercial-off-the-Shelf (COTS) Elektronikkomponenten und selbst gefertigten lasergeschnittenen Strukturteilen ihre Flugzeugentwürfe bauen. In einer abschließenden Flugtestkampagne werden die Flugeigenschaften der Entwürfe dann verifiziert. Hiermit wird es den Studierenden erlaubt, den kompletten Entwurfsprozess eines sUAS zu durchlaufen und die Früchte Ihrer Arbeit zu ernten.

## 2. Die aktuelle Iteration

Im Sommersemester 2022 lief das „Interdisziplinäre Entwurfsprojekt Luft- und Raumfahrttechnik“ an: Gruppen zu je vier Studierenden entwerfen je ein kleines unbemanntes Flugsystem für Such- und Rettungsaufgaben. Dafür wurde bewusst eine Starrflügelkonfiguration gewählt, weil diese die effizienteste und meistverwendete Konfiguration für solche Aufgaben darstellt. Außerdem erlaubt sie die direkte, interdisziplinäre Anwendung der im Studium gelernten Theorie zu Flugzeugentwurf, Strukturauslegung, Flugmechanik, Flugdynamik, Flugleistung, Flugregelung sowie Aerodynamik. Des Weiteren stellen sUAS einen der wesentlichen Wachstumsmärkte der internationalen Luftfahrtindustrie dar [1], finden jedoch im Lehrbetrieb vieler Universitäten wenig Beachtung. Somit bereitet die Lehrveranstaltung die Studierenden perfekt auf einen potenziellen Berufsweg vor und gibt ihnen einen Vorsprung gegenüber Mitbewerbern anderer Universitäten. Diese bewusst gewählte und vermittelte Aussicht trägt direkt zu Motivation und Engagement der Studierenden bei.

Speziell in einer auf Eigenverantwortung und selbstorganisierter Arbeit beruhenden Veranstaltung ist es wichtig, eine nachvollziehbare Geschichte und ein realistisches Szenario zu vermitteln. Dies stellt den Startpunkt des Projektes dar, in dem die Lehrenden als Management der Firma fungieren und die Studierenden ein Team junger Entwicklungsingenieure verkörpern, die sich nach dem Ende ihres Studiums dem ersten großen Projekt gegenübersehen.

Die Firmenleitung präsentiert den Auftrag eines Kunden über ein sUAS für eine genau definierte Referenzmission (Abb. 1) mit dezidierten Leistungsanforderungen, die sich für jede Gruppe leicht unterscheiden. Hierbei wurde besonders auf faire Bedingungen geachtet, d.h. keine Vorgabe war per-se schwieriger. Jedoch waren sie unterschiedlich so das es keinen geeigneten „Standardentwurf“ für alle Gruppen gab. Auf Basis der gegebenen Anforderungen wird ein definiertes Lastenheft präsentiert.

Damit startet das Projekt, das sich im aktuellen Stand aus drei Hauptteilen zusammensetzt: dem Vorentwurf, dem Detailentwurf und der simulationsbasierten Verifikation des Gesamtkonzeptes.

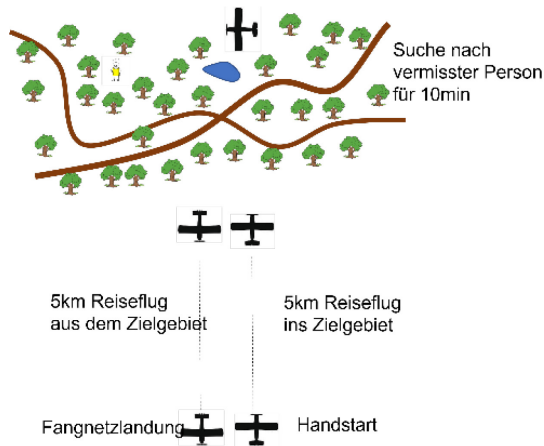


Abb. 1: Beispielmision eines sUAS

Im Vorentwurf müssen die Studierenden ihr sUAS auf Basis von Flugleistungs- und Aerodynamikrechnungen grundlegend dimensionieren. Das beinhaltet die Auswahl und Evaluierung eines geeigneten Flügelprofils und -grundrisses. Für ersteres wird das Programm Xfoil [2] verwendet. Dieses Werkzeug basiert auf einer 2-D-Panelmethode mit überlagerter Grenzschichtrechnung und erlaubt die numerische Berechnung der Widerstandspolaren des Profils als Basis der Geschwindigkeitspolaren des Gesamtflugzeugs. Jene sind zur Auswahl des Antriebs, Batterien und Bestimmung der Flugleistungen zwingend erforderlich. Hierfür werden den Studierenden COTS-Motoren und Akkus ebenso vorgegeben wie für den Vorentwurf typische Annahmen zu Formwiderständen oder Strukturmassen einzelner Flugzeugteile. Dadurch wird der Fokus auf der Auslegung und die Aufgabe in einem angemessenen zeitlichen Rahmen gehalten. Sämtliche Berechnungen erfolgen in Matlab [3], einem der leistungsfähigsten und meistgenutzten Ingenieursrechen- und Simulationstools in der Industrie. Die Präsentation der Ergebnisse kommt dem „Preliminary Design Review“ (PDR) in einem Industrieprojekt gleich.

Die Softwarewahl fiel bewusst auf Matlab, wie nachfolgend kurz begründet. Zum einen ist Matlab die führende kommerzielle Software

für numerische Simulation und Datenerfassung sowie deren Auswertung. Eine Vielzahl an problemspezifischen Bibliotheken, wie z.B., für Systemidentifikation, Reglerauslegung und Regleranalysen, erlaubt eine breite Anwendung auf Ingenieursprobleme, weswegen es in Firmen wie Airbus im Bereich der Flugmechanik und Flugregelung oder bei BMW für die Modellierung der Fahrdynamik und Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen genutzt wird. Viele Ausgründungen von Universitäten im Bereich von sUAS (z.B. Phoenix Wings, Amazilla Aerospace) verwenden ebenso Matlab. Selbiges gilt für Forschungseinrichtungen wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt. In dem die Studenten früh mit dieser leistungsfähigen Software vertraut gemacht werden wird ihnen der spätere Berufseinstieg erleichtert. Darüber hinaus verwendet Matlab eine, verglichen zu Fortran oder C, einfachere Syntax. In Kombination mit dem großen Repertoire an Tutorials bietet es den Studierenden eine angenehme Lernkurve. Dies ist besonders wichtig da der Fokus einer solchen Lehrveranstaltung nicht primär auf dem Erlernen von Software, sondern der problembezogenen Anwendung von erworbenem Wissen liegen sollte. Zu guter Letzt, beinhaltet Matlab die Software Simulink, welche defacto eine grafische Repräsentation von Matlab-Code in Form von Blockschaltdiagrammen darstellt. Simulink ist besonders geeignet zur Modellierung und Analyse komplexer nichtlinearer dynamischer Systeme. Durch die direkte Integration in Matlab, sowie einer Vielzahl an Tutorials wird auch hier eine angemessene Lernkurve für die Studierenden erreicht. Simulink wird speziell in den späteren Analysephasen essentiell.

Der nächste Aufgabenblock beinhaltet den Detailentwurf und damit die finale Dimensionierung des Flugzeuges. Die Gruppen müssen einen Rumpf auslegen, der die Nutzlast und die notwendige Ausrüstung beherbergen kann. Außerdem muss das Leitwerk so ausgelegt werden, dass Stabilität und Steuerbarkeit für alle möglichen Schwerpunktlagen des Flugzeuges garantiert sind. Des Weiteren wird eine wohlbegründete Materialauswahl gefordert. Zur späteren Implementierung des Flugzeuges in die Simulationsumgebung muss, neben der Geometrie und Massenverteilung, die aerody-

namische Charakteristik des sUAS in Form dimensionsloser Koeffizienten bestimmt werden. Hierfür benutzen die Studierenden das Programm Athena Vortex Lattice (AVL) [4], das mittels eines Mehrfach-Traglinienverfahrens (Abb. 2) die relevanten aerodynamischen Parameter berechnet.

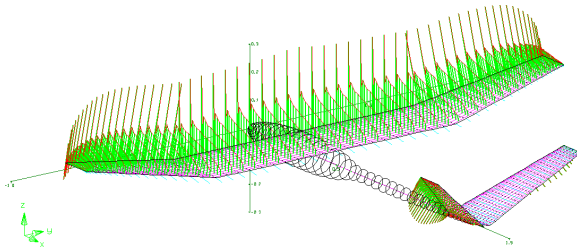


Abb. 2: Beispiel sUAS in AVL

Die bis zu diesem Zeitpunkt erzielten Ergebnisse stellen einen großen Meilenstein auf dem Weg zum „Critical Design Review“ (CDR) des Projektes dar; die finalen Entwürfe nehmen bereits Gestalt an (Abb. 3).



Abb. 3: sUAS vor dem CDR, noch ohne die spätere V-Stellung der Außenflügel (vgl. Abb. 6)

Im Anschluss erfolgt die Implementation in die moderne nichtlineare Flugsimulationsumgebung der Professur auf Basis von Matlab/Simulink. Die in der nichtlinearen Simulation erreichten Flugleistungen werden mit den theoretisch erreichbaren verglichen.

Im Schlussabschnitt des Projektes werden letzte inkrementelle Änderungen vorgenommen und die Flugdynamik des Flugzeugs mittels gängigen Flugtesttechniken ausgewertet. Hierfür werden auf Basis der in der Vorlesung Flugmechanik und Grundlagen der Aerodynamik/ Flugzeugaerodynamik und einer kurzen Rekapitulation in Systemdynamik die Eigenbe-

wegungsformen des Flugzeuges in der Längsbewegung (Phygoide und Anstellwinkelschwingung) und Seitenbewegung (Spiralbewegung, Rollbewegung und Dutch-Roll) charakterisiert. Hierbei werden Verfahren wie das Transient-Peak-Ratio [5] angewandt um Eigenfrequenzen und Dämpfung der Eigenbewegungsformen zu identifizieren. Diese stehen in direkter Relation mit der aerodynamischen Auslegung des Flugzeuges und somit den Resultaten aus AVL. Die Resultate werden mit gängigen Anforderungen aus den sogenannten „Mil-Specs“ [6] verglichen. Somit kann die flugdynamische Güte der Flugzeuge ohne Regler beurteilt werden. Ist diese nicht ausreichend müssen (kleinere) aerodynamische Änderungen am Entwurf vorgenommen werden. Dieser Projektabschnitt verlangt von den Studierenden ein Höchstmaß an Interdisziplinarität und Transferleistungen.

Im Anschluss erfolgen Entwurf und Implementation der Flugregler für Längs- und Seitenbewegung. Das Ziel der Regler ist eine weitere Verbesserung der Flugeigenschaften des Flugzeuges, sowie der Augmentation des Flugverhaltens. Die Entwürfe werden auf klassische Proportional-Integral-Derivativ (PID) Regler limitiert. PID-Regler sind den Studenten aus dem Grundstudium bekannt, womit die Studenten auf vorhandenes Wissen zurückgreifen können. In ausgiebigen numerischen Tests wird das Verhalten des geregelten und ungeregelten Flugzeuges verglichen. Der Vergleich des geregelten und ungeregelten Flugzeuges ist in Abb. 4 dargestellt. Am Ende des Blocks ist ein Meilenstein erreicht, welcher dem CDR in einem Industrieprojekt entspricht.

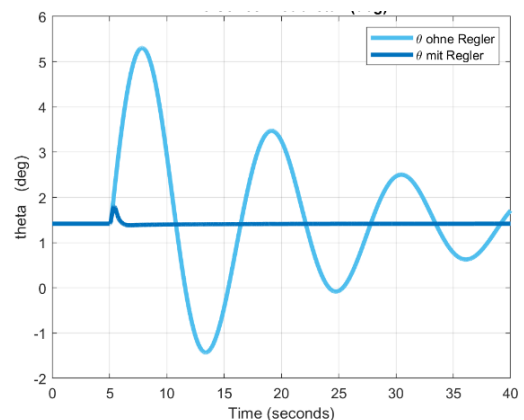


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Nickbewegung nach einer Windstörung ohne und mit Regler

Bei der Bearbeitung der Aufgaben und Milestones werden die Studierenden in zwei individuellen Gruppenkonsultationen zu je 30 min in jedem Block unterstützt. Dies erlaubt es den Lehrenden, den individuellen Gruppenfortschritt zu beurteilen sowie gezielt Studenten in Ihrer wissenschaftlichen Entwicklung zu fördern.

Mit einem Bericht und der abschließenden Präsentation nach jedem Block soll zum einen das Präsentieren von Ergebnissen vor größeren Gruppen, eine sehr wichtige aber im Studium oft vernachlässigte Fähigkeit, trainiert werden, und zum anderen der aktive Austausch der Gruppen mittels konstruktiven Feedbacks gefördert werden.

### 3. Studenten-Feedback und Lessons-Learned

Obwohl die erste Iteration des Projektes noch auf eine rein theoretische bzw. simulationsbasierte Umsetzung limitiert ist, ist von Anfang an ein hohes Interesse und starkes Engagement seitens aller Beteiligten zu verzeichnen. Es bestand eine gute und stabile Beteiligung der eingetragenen zwölf Studierenden an den Veranstaltungen in Tagesrandzeiten (Di., 6.DS und Fr., 1.DS), während die Hörerschaft bei den konventionellen Vorlesungen nur langsam wieder in die Hörsäle findet. Hiermit stellt die Lehrveranstaltung einen wichtigen Baustein in der Back-to-Campus-Strategie der Fakultät Maschinenwesen dar.

Speziell die Konsultationen befördern einen regen Austausch zwischen Lehrenden und Studierenden, der in den Zeiten rein digitaler Lehre stark gelitten hat. Besonders in der ersten Iteration einer neuen Lehrveranstaltung ist das essenziell, da es ermöglicht, Studierendeninteressen und Fähigkeiten, aber auch Defizite in der Struktur der Veranstaltung und Verbesserungspotenzial zu identifizieren.

Das Feedback wurde von den Lehrenden direkt in die Vorlesung einbezogen, was in einer sehr dynamischen und auch modernen Veranstaltung mündete. So wurde z.B. die Anzahl der Berichte gegen Ende der Vorlesungszeit deutlich reduziert und kompaktere Meilensteine, wie sie auch in der Industrie üblich sind, formuliert. Eine weitere „Industrialisierung“

der Aufgabenblöcke und deren „Milestones“ und „Deliverables“ ist in den nächsten Iterationen der Lehrveranstaltung geplant (Abb. 5).

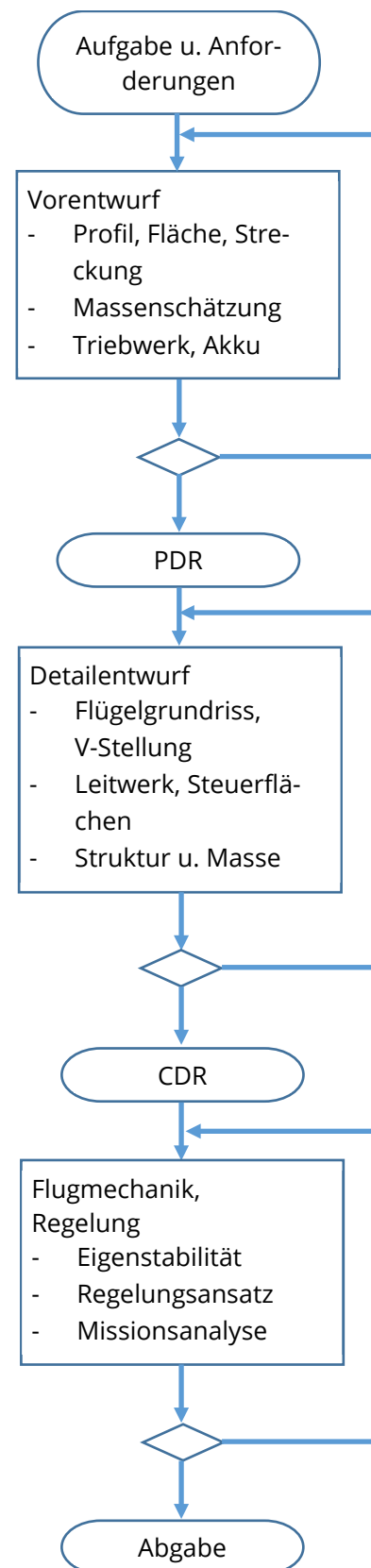


Abb. 5: Flussdiagramm des Projektablaufs

Diese Anpassung erlaubte es den Studierenden, mehr Zeit in die Entwurfsaufgaben zu investieren. Die regelmäßigen Präsentationen wurden jedoch beibehalten. Diese haben sehr gutes Feedback erfahren und die Studierenden haben die Möglichkeit begrüßt, ihre Präsentationsfähigkeiten vor einem kritischen Fachpublikum zu verbessern. Dies machte sich in einem kontinuierlichen Anstieg der Präsentationsqualität bemerkbar und somit einer Verbesserung eines wichtigen Soft-Skills.

Weiterhin sind die Präsentationen ein adäquates Mittel, die Gruppen zu einer kontinuierlichen Arbeitsweise zu motivieren und „Hochdruck“-Arbeiten kurz vor Abgabefrist des Beleges zu verhindern. Dies wurde von den Teilnehmenden sehr positiv aufgenommen.

Ebenso positiv empfanden die Studierenden das zeitintensive und iterative Arbeiten, welche koordinierte Heimarbeit verlangten, zu Semesterbeginn stattfanden. Kürzere und vor allem praktischere Aufgaben gegen Semesterende konnten Zusatzstress vor der Prüfungszeit vermeiden.

Des Weiteren sind die Präsentationen und häufigen Konsultationen sehr geeignet, den Fortschritt der Gruppen schnell zu evaluieren. So konnten riskante Konzepte identifiziert, entsprechend verändert und damit die Kreativität effizient gelenkt werden, wodurch demotivierende und zeitraubende Fehlschläge verhindert wurden. Der Erfolg zeigte sich in den Entwürfen aller Gruppen, welche durchweg sämtliche gestellten Forderungen erfüllt oder sogar übertroffen haben.

Trotz des bisher rein theoretischen Entwurfs wirkt die Arbeit am eigenen Projekt sehr motivierend im Vergleich zum Nachrechnen vorgegebener akademischer Beispiele. Die Beleuchtung der unterschiedlichen Aspekte des Entwurfs fördert weiterhin das ganzheitliche Denken und Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den Einzeldisziplinen.

Weiterhin haben die Studierenden deutlich mehr Freiheiten und nehmen sich diese auch, womit die kreative ingenieurstechnische Problemlösung gefördert wird. Dies zeigte sich in deutlich unterschiedlichen Flugzeugkonzepten (Abb. 6, 7, 8).



Abb. 6: Finaler Entwurf der Gruppe mit V-Stellung in den Außenflügeln zur Verbesserung der Spiralstabilität



Abb. 7: Finaler Entwurf einer weiteren Gruppe

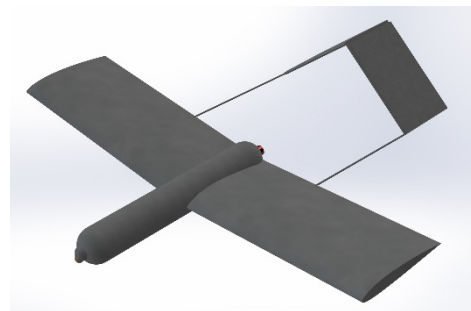


Abb. 8: Finaler Entwurf der dritten Gruppe

Des Weiteren wurde von den Studierenden der Einsatz und die Anwendung verschiedener Tools begrüßt. Durch regen Austausch mit den Gruppen konnten hierbei neue Herangehensweisen zur Erstellung effizienter Tutorials zum Selbststudium vermittelt werden. Die größten Schwierigkeiten hat den Teilnehmenden der Umgang mit Matlab bereitet. Jedoch konnten hier über das Semester bei allen Gruppen deutliche Fortschritte beobachtet werden. Auch das Zusammenspiel in den Gruppen, bestehend aus Teilnehmenden unterschiedlicher Semester mit unterschiedlichen Interessen und Fähigkeiten wirkte sich positiv aus. Somit zeigte sich wiederum, dass das Ganze mehr ist

als das Summe seiner Teile und Gruppenarbeit einen wichtigen Teil im Studium darstellen sollte.

Eine wichtige Erkenntnis der ersten Iteration des Entwurfsprojektes war die Positionierung im Studienablaufplan. Angesetzt für das achte Semester findet sie zeitgleich mit der Vorlesung Flugdynamik und Flugregelung sowie dem Modul Flugzeugaerodynamik (ebenfalls angeboten von FMR) statt. Dies bietet theoretische Synergieeffekte, welche sich leider nicht manifestiert haben. Da das in den beiden anderen Vorlesungen vermittelte Wissen nicht vorausgesetzt werden konnte, erfolgte eine dynamische Anpassung des Erwartungshorizontes auf der Basis der Vermittlung grundlegenden Wissens. Eine formale Verschiebung in das neunte Semester könnte hier Abhilfe schaffen.

#### 4. Ausblick

Mit den durch die Förderung im Rahmen des Lehrprojektes geschaffenen Kapazitäten wird es möglich sein, die studentischen Entwürfe real in die Luft zu bringen und so alle Beteiligten die Früchte ihrer Arbeit ernten zu lassen.

Hierfür plant die Professur die Beschaffung verschiedener Komponenten sowie Werkzeuge zum Bau der Drohnen auf eigene Kosten. Dies umfasst Sets an Elektromotoren verschiedener Leistungen, Akkumulatoren, Servos, Flugrechnern, Empfängern, Sendern sowie Material. Über die Lehrprojektförderung erfolgt die Beschaffung eines modernen Lasercutters, der eine schnelle, sichere und abfallarme Herstellung der Einzelteile ermöglicht.

Die Studierenden stellen die technischen Zeichnungen für den Zuschnitt bereit. Geleitet von einem Mitarbeiter arbeiten sie an dem Fertigungsprozess und bekommen Feedback zu ihren Zeichnungen. Nach dem Zusammenbau der Struktur und der Integration aller Komponenten im UAV-Labor der Professur erproben die Studierenden ihr eigenes Flugzeug auf einem Modellflugplatz. Damit erfahren sie den kompletten, industrienahen Entwicklungszyklus eines UAS hautnah und sind immer aktiv eingebunden. Damit werden die Studierenden

ideal für eine Anstellung im stetig wachsenden kommerziellen UAS-Markt vorbereitet.

Weiterhin ist die Ergänzung der Veranstaltungsreihe durch Windkanalmessungen an den fertigen Fluggeräten gedacht. Der von der Professur betriebene 3-m-Windkanal der TU hat die optimalen Dimensionen zur Untersuchung von Objekten dieser Größenklasse (Abb. 9). Es wird dadurch möglich sein, die mit den Berechnungswerkzeugen gewonnenen aerodynamischen Daten nachzuprüfen und in die Simulationsumgebung einzuspeisen, wodurch sich die Vergleichbarkeit mit dem Freiflug verbessert. Für die angesichts der niedrigen Fluggeschwindigkeiten relativ geringen zu erwartenden Kräfte muss noch eine geeignete Waage verfügbar gemacht werden. Deren Konstruktion und Kalibrierung soll Thema einer Studienarbeit sein. Ferner wirken die Annahmen zum Wirkungsgrad insbesondere des Propellers, die der Auslegung des Antriebs zugrunde liegen, noch recht optimistisch an. Auch hierzu sind Studienarbeiten zur Vermessung von Propellerkennlinien im Windkanal geplant.

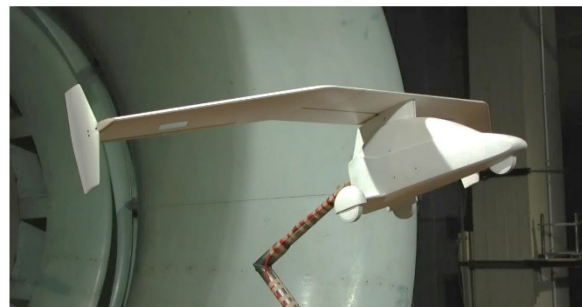


Abb. 9: Schwanzloses Fluggerät mit etwa 2 m Spannweite im Windkanal der TU Dresden

Außerdem wird der Auslegungsanteil durch das setzen gezielterer und zum Teil restriktiverer Richtwerte und weniger iterativer Berechnungsansätze reduziert um zeitlichen Rahmen der Vorlesung annähernd beizubehalten.

Durch den insgesamt höheren praktischen Anteil und die motivierende Aussicht, Teil eines Teams zu sein, welches ein Flugzeug zum Fliegen bringt, wird erwartet, dass sich die Teilnehmerzahl im Vergleich zum ersten Anlauf deutlich erhöht.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich herzlichst bei der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden, für die Förderung des Lasercutters im Rahmen der „Ausschreibung für Lehr-/Lernprojekte der Fakultät Maschinenwesen“, bedanken.

## Literatur

- [1] M. Garvens, Analyse des deutschen Drohnenmarktes, Verband Unbemannte Luftfahrt, Berlin, 2021
- [2] 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
- [3] The Mathworks, Inc. MATLAB. Version 2021b, 2021
- [4] M. Drela and H. Youngren, MIT AVL User Primer – AVL 3.36, 2017
  
- [5] D. T. Ward, Introduction to Flight Test Engineering, Kendall/Hunt, p. 212, 2007
- [6] US DoD, Flying Qualities of Piloted Aircraft - MIL-F-8785c, US DoD, Technischer Bericht, 1980